

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Завідувач кафедри
Олег ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

“ ” 2026 p.

на тему: Експериментальна установка визначення розподілу тиску в
куксоприймачах протезів нижніх кінцівок

Виконав: студент 4 курсу, групи МА-21

Дейлід Денис Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Керівник к.т.н., доц., Семінська Н.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці к.т.н., доц., Семінська Н.В.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) _____
(підпис)

Консультант з технології машинобудування к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Олег ЛЕВЧЕНКО

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Дейлідіу Денису Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту: Експериментальна установка визначення розподілу тиску в куксоприймачах протезів нижніх кінцівок

керівник проєкту _____ к.т.н., доцент Семінська Наталія Валеріївна,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по університету від “ 01 ” червня 2026 року № 2019-с

2. Термін подання студентом проєкту 11.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту: мобільність установки, автономність роботи – 10 год, зняття результатів замірів дистанційно, біосумісність актуаторів, тиск у системі – 2,6 бара, час для привдення актуаторів у дію – 10 секунд, куксоприймач виготовляється адитивними технологіями.

4. Зміст пояснювальної записки: розділ 1. Огляд видів куксоприймачів нижніх кінцівок при трансфеморальній ампутації. Огляд датчиків для зняття результатів навантаження та можливості їх розташування; розділ 2. Розрахунковий розділ; розділ 3. Технологія машинобудування; розділ 4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо)

Загальний вигляд випробувального стенду, схема електрична принципова, схема пневматична принципова, складальне креслення, специфікація, креслення плити монтажної, креслення подушки пневматичної, плакат – розрахунок методами скінченних елементів, плакат – технологія машинобудування, плакат – блок-схема, плакат – огляд існуючих моделей, презентація.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Охорона праці	к.т.н., доц. Семінська Н.В.		
2. Технологія машинобудування	доц. Кореньков В.М.		

7. Дата видачі завдання 15.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання до дипломного проектування	15.04.2026	Виконав
2	Проходження практики	20.04.2026-17.05.2026	Виконав
3	Розробка проекту	18.05.2026-30.05.2026	Виконав
4	Розробка конструкторської документації	30.05.2026-02.06.2026	Виконав
5	Оформлення дипломного проекту	02.06.2026-16.06.2026	Виконав
6	Захист дипломного проекту	16.06.2026-19.06.2026	Виконав

Студент

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

ДЕЙЛІД Д.С.

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

СЕМІНСЬКА Н.В.

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Експериментальна установка визначення розподілу тиску в
куксоприймачах протезів нижніх кінцівок

Анотація

Метою дипломного проєкту є створення лабораторної установки, призначеної для моделювання реальних умов експлуатації куксоприймачів протезів нижніх кінцівок.

Установка має забезпечувати відтворення навантажень, характерних для процесів стояння та ходи, із можливістю точного контролю та вимірювання динамічних параметрів. Основним завданням є дослідження внутрішнього розподілу тисків і зсувних напружень у куксоприймачі під час дії осьових навантажень, що дозволить оцінити комфорт і безпеку користувача, виявити локальні піки тиску.

У першому розділі даного проєкту розглянуто види ампутацій нижніх кінцівок людини вище колінного суглоба, форми гільз куксоприймачів, датчики для зняття фізичних показників, їх області застосування, фізичний принцип роботи та способи розташування.

Другий розділ присвячений розробці та розрахункам мехатронної системи. Було розташовано п'єзореzystивні датчики Taidacent RXD 1016 на межі кінцівка-куксоприймач. Підібрано матеріал для пневматичних подушок з умовою біосумісності відповідно до міжнародних стандартів та розраховано їх міцнісні характеристики. Для забезпечення навантажень розраховано та підібрано елементи пневматичної системи. Щоб забезпечити автономність роботи, обчислено необхідний об'єм енергоносіїв. Оскільки система має вимірювати данні у режимі реального часу та бути мобільною, підібрано електронні компоненти, складено електронну схему їх під'єднання та написано програмний код, використовуючи мову C++, для підвантаження його на мікропроцесор плати Arduino Mega. Проведено розрахунок та аналіз кріплення гільзи куксоприймача до штатива методом скінченних елементів, виявлено найбільш навантажений спосіб кріплення.

Методом адитивних технологій у третьому розділі дипломного проєкту запропоновано спосіб виготовлення куксоприймача. Підібрано матеріал для

друку, беручи до уваги технологічні можливості виробництва, та забезпечено подальший постоброблювальний етап.

Останній розділ дипломного проєкту відповідає за охорону праці. Розглянуто можливі небезпеки експлуатації виробничого обладнання. Запропоновано заходи для забезпечення санітарно-гігієнічних та безпечних для здоров'я людини умов праці.

Таким чином, реалізація такого проєкту дозволить створити експериментальну платформу для комплексної оцінки механічних і ергономічних властивостей протезних систем, оптимізації конструкції приймачів під різні типи ампутацій і матеріали, а також для валідації чисельних моделей методом скінченних елементів. Новизна роботи полягає в інтеграції багатоосевого навантаження з просторовим аналізом внутрішніх тисків, що відкриває можливість формування карт навантаження у часі та створення бази даних для подальшої оптимізації конструкцій куксоприймачів у напрямі підвищення комфорту та безпеки користувачів протезів.

Ключові слова: мехатронна система, гільза куксоприймача, п'єзорезистивні датчики Taidacent RXD 1016, пневматичні блейдери, пневматичне обладнання, автономна система, Arduino Mega, метод скінченних елементів, адитивні технології, охорона праці.

Abstract

The theme of diploma project is to create a laboratory setup designed to simulate real operating conditions for stump receivers for lower limb prostheses.

The installation should provide the reproduction of loads characteristic of standing and walking processes with the possibility of precise control and measurement of dynamic parameters. The main task is to study inner pressure and shear stress distribution in the stump receiver during axial loads, which will allow to assess the comfort and safety of the user, to detect local pressure peaks.

In the first part of the project were done an overview of amputation of the lower limbs of humans above the knee joint, the shapes of stump receiver sleeves, sensors for measuring physical indicators, their areas of application, the physical principle of operation, and methods of placement.

Chapter 2 is devoted to the development and calculations of mechatronic system. Piezoresistive sensors Taidacent RXD 1016 were placed at the limb-stub receiver interface. The material for pneumatic cushions with the condition of biocompatibility in accordance with international standards was selected and their strength characteristics were calculated. To provide the loads, the elements of the pneumatic system were calculated and selected. To ensure the autonomy of operation, the required volume capacity of the energy carriers was calculated. Since the system should measure data in real time and be mobile, electronic components were selected, an electronic diagram of their connection was drawn and the program code was written using the C++ language to upload it to the Arduino Mega microprocessor. The calculation and analysis of the attachment of the stub receiver sleeve to the tripod using finite element method was carried out, the most loaded method of attachment was identified.

Using the additive technology method, a method for manufacturing a stump receiver in the third section of the diploma thesis is proposed. The material for printing was chosen, taking into account the technological capabilities of production, and a further post-processing is provided.

The last section of the diploma project is responsible for labor protection. Possible dangers of operating production equipment are considered. Measures are provided to ensure sanitary, hygienic and safe working conditions for human health.

Thus, the implementation of such a project will allow creating an experimental platform for a comprehensive assessment of the mechanical and ergonomic properties of prosthetic systems, optimizing the design of receivers for different types of amputations and materials, as well as for validating numerical models using the finite element method. The novelty of the work lies in the integration of multiaxial loading with spatial analysis of internal pressures, which opens up the possibility of forming load maps over time and creating a database for further optimization of stump receiver design in the direction of increasing the comfort and safety of prosthesis users.

Key words: mechatronic system, stump receiver sleeve, piezoresistive sensors Taidacent RXD 1016, pneumatic bladders, pneumatic equipment, autonomous system, Arduino Mega, finite element method, additive technologies, occupational safety.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ВИДІВ КУКСОПРИЙМАЧІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК ПРИ ТРАНСФЕМОРАЛЬНІЙ АМПУТАЦІЇ. ОГЛЯД ДАТЧИКІВ ДЛЯ ЗНЯТТЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВАНТАЖЕННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ РОЗТАШУВАННЯ	8
1.1 Види ампутацій нижніх кінцівок вище колінного суглоба	8
1.2 Види куксоприймачів при трансфеморальній ампутації.....	11
1.2.1 Чотирикутна гільза	11
1.2.2 Гільза з ішіальним охопленням.....	12
1.2.3 Субішіальна гільза.....	13
1.2.4 MAS – гільза.....	14
1.2.5 Мільвокі-гільза.....	14
1.3 Типи датчиків для зняття навантаження та їх способи кріплення	15
1.3.1 Типи датчиків.....	15
1.3.2 Способи кріплення датчиків на куксоприймач	18
1.4 Висновок до оглядового розділу.....	21
1.5 Постановка задачі	21
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	23
2.1 Розташування датчиків на куксоприймачі.....	23
2.2 Відхилення розрахункових показників датчика.....	24
2.3 Розрахунок пневматичних блейдерів.	26
2.4 Розрахунок пневматичних показників та підбір пневматичного обладнання.	30
2.5 Підбір електронних компонентів та схема підключення до мікроконтролера.....	35
2.6 Розробка логіки роботи системи.....	39

					ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ					
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Дейлід						Літера	Лист	Листів
Перевір..		Семінська							5	81
Реценз.								КПІ ім. Сікорського НН ММІ		
Н. Контр.										
Затверд.										

2.6.1 Побудова блок-схеми	39
2.6.2 Програмування мікроконтролера Arduino	40
2.7 Розрахунок куксоприймача на міцнісні характеристики методом скінченних елементів.....	46
2.7.1 Побудова 3D моделі куксоприймача	46
2.7.2 Визначення матеріалу та побудова скінченних елементів.....	46
2.7.3 Застосування кінематичних та статичних граничних умов	48
2.7.4 Результати моделювання	49
2.8 Висновок до розрахункового розділу	50
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ	51
3.1 Завдання на розробку технологічного процесу	51
3.2 Вибір матеріалу.....	52
3.3 Розробка маршрутного технологічного процесу.....	52
3.4 Вибір друкуючого інструменту. Розрахунок режимів друку.....	56
3.5 Оснащення операції.....	56
3.6 Написання управляючої програми.....	57
3.7 Постобробка	59
3.8 Multi Jet Fusion – друк куксоприймачів.....	61
3.9 Висновки до технологічного розділу	63
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	65
4.1 Мікроклімат.....	65
4.2 Виробниче освітлення	66
4.3 Ураження електричним струмом	68
4.4 Навантаження органів зору	69
4.5 Пожежонебезпека	69
4.6 Висновок до розділу «Охорона праці».....	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	73

ВСТУП

У зв'язку із теперішньою ситуацією в Україні та світі проведення операційних втручань для ампутацій нижніх кінцівок стало дуже поширеним. Отриманні травми серед військових дуже часто трапляються через мінно-вибухову зброю, яка при детонації найбільший чинить вплив саме на ноги людини. Також однією із передумов ампутації є дорожні транспортні пригоди, де, базуючись на проведеному аналізі, у 43.2% випадків відбувалися операційні втручання [1]. Травми такого типу поставили під час реабілітації багато питань до коректного протезування та підбору необхідної форми куксоприймача.

Лише невелика кількість пацієнтів, а саме 43%, повідомляють про зручну форму гільзи [2]. Близько 25% опитуваних скаржаться на подразнення шкіри або біль через неправильно сформовану гільзу [2]. Іншим недоліком є час виготовлення. Метод гіпсового моделювання може займати близько 1 місяця через проходження етапів створення негативного та позитивного зліпків, ратифікації та виготовлення тестової і постійної гільзи, що може збільшити процес реабілітації та звикання до протеза.

Однак у зв'язку із автоматизацією процесів можливо скоротити час розробки гільзи, використовуючи п'єзорезистивні датчики, технології програмування мікроконтролерів у комбінації із пневматичними системами та 3д друком.

Розташування датчиків у точках максимального напруження дозволить створити геометрію куксоприймача, не використовуючи зліпки із гіпсу, а коректно розрахована ємність акумулятора у комбінації із технологіями зв'язку Bluetooth робить систему мобільною. Тобто під час виконання різних типів фізичних навантажень, наприклад, ходи або підйому сходами спеціаліст бачитиме на комп'ютері розподіл напружень у гільзі, що дозволить зробити модель найбільш зручною для користувача.

Таким чином, компанії зможуть ефективніше розподіляти власний час та швидше виготовляти продукцію, а пацієнти менше чекатимуть на бажаний куксоприймач та матимуть найбільш зручний виріб.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ВИДІВ КУКСОПРИЙМАЧІВ НИЖНІХ КІНЦІВОК ПРИ ТРАНСФЕМОРАЛЬНІЙ АМПУТАЦІЇ. ОГЛЯД ДАТЧИКІВ ДЛЯ ЗНЯТТЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВАНТАЖЕННЯ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХ РОЗТАШУВАННЯ

1.1 Види ампутацій нижніх кінцівок вище колінного суглоба

Після отримання травми внаслідок мінно-вибухової зброї або аварії у дорожньо-транспортних пригодах чи у зв'язку з цукровим діабетом пацієнти, звертаються до лікарів з важкими пораненнями або загостреннями хвороб нижніх кінцівок. У найскладніших випадках лікарі виконують ампутацію.

При ампутації нижніх кінцівок вище колінного суглоба існує декілька варіантів оперування:

1. екзартикуляція колінного суглоба – процес перетину м'яких тканин на рівні суглоба, при якому відбувається відокремлення кістки [3]. У такому випадку стегнова кістка залишається не ушкодженою, що забезпечує можливість більш комфортного торцевого навантаження всередині протезної гільзи, чим зменшується біль у куксі під час ходьби [4];
2. трансфеморальна ампутація – хірург розтинає стегнову кістку по її перпендикулярній вісі за допомогою осцилюючої пилки [5]. Під час проведення такого виду оперування лікар розсікає шкіру, щоб потім відділити та перев'язати нерви та кровоносні судини [5]. Для зменшення нейропатичного болю, нерви відсікаються у натязі для їх подальшого загоєння на відстані від кінця куksi [5];
3. екзартикуляція кульшового суглобу – це видалення всієї нижньої кінцівки шляхом пересічення кульшового суглоба [6]. Спеціаліст робить розріз по довжині передньолатеральної поверхні зовнішньої частини стегна, виконує розділення до рівня капсули кульшового суглоба, де головка стегнової кістки вивільняється [7]. Нерви, артерію та вену не препарують і уникають [7]. Лише після 2-3 тижнів терапії ураженого місця вакуумним апаратом рану згортають [7].

		Дейлід			ДПО1.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

У данному дипломному проєкті увага направлена на трансфеморальну ампутацію.

Трансфеморальна ампутація, яка продемонстрована на Рис. 1.1, поділяється на три підвиди відповідно до довжини кукси від великого верхнього вертлюга: коротка – менше ніж 7,62 см., середня – 7,62-20,32 см. та довга – більше за 20,32 см [8].



Рис. 1.1. Рівні ампутації нижньої кінцівки [6]

При виконанні даного виду оперування перед лікарем постає багато викликів, одним із яких є необхідність залишити як найбільш можливу частину кінцівки для подальшого протезування. Чим більша залишкова кінцівка, тим легше підвести протез та відповідно вирівняти його [9]. Також при довшій куксі покращується функціональна здатність пацієнта [9]. Існують випадки місцевої патології, через які необхідне виконання більшої ампутації, однак у таких ситуаціях невелику частину стегнової кістки на рівні вертлюга слід залишити [9]. Це дозволить покращити прилягання протеза, забезпечуючи додаткове контурування [9].

Через неправильні пропорції м'язових тканин після ампутації та зменшення кількості абдукторів, пацієнт стикається з ефектом відведення

залишкової кінцівки. Для збереження кінцівки у нормальному положенні залишковим абдукторам необхідно створювати більшу силу і споживати більшу кількість енергії [9].

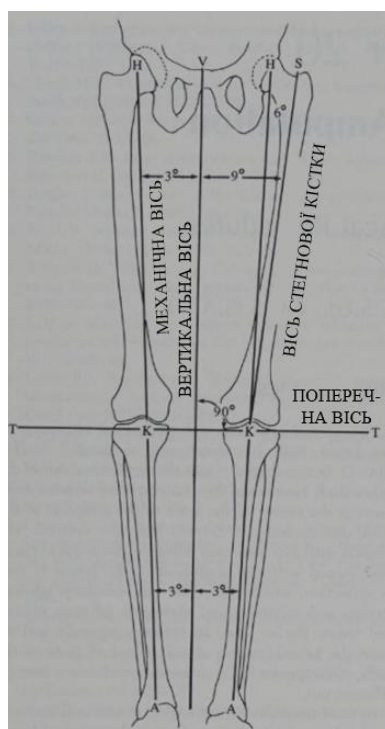


Рис. 1.2. Механічне та анатомічне розташування осей у нижніх кінцівках [10]

Головним фактором зниження м'язової сили є поєднання зниження маси м'язів через ампутацію з їх недостатньою механічною фіксацією, а також атрофією [11]. Тому задачею лікаря є створення максимально м'язово-збалансованої кукси із чутливими характеристиками.

Особливу увагу слід приділити догляду за залишковою кінцівкою, що можна робити за допомогою еластичних бинтів. Вони добре контролюють набряки і положення кінцівки, однак є громіздкими та не дають переваг у довгостроковій перспективі [9]. Іншим варіантом догляду є використання еластичного чохла з поясом на талії. Чохол може розтягуватися у один або два напрямки, а поясний ремінь запобігає його зісковзуванню [9].

Для зменшення болю після операції використовується невеликий за розмірами катетр, який дозволяє вводити анестетики безпосередньо у нерв [9]. Описана процедура виконується протягом 3-4 днів, а потім припиняється [9].

1.2 Види куксоприймачів при трансфеморальній ампутації

У зв'язку з великою кількістю різних випадків трансфеморальної ампутації нижніх кінцівок, на тепершній час існує декілька видів гільз: чотирикутна, з ішіальним охопленням, субішіальна, MAS, Мільвокі.

1.2.1 Чотирикутна гільза

Чотирикутна гільза була розроблена Чарльзом В. Редкліффом та командою дослідників із університету Берклі у Каліфорнії [12]. Головною її особливістю є чотири чітко виражені стінки із вузькими медіолатеральними розмірами.

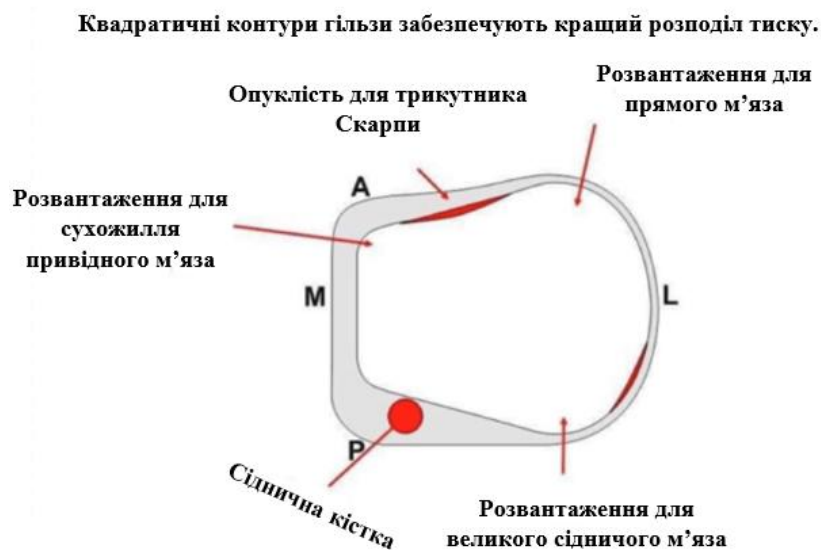


Рис. 1.3. Геометрична форма куксоприймача типу чотирикутна гільза [13]

Форма на Рис. 1.3 побудована для підтримки більшої частини тіла через сідничний бугор з додатковим гідростатичним навантаженням через сідничні м'язи [14]. Сили прикладаються до ділянок м'яких тканин, включаючи стегновий трикутник, який створює необхідну контрсилу для забезпечення положення сідничного бугра на сідничній полиці [14].

Незважаючи на те, що чотирикутна гільза є однією із перших конструкцій та вже існує її покращені версії, дану форму продовжують використовувати. Прикладом є ситуація пацієнтки із стрептококовим токсичним шоковим синдромом, яка перенесла велику кількість операцій, що призвело до надкороткої правої трансфеморальної ампутації [15]. Для реабілітації, враховуючи збережену силу м'язів стегна, замість протеза для дезартікуляції

кульшового суглобу обрали чотирикутну гільзу, а проблему із контактом шкіри та форми у зоні навантаження вирішили за допомогою тканинних гетр [15].

Також завдяки своїй формі гільза набула широкого застосування при розрахунку міцнісних характеристик методом скінченних елементів.

1.2.2 Гільза з ішіальним охопленням

Розроблена для вирішення проблем чотирикутної гільзи. У 1980-х роках вченим Іваном Лонгом було запропоновано концепцію лінії Лонга, за якої збільшувалося відведення стегнової кістки з метою розміщення відповідної мускулатури стегна у більш функціональному положенні для кращої стабілізації тазу, чим зменшуючи латеральний нахил тулуба пов'язаний з попереднім видом гільзи [16].

У подальших роботах ідею, запропоновану Іваном Лонгом, було розвинуто та досягнуто “Ефекту кісткового блокування”, який утримує стегнову кістку в приведенні та стабілізує її у западині за допомогою 3-точкової системи сил [17].



Рис. 1.4. Куксоприймач з ішіальним охопленням [18]

Однак, незважаючи на покращення у даній моделі, куксоприймач з ішіальним охопленням вважається незручним. Після проведеного тесту серед пацієнтів при носінні двох типів гільз з ішіальним охопленням та субішіального сокета у різних ситуаціях більше 80% учасників вирішили зберегти субішіальну гільзу для щоденного використання, оскільки вважали її кращою у всіх випадках

зі значними відмінностями під час сидіння на жорсткому стільці, в автомобілі та стояння [19].

1.2.3 Субішіальна гільза

Покращеним варіантом гільзи з ішіальним охопленням є субішіальна гільза.

Зазначену форму запровадив Райан Колдвел у партнерстві із Центром протезування та ортезування Північно-Західного університету [14].

Завдяки своїй формі куксоприймач утворює повний контакт із куксою через лайнер, який всебічно стискає та навантажує м'які тканини стегна [14]. Іншим характерним параметром є відсутність підтримки сідничного горба у порівнянні із гільзою з ішіальним охопленням, що дозволяє м'язам стегна вільно рухатися.

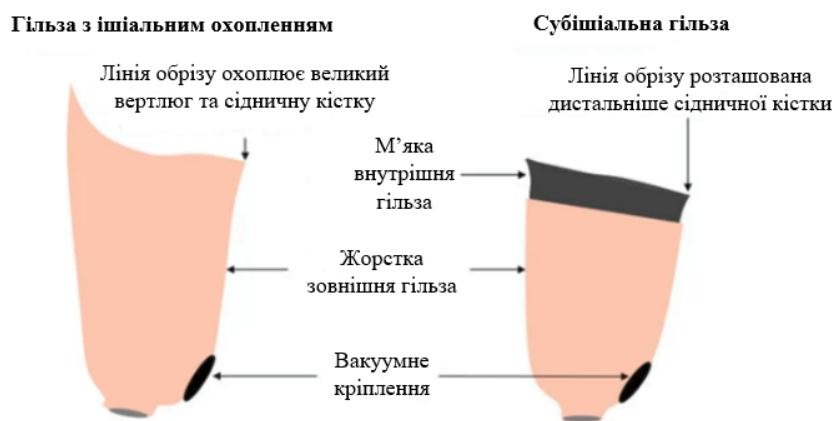


Рис. 1.5. Відмінність субішіальної гільзи від куксоприймача з ішіальним охопленням [19]

У 2021 році було проведено дослідження на ефективність використання системи вакуумного кріплення із субішіальною гільзою. Отримано наступні результати: у пацієнтів покращувалися пасивний діапазон рухів тазостегнового суглоба, відстань пройдена під час тесту, час виконання тесту “Встань та йди” та кінематичні і часові параметри, пов’язані з ходою, довжина махового кроку, тривалість подвійної опори, швидкість ходьби та пікове значення розгинання стегна під час фази опори для обох ніг [20].

1.2.4 MAS – гільза

“Марло анатомічна гільза” розроблена Марло Ортізом. Вважається варіацією гільзи з ішіальним охопленням. Вона посилено охоплює сідничу гілку з медіального боку чим дозволяє знизити передню, задню та медіальну лінію обрізки [14].

У даній гільзі проксимальна частина не розрахована на те, що вона буде єдиною точкою опори для ваги тіла, тому дизайн використовує квазігідростатичне навантаження через м'які тканини стегна [14].

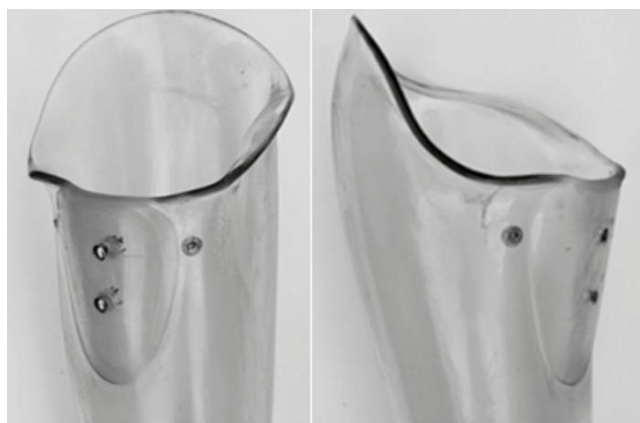


Рис. 1.6. MAS – гільза [21]

Також, через зміну геометрії процес створення кукосприймача має особливо контролюватися, оскільки невелике відхилення форми може спричинити дискомфорт пацієнту.

1.2.5 Мільвокі-гільза

Якщо порівняти дизайн MAS – гільзи з Мільвокі - сокетом, то у першому завдяки своїй формі фіксувалася сіднична гілка. При розробці Мільвокі - гільзи було отримано протилежні результати. Використовуючи динамічний рентгенівський стереограмметричний аналіз, виявлено, що верхня латеральна частина стінки гільзи не чинить позитивного впливу на стабільність протеза або навантаження м'язів [22]. Тому для ефективнішого використання гільзи латеральну частину стінки було видалено. Зазначалося також, що можна повністю відмовитися від кісткової підтримки, якщо у розрахунок включити розгиначі стегна, які напружуються при ударі п'ятою [22].



Рис. 1.7. Виконання Мільвокі-гільзи [23]

Рентген показав, що використання MAS – гільзи призводить до кульгавості Дюшена [22]. У Мільвокі-гільзі це явище вирішено за допомогою L-подібної направляючої структури збоку у задній частині [22].

1.3 Типи датчиків для зняття навантаження та їх способи кріплення

1.3.1 Типи датчиків

Вимірювання розрахункових параметрів для поставленої задачі, можливе за використання різних видів сенсорів: діафрагмових тензометричних, п'єзореzystивних або оптоволоконних з решіткою Брегга.

- Діафрагмові тензометричні сенсори

Датчики такого типу створені для вимірювання деформації, напруження тиску та сили у металах, пластиках та композитах [24]. Складаються вони із мембрани, яка змінює своє положення та форму залежно від прикладеної до неї сили, та тензорезистора, що знаходиться на внутрішній стороні мембрани та відповідає за процес вимірювання.

Розробка діафрагмових тензометричних сенсорів розпочалась у 1938 році, коли двоє вчених Артур С. Руге та Едвард Е. Сіммонс, працюючи у різних лабораторіях, винайшли базову технологію – наклеєний дротяний тензорезистор. Однак, незважаючи на вклад обох вчених, найбільше виділяють Артура С. Руге, оскільки він відіграв важливу роль у впровадженні великої кількості перетворювачів, що поклало основу до сучасних фольгових тензометричних датчиків тиску [25].

У основу роботи датчика покладено міст Уїтстона, який у базовому виконанні має 4 резистора та під'єднаний по формі ромба. Два протилежні кути *a* та *в* Рис. 1.8 підключаються до джерела збудження, а *б* та *г* необхідні для зчитування показників.

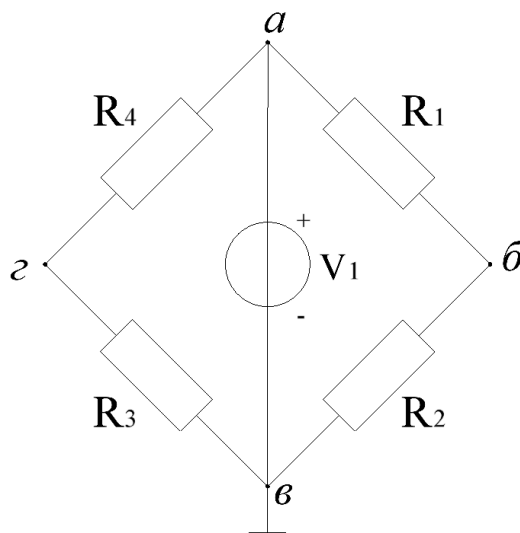


Рис. 1.8. Приклад виконання моста Уїтстона

Датчик показує вихідний сигнал через зміну опору власних резисторів. Працює він наступним чином: вхідна напруга до моста становить, наприклад, 15 вольт, коли чутливі елементи до тиску напружуються під тиском, то результуючі деформації змінюють свій опір і міст стає розбалансованим. Величину дисбалансу між гілками можна виміряти відповідними приладами.

Міст має багато переваг, однією з яких є повна температурна компенсація, яку можна досягти у широкому діапазоні температур [25].

Описана система робить тензометричні датчики поширеними у використанні у промисловій автоматизації, аерокосмічній галузі та біоінженерії.

- П'єзорезистивні сенсори

Даний тип сенсорів передбачає зміну опору електричного провідника через зміну його геометричних параметрів, спричинену зовнішнім подразником [26].

Винайдення п'єзорезистивного ефекту датується 1856 роком та пов'язано з лордом Кельвіном [26]. Пізніше у 1954 році було відкрито п'єзорезистивний ефект кремнію та германію. У поєднанні його із інтегральною схемою створили

перше покоління кремнієвих тензодатчиків. Винайдення згодом було впроваджено у робототехніку у якості тактильних датчиків, що посприяло появі нових класів матеріалів [26].

Резистивні елементи, які використовуються у такому типі датчиків, мають форму провідної гуми, еластомеру або провідного чорнила, чутливого до тиску [27]. Зміну опору таких елементів можна виміряти кількісно, тому вони потребують менше електроніки. Є також менш чутливими до шуму, що дозволяє добре працювати у сітчастих конфігураціях, оскільки немає сітчастих перешкод або взаємодії поля [27].

Головним недоліком таких пристроїв є похибки розрахунків, спричинені гістерезисом та дрейфом нуля.

П'єзорезистивні датчики використовуються у робототехніці у сенсорних системах. Також набули використання при вимірюванні людського тремору, що виникає при нейродегенеративних захворюваннях, та у імплантах і штучних суглобах для підвищення біосумісності [26].

- Оптоволоконні сенсори з решіткою Брегга

Датчики такого типу набули свого поширеного використання у багатьох галузях: біоінженрії, аерокосмічній промисловості, морському та цивільному будівництві та інших сферах. Технологію винайшов Кен Хілл у 1978 році у центрі дослідження комунікації у Канаді, що пізніше стало популярним у оптичних вимірюваннях через їх низьку вартість, компактний розмір, відповіді у режимі реального часу, високу точність, чутливість та стійкість до електромагнітних перешкод [28].

Решітки Брегга, що вбудовані у оптоволокно, відбивають певні довжини хвиль світла, падаючого на нього. Довжина відбитої хвилі відповідає відстані між решітками. Якщо довжина більша, то сигнал пропускається без впливу на елемент. Під час деформації такого сенсора відстань між датчиками змінюється, що призводить до виміру іншого діапазону сигналів.

При вимірюванні деформації згину на тонких компонентах при використанні описаного типу датчиків варто пам'ятати про похибку

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

вимірювання, якою не слід нехтувати, однак її можна компенсувати. Для цього використовується формула 1.1:

$$\varepsilon_{OF} = \frac{0,5h}{0,5h + d} \varepsilon_{Anz}, \quad (1.1)$$

де ε_{OF} – деформація на поверхні компонента, ε_{Anz} – деформація виміряна волокном, h – товщина компонента, d – відстань волокна від поверхні компонента.

Іншим недоліком є вплив зовнішніх чинників на розрахунок, наприклад, температури. Для її компенсації при вимірюванні напруження існує кілька методів, включаючи використання спеціального механічного корпусу або використання додаткового сенсора із решіткою Брегга [29].

1.3.2 Способи кріплення датчиків на куксоприймач

Існує декілька способів кріплення датчиків на куксоприймачі для подальшого заміру шуканих характеристик: у наскрізний отвір куксоприймача на зовнішній стінці гільзи, лише у отвір сокета на зовнішній стінці гільзи, у середину на внутрішню стінку лайнера або вбудовано у стінку гільзи.

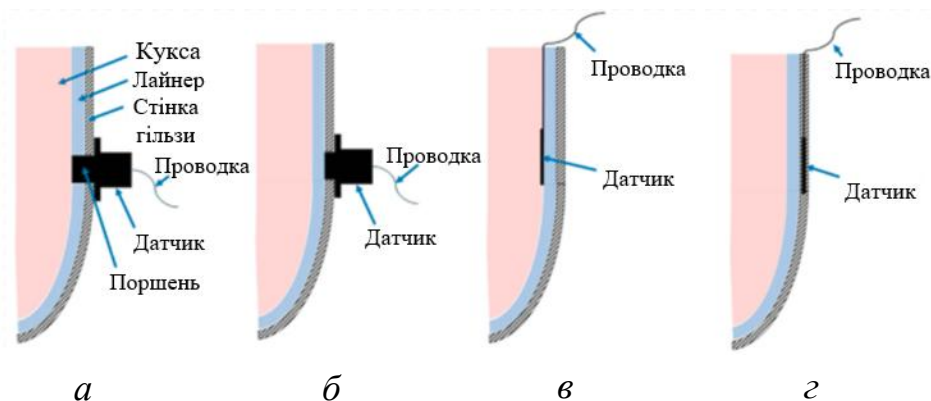


Рис. 1.9. Способи кріплення датчиків: *а* – у наскрізний отвір через стінку гільзи та лайнер, *б* – лише у отвір на стінці гільзи, *в* – на внутрішню стінку лайнера, *г* – вбудовано у стінку гільзи [30]

- Спосіб кріплення – у наскрізний отвір через стінку гільзи та лайнер.

Представлений метод вперше використаний у 1968 році для вимірювання тисків у трансфеморальних гільзах. Пристрій для вимірювання має форму циліндро-подібного корпусу, а найпоширенішим вимірювальним елементом є тензодатчик, що вбудований у прилад.

Датчик розміщується у просвердлений отвір циліндром у середину гільзи. Головною умовою для вимірювання розподілу тисків є правильне розташування: поршень має знаходитися в одній площині із внутрішньою поверхнею гільзи та бути перпендикулярно до неї, щоб передавати напруження залишкової кінцівки на чутливі елементи датчика [30].

Протягом останніх п'ятдесяти років багато дослідників застосували наскрізний спосіб монтування для вимірювання різних параметрів. Даний спосіб безсумнівно здатний вимірювати як нормальні, так і зсувні напруження з високою точністю та чутливістю [30]. Проте він має два недоліки. Розміщення датчиків вимагає модифікованої контрольної муфти з отворами, яка є трудомісткою і може змінити розподіл тиску на межі кінцівка-гільза [30]. Іншою проблемою є вага, яка зростає з додаванням кожного датчика у систему, що впливає на точність вимірювання та робить систему менш мобільною. Описані проблеми перешкоджають використанню такої технології у клінічних умовах.



Рис. 1.10. Датчик з плоскою діафрагмою для наскрізного монтування [31]

- Спосіб кріплення – у отвір на стінці гільзи.

Даний метод аналогічний першому, однак має невелику різницю: кінець поршня розташований в одній площині із внутрішньою поверхнею гільзи і не проникає у лайнер.

- Спосіб кріплення – на внутрішню стінку лайнера.

Спосіб кріплення датчиків, який представлений на Рис. 1.9 в, прибирає необхідність використання модифікованої гільзи з отворами. Малі розміри вимірюючих елементів дозволяють встановити їх між кінцівкою та лайнером або між лайнером та гільзою. При такому розташуванні можна використовувати

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

п'єзорезистивні, ємнісні, оптичні та тензодатчики [32]. Можливе застосування технології сенсорних килимків F-Socket, забезпечуючи кращий контроль за знімаючими параметрами. Однак датчики такого типу мають два недоліки: вони демонструють гістерезис та дрейф та можуть згинатися і виходити з ладу, впливаючи на точність вимірювання [30].



Рис. 1.11. Приклад - п'єзорезистивні датчики Taidacent RXD 1016 [33]

- Спосіб кріплення – вбудований у стінку гільзи

Кріплення такого типу розробляється вченими із центру прикладної біомеханіки при університеті Малайї, Малазія. Під час виготовлення протезу було проведено декілька спроб вбудувати датчик на основі волокон решітки Брегга у сокет [30].

Спосіб побудови: датчик затискається між двома шарами матеріалу перед впорскуванням смоляного матеріалу навколо позитивної форми залишкової кінцівки [30].

Через високу чутливість датчиків до динамічних навантажень, внутрішні деформації, отриманні під час дослідження, можна перетворити на значення тиску, використовуючи метод оберненої задачі. При способі кріплення у стінку гільзи використовуються датчики малих розмірів, що дозволяє їх мультиплексувати для збільшення області чутливої поверхні. Це не можна сказати про раніше описані датчики.

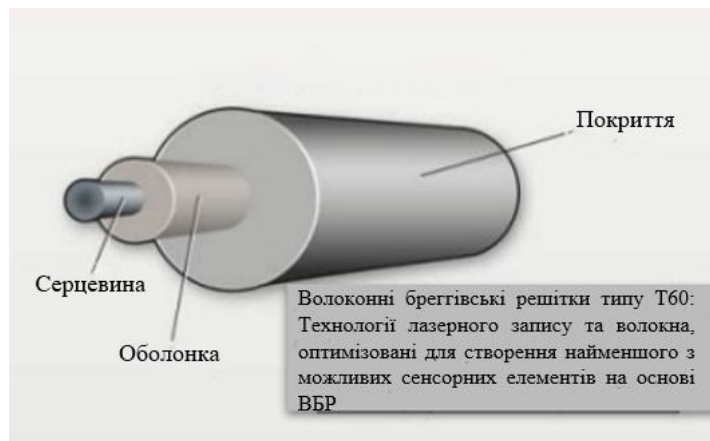


Рис. 1.12. Датчик Т-60 з волоконною решіткою Брега, який вбудований у волокно [34]

1.4 Висновок до оглядового розділу

У першому розділі дипломного проєкту розглянуто існуючі види куксоприймачів та їх особливості при трансфеморальній ампутації. Також розглянуто датчики для зняття навантаження різних видів, їх фізичні способи роботи і переваги та недоліки, спираючись на можливості кріплення на гільзі.

1.5 Постановка задачі

Під час написання даного дипломного проєкту буде розроблено мехатронну систему для задання та зняття значення навантаження у гільзі куксоприймача нижньої кінцівки людини. Для цього розроблятиметься автономна пневматична система, буде розташовано датчики для зчитування результатів навантаження та оброблено отримані дані з них за допомогою мікроконтролера.

Для ефективної роботи системи необхідно: коректно розташувати датчики для зняття навантаження у гільзі куксоприймача, у пневматичній системі розрахувати актуатори на міцнісні характеристики, визначити необхідний тиск, витрату у актуаторах та трубопроводах, підібрати елементи пневматичної системи, для автономної роботи – розрахувати об'єм акумулятора та скласти електричну схему підключення усіх компонентів системи, написати програмний код для її контролю та провести розрахунок гільзи куксоприймача на міцнісні характеристики методом скінченних елементів, враховуючи середньостатистичну вагу людини.

У розділі “Технологія машинобудування” необхідно методом адитивних технологій виготовити куксоприймач, підібрати верстат, обрати матеріал відповідно до технологічних можливостей виробництва та економічної доцільності, обрати найефективніший спосіб виготовлення та забезпечити етап постобробки виробу із підбором обладнання.

Розділ “Охорона праці” передбачає проведення аналізу наступних небезпек при експлуатації обладнання: мікроклімат, виробниче освітлення, ураження електричним струмом, навантаження органів зору, пожежонебезпека. Необхідно розробити рекомендації для захисту працівників під час виробництва, передбачити організаційні та технічні заходи з охорони праці відповідно до чинних нормативних документів.

Використовуючи результати чотирьох розділів, дипломний проєкт передбачатиме комплексне рішення для розробки, проектування та програмування мехатронної системи та виготовлення деяких елементів у ній для задання та визначення розподілу напруження у гільзі куксоприймача нижньої кінцівки людини, беручи до уваги рекомендації для забезпечення здоров'я працівників.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

2.1 Розташування датчиків на куксоприймачі

Після хірургічного втручання та проведення трансфеморальної ампутації пацієнту необхідно достатньо великий проміжок часу, щоб звикнути до протезу. Саме тому перед формою кукси постають багато викликів.

Правильно підібрана форма кукси спрощує процес реабілітації та подальше використання протезу, попереджує виникнення різних захворювань шкіри та можливість повторної ампутації через неправильні розподіли тисків у протезі. Для створення правильної геометрії важливо знати показники на найбільш навантажених місцях куксоприймача, що можливо за допомогою коректного встановлення п'єзорезистивних датчиків Taidacent RXD 1016. Їх розташування впливає на передачу дотичних та нормальних напружень та зменшує втручання у контактні зони між куксою та куксоприймачем [36].

Куксу можна поділити на чотири квадранти: передній, задній, медіальний та латеральний (Рис. 2.1). П'єзорезистивні датчики розставлені на середніх лініях стінок гільзи у три ряди по зазначених квадрантах. Ряди датчиків знаходиться на відстані 25 мм дистально від медіального краю гільзи, на 50 мм проксимально від дистального кінця культи, а також на площині, що знаходиться еквідистантно відповідно двом опорним площинам [37], охоплюючи проксимальну та дистальну частину кукси та чотири квадранти. Вище проксимальної площини розташовано два датчики на передній і латеральній середніх лініях [37].

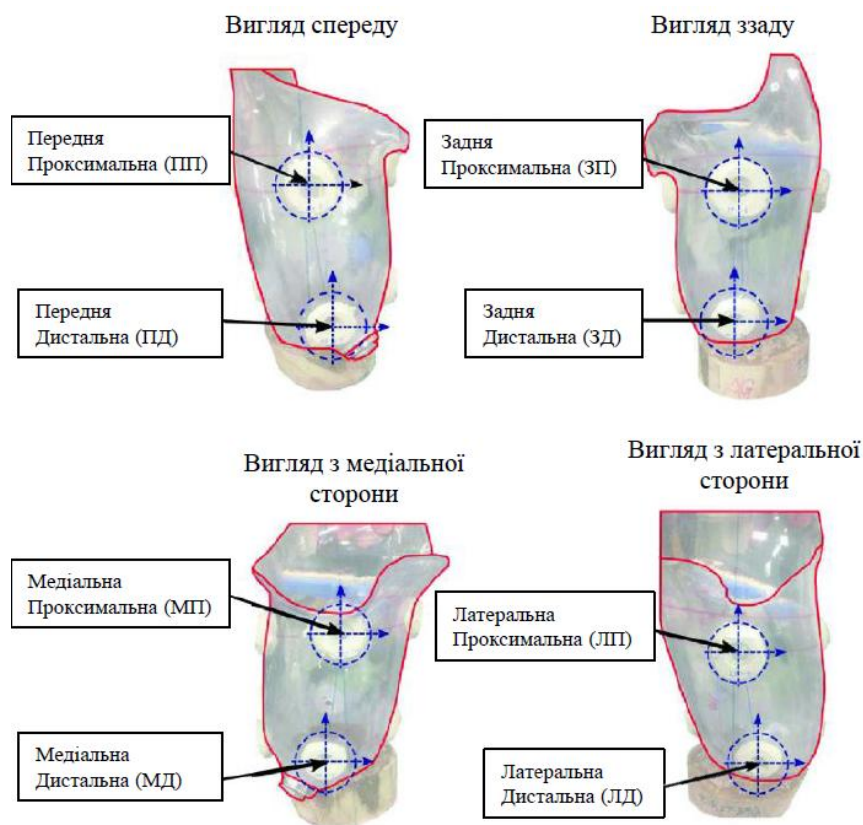


Рис. 2.1. Поділ куксоприймача для трансфеморальної ампутації на квадранти для подальшого встановлення датчиків Taidacent RXD 1016 з різних видів [38]

Також у критичній зоні: сідничий горб поставлено датчик. Важливість названої додаткової точки заміру полягає у функціональних властивостях протеза. Зона сідничого горба є опорною точкою пацієнта при положенні сидячи. При занадто високому тиску у цій зоні пацієнт відчуватиме біль, проте мале навантаження є наслідком поганої фіксації гільзи [35].

Таким чином, на куксоприймач типу чотирикутна гільза встановлено п'ятнадцять датчиків. Зазначена кількість є необхідною для коректного визначення тисків, що дозволяє не тільки побачити карту напружень та внести геометричні зміни при проектуванні протезу, а й оцінити комфорт і безпеку користувача.

2.2 Відхилення розрахункових показників датчика

Перед встановленням датчика необхідно розрахувати зазначений компонент на показники відхилення. До показників, що потребують оцінки у п'єзорезистивного датчика Taidacent RXD 1016 належать: гістеризис, дрейф нуля, похибка повторюваності та похибка апроксимації. Кожен з перелічених

параметрів впливає на точність розрахунків та має бути прийнятий до уваги на етапі проектування та при подальшій експлуатації.

Після проведення серії випробувань, результати експериментального дослідження роботи датчиків показані на Рис. 2.2:

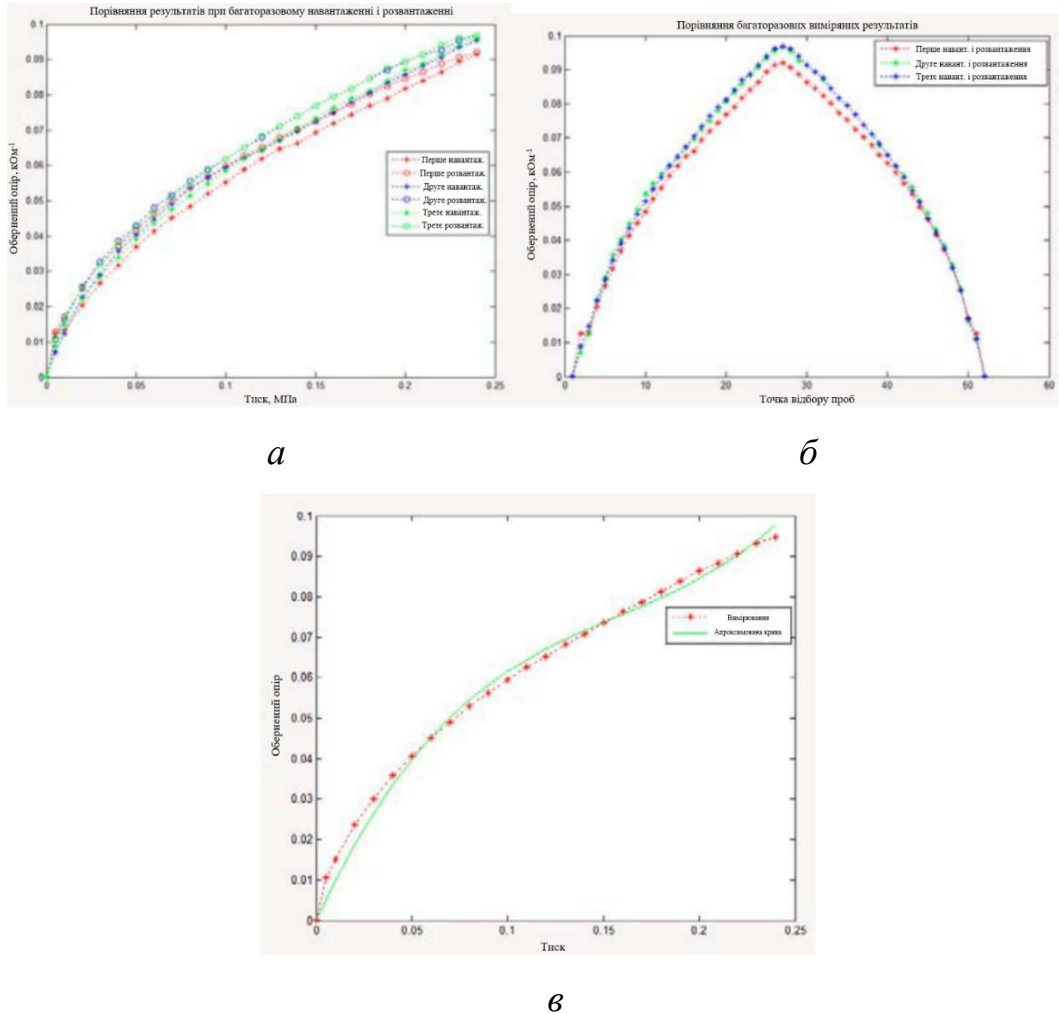


Рис. 2.2. Експериментальні криві: *а* – гістерезис, *б* – помилка повторення, *в* – робоча крива [39]

Графіки представляють нелінійну залежність між тиском та оберненою величиною опору. Коли тиск рівний 0, опір прямує до нескінченності. Також незбіжність графіків навантаження та розвантаження є наслідком гістерезису датчика. Відповідно до результатів – у датчика наявна похибка повторюваності [39].

Похибка апроксимації δ_L визначається за формулою, яка наведена у [39]:

$$\delta_L = \frac{\Delta L_{max}}{Y_{FS}} \cdot 100\% = 5,53\%,$$

де ΔL_{max} – максимальне відхилення між калібрувальною кривою та робочою кривою, Y_{FS} – вихідний сигнал повної шкали датчика становить $(X_K - X_1) \cdot b$.

Дрейф нуля D_0 відповідно до формули, наведеної у [39], становить:

$$D_0 = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{FS}} \cdot 100\% = \frac{0,000163 - 0,000054}{0,09766} \cdot 100\% = 0,11\%,$$

де Y_{max} – максимальне значення нульового вихідного сигналу, Y_{min} – мінімальне значення нульового вихідного сигналу.

Помилка гістерезису δ_H розраховується за формулою із [39]:

$$\delta_H = \frac{\Delta H_{max}}{Y_{FS}} \cdot 100\% = 4,20\%,$$

де ΔH_{max} – максимальна різниця між калібрувальними кривими розвантаження та навантаження, Y_{FS} – вихідний сигнал повної шкали датчика.

Помилка повторюваності δ_R відповідно до формули у [39] становить:

$$\delta_R = \frac{t_{0,95} S_{max}}{Y_{FS}} \cdot 100\% = 10,57\%,$$

де S_{max} – максимальне значення стандартного відхилення підвибірок калібрувальних даних прямого та зворотного ходу, $t_{0,95}$ – коефіцієнт t-розподілу з довірчим фактором 95%.

2.3 Розрахунок пневматичних блейдерів.

Для задання навантаження у куксоприймачі у зоні розставлення датчиків застосуємо пневматичні блейдери, що мають форму подушки [40].



Рис. 2.3. Приклад пневматичного блейдера [40]

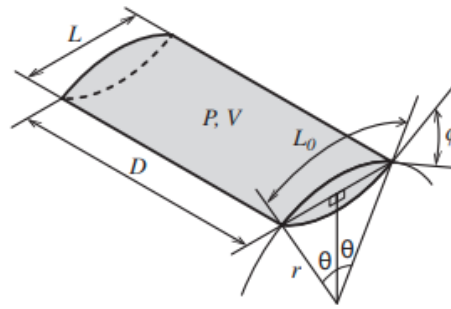


Рис. 2.4. Геометричні позначення пневматичного актуатора [41]

Геометричні параметри робочі частини подушки наступні: $L = 50$ мм, $D = 215$ мм, переріз одного листа подушки – 1 мм. Для розрахунку вільного об'єму подушки застосуємо формулу 2.1, яка наведена у [41]:

$$V(\theta) = AD = \frac{L_0^2 D}{2} \left(\frac{\theta - \cos \theta \sin \theta}{\theta^2} \right), \quad (2.1)$$

де A – площа поперечного перерізу блейдера, D – ширина блейдера, L_0 – початкова довжина, θ – центральний кут кругового сегменту [41].

Початкову довжину знаходимо за формулою 2.2. Її представлено у [41]:

$$L_0 = 2r\theta, \quad (2.2)$$

де r – радіус кривизни мембрани [41], прийmemo $r = 35$ мм.

Центральний кут кругового сегменту розраховується по формулі 2.3. Вона наведена з [41]:

$$r \sin \theta = \frac{L}{2} \rightarrow \sin \theta = \frac{L}{2r}, \quad (2.3)$$

де L – довжина подушки.

Тобто,

$$\sin \theta = \frac{50}{2 \cdot 35} = 0,714 \rightarrow \theta = \arcsin(\theta) = 0,796,$$

$$L_0 = 2r\theta = 2 \cdot 35 \cdot 0,796 = 55,692,$$

$$V(\theta) = \frac{55,692^2 \cdot 215}{2} \left(\frac{0,796 - \cos(0,796) \cdot \sin(0,796)}{0,796^2} \right) = 155763,71 \text{ мм}^3 = \\ = 155,76 \text{ мл} = 1,558 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

Розрахований об'єм необхідний для подушки здатної прикладати навантаження у чотирьох секціях гільзи. Для розрахунку об'єму актуатора на 3

секції використано аналогічну методику та отримано об'єм 115,92 мл. Для актуатора на одну ділянку – 36,22 мл.

Розрахунок блейдера на міцність та максимальний тиск.

Перед використанням пневматичної подушки необхідно визначити максимально можливе навантаження, яке можна прикласти до розрахункового об'єкта.

Оскільки матеріал подушки має бути достатньо гнучким, здатним до циклічних навантажень та не втрачати жорсткість, для такого завдання обрано термопластичний поліуретан 95А. Його головною особливістю був критерій біосумісності, який підтверджено відповідно до стандартів ISO 10993-5 та ISO 10993-10 [42]. Матеріал можливо використовувати для 3Д друку, що надає йому наступні механічні характеристики

Табл. 2.1. Механічні характеристика термопластичного поліуретан 95А [42]

Напрямок друку	Стандарт	XY	XZ	ZX
		Лежачи	На ребрі	Вертикально
Напруження при 50 % видовження	ISO 527	8,3 МПа	-	7,9 МПа
Напруження при 100 % видовження	ISO 527	10,5 МПа	-	9,9 МПа
Напруження при 300 % видовження	ISO 527	20,3 МПа	-	-
Напруження при розриві	ISO 527	44,2 МПа	-	12,2 МПа

Для знаходження максимально можливого навантаження використаємо формулу 2.4, наведену з [43]:

$$\sigma_{max} = \left| \frac{N_{max}}{F} \right| \leq [\sigma], \quad (2.4)$$

де σ_{max} – максимальні напруження матеріалу, N_{max} – максимальна сила, яка прикладена до об'єкту, F – площа перерізу вимірюваного об'єкту, $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу.

Розраховуючи об'єкт на втрату жорсткості, необхідно за допустиме напруження приймати значення напруження при 50% видовження, яке для обраного матеріалу становить 7,9 МПа при вертикальному друці як найслабшому випадку [42]. Для спрощення розрахунків матеріал приймаємо ізотропним.

Площа поперечного перерізу одного листа матеріалу становить:

$$F = a \cdot b = 50 \cdot 1 = 50 \text{ мм}^2.$$

Розраховуємо максимально можливе навантаження для порахованого перерізу:

$$N_{max} = [\sigma] \cdot F = 7,9 \cdot 50 = 395 \text{ Н.}$$

Відповідно максимальний тиск, який може забезпечити пневматична подушка, становить 7,9 МПа.

Також важливим компонентом є шов. Необхідність його розрахунку пов'язана з визначеннями критично можливого навантаження до моменту руйнування з'єднання. Одними із параметрів міцності, на які розраховується склеєний шов, є розтяг, зсув та опір розповсюдження розриву [44].

При поданні стиснутого повітря у блейдер, розрахунковий компонент чинитиме опір відшаруванню, навантажуючи клейове з'єднання.

Опір розповсюдження розриву – це середнє навантаження на одиницю ширини лінії з'єднання, необхідне для поступового відділення гнучкого елемента від жорсткого елемента або іншого гнучкого елемента [45]. Математичний запис наведений за допомогою формули 2.5:

$$P_m = \frac{F_c}{b} \leq [P_m], \quad (2.5)$$

де P_m – опір розповсюдження розриву, $\frac{H}{\text{мм}}$, F_c - середнє навантаження, Н, b - одиниця ширини лінії з'єднання, мм, $[P_m]$ – допустимий опір розповсюдження розриву.

Для спрощення розрахунків вважатимемо, що відшарування відбувається за Т-подібним принципом, тобто сила діє перпендикулярно до склеєного шву (Рис. 2.5).



Рис. 2.5. Приклад проведення тесту відшарування Т-подібної форми [45]

За адгезивний матеріал приймаємо NuSil MED-2000, як біосумісний клей, що пройшов сертифікацію ISO 10993-5 та може бути застосований в галузі медичного обладнання [46]. Допустимий опір розповсюдження розриву становить $14,1 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$ [46].

Підставляючи дані у формулу, знаходимо максимальну силу, яку витримає склеєний шов

$$F_c = [P_m] \cdot b = 14,1 \cdot 50 = 705 \text{ Н} \approx 70,5 \text{ кг.}$$

2.4 Розрахунок пневматичних показників та підбір пневматичного обладнання.

Для подальшого підбору пневматичного обладнання необхідно розрахувати об'ємну витрату повітря, що застосовується для приведення актуаторів у дію. Відповідно до вище наведених розрахунків, актуатори вміщують $1,558 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, $1,159 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ та $3,622 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ повітря. Маючи по 2 подушки довжиною 215 та 160 мм. та одну подушку на 50 мм., їх сумарний об'єм становитиме $5,796 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ або 579,6 мл. Приймаємо, що блейдер приводитиметься у дію за 10 секунд. Таким чином об'ємна витрата повітря рахується за формулою 2.6:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.6)$$

де V – загальний об’єм системи, м^3 ; t – час наповнення актуатора, с.

Отже:

$$Q = \frac{5,796 \cdot 10^{-4}}{10} = 5,796 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 3,477 \frac{\text{л}}{\text{хв}}.$$

Обираючи для задач проєкту компактний компресор, який має бути мобільний та мати високі нагнітальні характеристики, вибір припадає на мікропоршнєві компресори. Також до уваги приймалися електричні характеристики компресора, які розраховані у подальшому пункті дипломного проєкту.

Найкращим компресором відповідно до названих параметрів та проведених розрахунків є D40P-BL4. Згідно до технічних характеристик він має наступні параметри:

Табл. 2.2. Технічні характеристики компресора D40P-BL4 [47]

Параметр	Значення
Максимальна витрата, л/хв	12
Максимальна середня витрата, л/хв	6
Максимальний тиск, кПа	≥ 500
Максимальний вакуум, кПа	≥ 70
Вага, гр	≈ 575
Напруга, В	24
Тип струму	Постійний струм
Максимальний струм, мА	≤ 1
Габаритні розміри, мм	$108 \times 46 \times 99$
Швидкороз’ємний цанговий фітинг, мм	8; 6
Внутрішня різьба	Rp1/8, NPT1/8

Оскільки обраний компресор може працювати у двох режимах: як компресор і як вакуумний насос, тому він має два фітинги для трубопроводів. Для роботи приладу у варіанті нагнітання повітря у систему на вихід підключено трубопровід, а до його входу підключений глушник АМТЕ-М-Н-G18, який виконує роль фільтра для захисту тефлонових ущільнень компресора від пилу та твердих частинок.

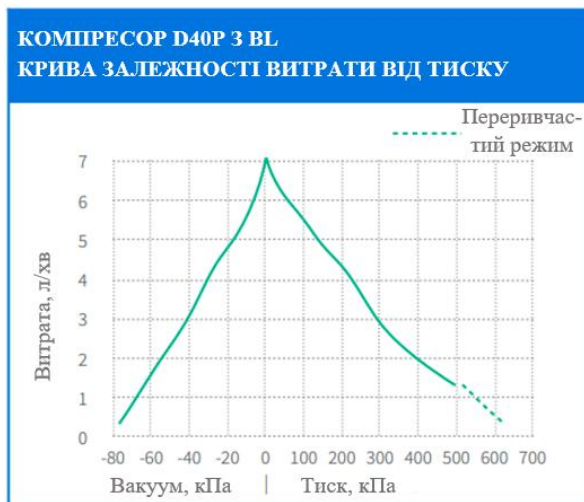


Рис. 2.6. Витратна характеристика мікро-поршневого компресора D40P-BL4 [47]

На Рис. 2.6. продемонстрована залежність витрати від тиску для обраного компресора. При витраті у $3,477 \frac{\text{л}}{\text{хв}}$ компресор подає у систему повітря під тиском 2,6 бар, що задовольняє умови проєкту.

Враховуючи зовнішній діаметр пневматичного трубопроводу 6 мм, а внутрішній – 4 мм та пораховану об'ємну витрату, середню швидкість потоку, можна визначити за формулою 2.7:

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q_T}{A} = \frac{Q_T}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4Q_T}{\pi d^2}, \quad (2.7)$$

де A – площа внутрішнього діаметру трубопроводу, м.

Отже:

$$v_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot 5,796 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,004^2} = 4,612.$$

Оскільки пневматичні актуатори кріпляться до внутрішньої сторони куксоприймача, то з'єднувальні трубопроводи мають бути малих розмірів, щоб не заважати користувачу при проведенні дослідження. Тому за допомогою фітингу QS-1/8-4 зменшено зовнішній діаметр трубопроводу до 4 мм. Внутрішній діаметр становить 2,6 мм.

При зменшеному діаметрі визначаємо дійсну швидкість потоку:

$$v_p = \frac{4 \cdot Q_T}{\pi \cdot d_T^2} = \frac{4 \cdot 5,796 \cdot 10^{-5}}{3,1415 \cdot 0,0026^2} = 10,916 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Зменшення внутрішнього діаметру впливає на втрату тиску у трубопроводі на тертя. Для розрахунку даного показника скористаємося формулою 2.8 із [48]:

$$\Delta p = f \frac{L}{d} \frac{\rho v^2}{2}, \quad (2.8)$$

де d – внутрішній діаметр трубопроводу, Δp – втрати на тертя, f – коефіцієнт тертя, v – дійсна швидкість руху рідини, L – довжина трубопроводу, ρ – густина.

Густину повітря розраховуємо за рівнянням ідеального газу, використовуючи формулу 2.9, оскільки стандартне значення для розрахунків пораховане для тиску 1 атм [48]:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \rightarrow \rho = \frac{p}{R \cdot T}, \quad (2.9)$$

де R – газова стала $287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ [48], T – абсолютна температура 293,15 К.

Отже:

$$\rho = \frac{260000}{287 \cdot 293,15} = 3,09 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Щоб обчислити значення коефіцієнту тертя, необхідно спочатку розрахувати число Рейнольдса. Це можна зробити використавши формулу 2.10, яка наведена у [49]

$$Re = \frac{v_p \cdot d_T}{\nu}, \quad (2.10)$$

де ν - кінематична в'язкість повітря.

Кінематичну в'язкість повітря розраховуємо за формулою 2.11 із [48]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.11)$$

де μ – динамічна в'язкість $1,80 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$ [48].

$$\nu = \frac{1,80 \cdot 10^{-5}}{3,09} = 5,825 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{10,916 \cdot 0,0026}{5,825 \cdot 10^{-6}} = 4872,842.$$

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Порівнюючи отримане число Рейнольдса зі стандартно прийнятим критичним значенням для оцінки режиму потоку $Re = 2300$ [48], як межі переходу від ламінарної до турбулентної течії, можна зробити висновок, що потік має характеристики перехідного потоку у турбулентний режим [48].

Оскільки число Рейнольдса більше за 4000, як критичної межі перехідного потоку, то для розрахунку коефіцієнта тертя λ скористаємося формулою 2.12 – формулою Блаузіуса [48]:

$$f = 0,316 Re_d^{-\frac{1}{4}}. \quad (2.12)$$

Отже

$$f = 0,316 \cdot 4872,842^{-\frac{1}{4}} = 0,038.$$

Приймаємо довжину трубопроводу 0,5 м. Таким чином втрати тиску у трубопроводі на тертя становитимуть

$$\Delta p = 0,038 \frac{0,5}{0,0026} \frac{3,09 \cdot 10,916^2}{2} = 1339,274 \text{ Па}.$$

Таким чином, при подачі тиску 0,26 МПа, справжнє значення тиску у блейдерах становитиме 0,2587 МПа.

Для регулювання потоку повітря обираємо пневматичний клапан S070 B-5DG, як компактний та легкий 2/3 соленоїд. Його технічні характеристики наступні:

Табл. 2.3. Технічні характеристики пневматичного клапана S070 B-5DG [50]

Напруга живлення, В	24
Тип струму	Постійний
Сила струму, мА	20
Потужність, Вт	0,5
Максимальний робочий тиск, МПа	0,5
Максимальна витрата, л/хв	9,6
Тип входного, вихідного з'єднання	M3x0,5
Тип клапану	2/3
Вага, г	5
Розміри, мм	33,5×18×21,5

Щоб під'єднати клапан до труби із зовнішнім діаметром 4 мм, використаємо перехідник QSM-M3-4.

Отвір клапана для скидання повітря у атмосферу заглушено глушником AMTE-M-LH-M3.

Для підготовки повітря використовується блок AW20-01BG-A, який включає фільтр-вологівідділювач, редукційний клапан та манометр. Щоб зберігати повітря, використано ресивер VBAT05A1-R.

Оскільки в системі використані пневматичні подушки, які виготовляються із термопластичного полімера, тому необхідно контролювати тиск та швидкість потоку повітря, що подається до них. Це можливо за допомогою редукційного клапана ARJ1020F-M5-04 та пневматичного дроселя AS1000-M3. Щоб актуатори могли швидко скинути повітря у атмосферу, біля кожної подушки використаний клапан швидкого скидання тиску AQ240F-04-00.

Також у системі використано пластикові цангові фітинги QSMY-4 для з'єднання трубопроводів.

2.5 Підбір електронних компонентів та схема підключення до мікроконтролера

Для зняття напруження на куксоприймачі застосовано п'єзорезистивні датчики Taidacent RXD 1016 з діапазоном вимірювання у 100 кілограмів. Площа вимірювання датчика становить 314 мм², а його невелика товщина у 0,24 мм дозволяє використати наступну техніку встановлення – на стінку лайнера приймальної гільзи [30]. Датчик використовує аналогові виходи.

Оскільки для контролю тиску, як було визначено раніше, необхідно 15 датчиків RXD 1016, тому використано мікроконтролер Arduino Mega 2560 Rev3 з 16-ма аналоговими входами, 54-ма цифровими входами/виходами, робочою напругою 5В від комп'ютера та 7-12В від блока живлення, батарейок чи акумулятора [51].

Система зняття навантаження має бути мобільною та автономною, через що виникає необхідність у максимально коротких довжинах кабелів як для живлення системи, так і для кабелів зв'язку між контролером та датчиками. Для

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

передачі даних від мікроконтролера до комп'ютера встановлений Bluetooth модуль HC-06, напруга живлення якого становить 5В. А для живлення повної системи необхідні акумулятори, які розраховані наступним чином:

1. Складаємо таблицю споживання струмів.

Табл. 2.4. Споживання струму обладнанням

Пристрій	Споживаний струм, мА
Arduino Mega 2560 Rev3	50
Модуль Bluetooth HC-06	19,8
Конвертер DC-DC LM2596S	6
Компресор D40P-BL4	1
Клапан S070 B-5DG	20

2. Розраховуємо сумарний споживаний струм для першої частини системи.

$$I_{\text{повне}} = I_1 + I_2 + I_3 = 50 + 19,8 + 6 = 75,8 \text{ мА},$$

де I_1 – струм від Arduino Mega 2560 Rev3, I_2 – струм від модуля Bluetooth HC-06, I_3 – струм від конвертера DC-DC LM2596S.

3. Підбираємо напругу акумулятора.

Обраний мікроконтролер працює в межах 7 - 12 В, тому для забезпечення безперебійного живлення з'єднаємо послідовно два Li-іон акумулятора по 3,7 В. Таким чином, відповідно до закону Ома:

$$U_{\text{повне}} = U_1 + U_2 = 3,7 + 3,7 = 7,4 \text{ В},$$

де U_1, U_2 – напруга Li-іон акумулятора.

4. Розрахунок ємності акумулятора.

Розрахунок ємності акумулятора проводимо за наступною формулою

$$C = \frac{I_{\text{повне}} \cdot T}{\eta} = \frac{75,8 \cdot 10}{0,8} = 947,5 \text{ мА} \cdot \text{год},$$

де T – час роботи акумулятора в годинах, η – максимальна глибина розряду Li-іон акумулятора.

5. Забезпечення стабільності живлення.

Стабільність живлення забезпечується імпульсним понижуючим перетворювачем напруги на базі LM2596S. Вхідна напруга у діапазоні 4,5-

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

40 В, а вихідна 3-35 В. Має виконуватися наступна умова – напруга на вході повинна бути не менше ніж на 1,5 В вище ніж вихідна [32].

$$U_{\text{повне}} - 1,5 = 7,4 - 1,5 = 5,9 \text{ В.}$$

Для підключення і забезпечення роботи обраного клапана та компресора проводимо розрахунок акумулятора та споживаного значення струму із регульованим підвищуючим перетворювачем МТ3608 для другої частини системи.

1. Розраховуємо сумарний споживаний струм.

$$I_{\text{повне}} = I_1 + I_2 = 1 + 20 = 21 \text{ мА,}$$

де I_1 – струм компресор D40P-BL4, I_2 – струм клапан S070 B-5DG.

Необхідна потужність для забезпечення на виході із МТ3608:

$$P_{\text{вих}} = U_{\text{вих}} \cdot I_{\text{повне}} = 24 \cdot 0,021 = 0,504 \text{ Вт.}$$

2. Потужність на вході:

$$P_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{вих}}}{\eta} = \frac{0,504}{0,93} = 0,542 \text{ Вт,}$$

де η – ККД регульованого підвищуючого перетворювача МТ3608.

3. Спожитий струм від акумулятора:

$$I_{\text{спож}} = \frac{P_{\text{вх}}}{U_{\text{акум}}} = \frac{0,542}{3,7} = 0,146 \text{ А,}$$

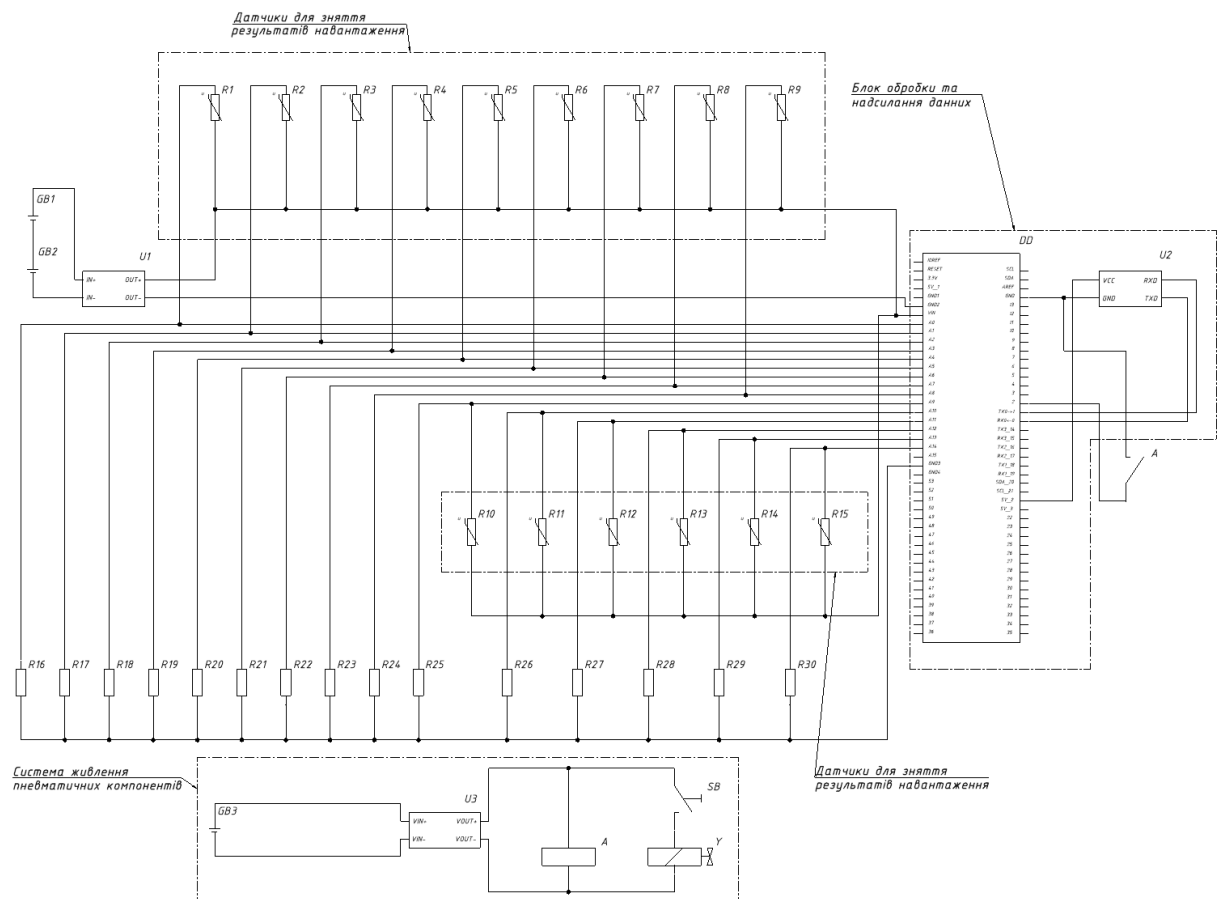
де $U_{\text{акум}}$ – номінальна напруга акумулятора.

Необхідна ємність акумулятора становить:

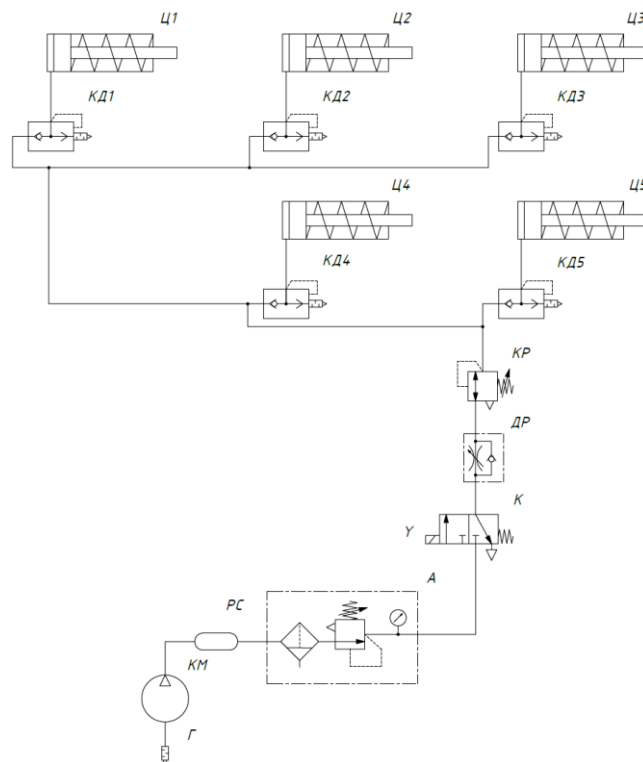
$$C = \frac{I_{\text{спож}} \cdot T}{\eta} = \frac{146 \cdot 10}{0,8} = 1825 \text{ мА} \cdot \text{год.}$$

Додатково у систему під'єднана кнопка для керування пневматичним клапаном.

Збираємо електронну схему у програмному пакеті NI Multisim та пневматичну схему у SolidWorks:



a



б

Рис. 2.7. Схеми підключення компонентів: *a* – електронна та електрорелейна, *б* – пневматична

Оскільки компресор регульований, він підключений до цифрового виходу 2 від Arduino Mega 2560 Rev3. Обраний вихід може генерувати ШІМ сигнал, що дає можливість контролювати подачу компресора.

2.6 Розробка логіки роботи системи

2.6.1 Побудова блок-схеми

Для опису роботи системи та послідовності її функціонування побудовано блок схему на Рис. 2.8. Мехатронна система працює у наступній послідовності:

1. У програмному коді оголошуються змінні для зчитування, зберігання та проведення математичних розрахунків.
2. Прописується змінна для подальшого підключення компресора.
3. Призначається необхідна швидкість передачі даних.
4. Налаштовується робота контакта для підключення компресора.
5. Задається потужність роботи компресора.
6. Відбувається зчитування даних із підключених 15 датчиків та зберігання їх результатів.
7. Сигнал, отриманий від датчика № 1 конвертується у мілівольти.
8. Для датчика № 1 проводиться розрахунок таких фізичних параметрів як опір, провідність та сила у представленій послідовності із відповідними записами пояснень та надсиленням значень на модуль HC-06 для їх подальшої передачі на комп'ютер.
9. Процес від вказання пояснення після зчитування сигналів від аналогових виходів до розрахунку сили та надсилення значень на блютуз модуль повторюється 15 разів послідовно для кожного датчика.
10. У кінці програми присутня технологічна пауза роботи системи на визначений час.

Таким чином, програма оброблюватиме данні за представленим технологічним процесом без зупинки.

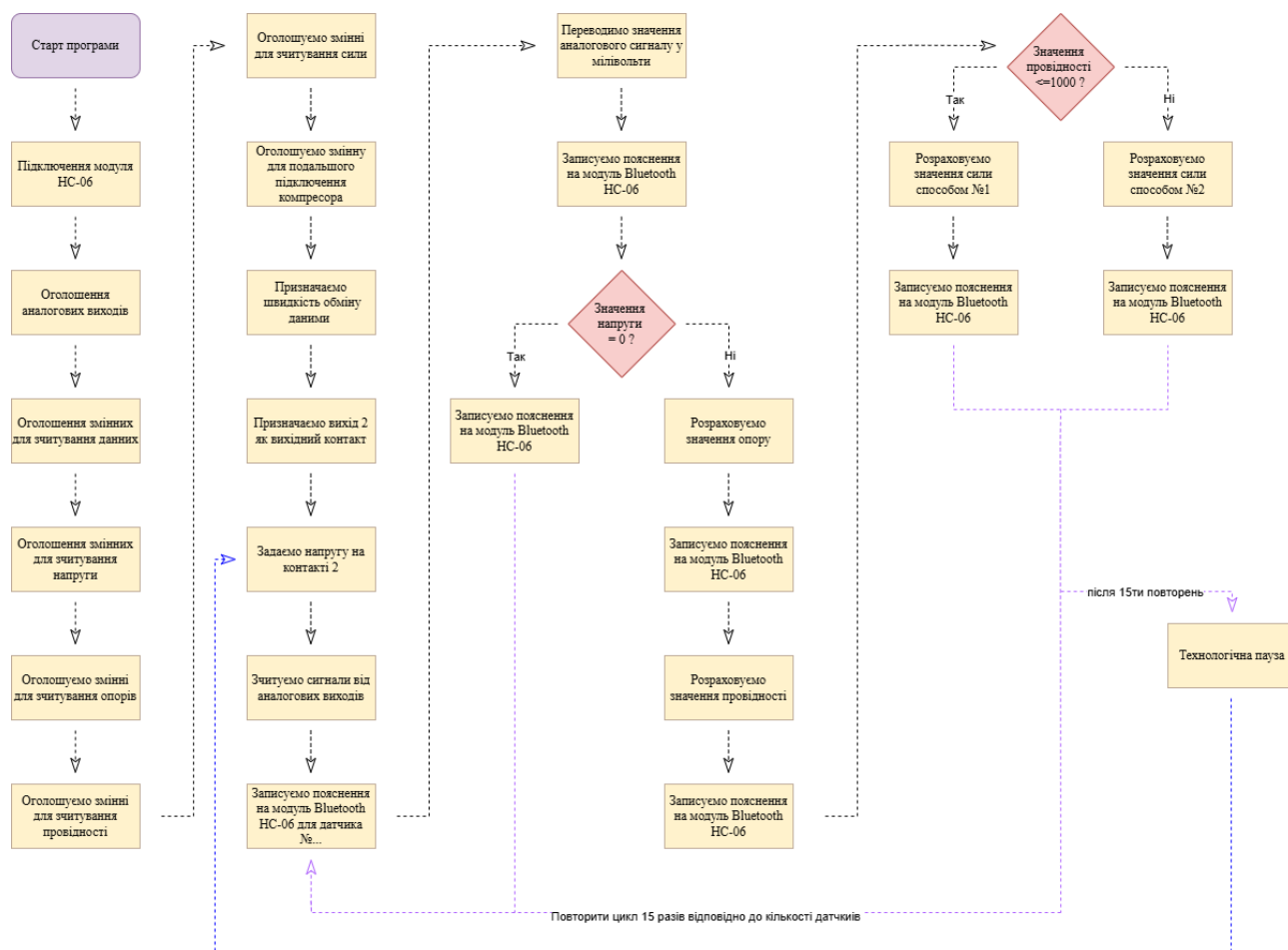


Рис. 2.8. Блок-схема роботи мехатронної системи із вимірювання значення тисків у куксоприймачі

2.6.2 Програмування мікроконтролера Arduino

Для програмування мікроконтролера використано програмне забезпечення Arduino IDE. Arduino IDE – це інтегроване середовище для розробок (англ. IDE - Integrated Development Environment), що надає користувачу можливість редагування програмного коду з подальшою компіляцією та вивантаженням на плату. Мовою програмування є комбінація C та C++ [52].

Щоб запрограмувати обраний мікроконтролер, використаний код, який представлений на Рис. 2.9-Рис. 2.12.

```

1  #include <SoftwareSerial.h> // Підключення стандартної бібліотеки
2  SoftwareSerial BTSerial (PD0 , PD1); // RX | TX
3  int rxd1Pin = A0; // Оголошуємо аналогові виходи
4  int rxd2Pin = A1;
5  int rxd3Pin = A2;
6  int rxd4Pin = A3;
7  int rxd5Pin = A4;
8  int rxd6Pin = A5;
9  int rxd7Pin = A6;
10 int rxd8Pin = A7;
11 int rxd9Pin = A8;
12 int rxd10Pin = A9;
13 int rxd11Pin = A10;
14 int rxd12Pin = A11;
15 int rxd13Pin = A12;
16 int rxd14Pin = A13;
17 int rxd15Pin = A14;
18
19 int rxd1Reading; // Оголошуємо змінні для зчитування даних
20 int rxd2Reading;
21 int rxd3Reading;
22 int rxd4Reading;
23 int rxd5Reading;
24 int rxd6Reading;
25 int rxd7Reading;
26 int rxd8Reading;
27 int rxd9Reading;
28 int rxd10Reading;
29 int rxd11Reading;
30 int rxd12Reading;
31 int rxd13Reading;
32 int rxd14Reading;
33 int rxd15Reading;
34
35 int rxd1Voltage; // Оголошуємо змінні для зчитування напруги
36 int rxd2Voltage;
37 int rxd3Voltage;
38 int rxd4Voltage;
39 int rxd5Voltage;
40 int rxd6Voltage;
41 int rxd7Voltage;
42 int rxd8Voltage;
43 int rxd9Voltage;
44 int rxd10Voltage;
45 int rxd11Voltage;
46 int rxd12Voltage;
47 int rxd13Voltage;
48 int rxd14Voltage;
49 int rxd15Voltage;
50
51 unsigned long rxd1Resistance; // Оголошуємо змінні для зчитування опорів
52 unsigned long rxd2Resistance;
53 unsigned long rxd3Resistance;
54 unsigned long rxd4Resistance;
55 unsigned long rxd5Resistance;
56 unsigned long rxd6Resistance;
57 unsigned long rxd7Resistance;
58 unsigned long rxd8Resistance;
59 unsigned long rxd9Resistance;
60 unsigned long rxd10Resistance;
61 unsigned long rxd11Resistance;
62 unsigned long rxd12Resistance;
63 unsigned long rxd13Resistance;
64 unsigned long rxd14Resistance;
65 unsigned long rxd15Resistance;
66
67 unsigned long rxd1Conductance; // Оголошуємо змінні для зчитування провідності
68 unsigned long rxd2Conductance;
69 unsigned long rxd3Conductance;
70 unsigned long rxd4Conductance;
71 unsigned long rxd5Conductance;
72 unsigned long rxd6Conductance;
73 unsigned long rxd7Conductance;
74 unsigned long rxd8Conductance;
75 unsigned long rxd9Conductance;
76 unsigned long rxd10Conductance;
77 unsigned long rxd11Conductance;
78 unsigned long rxd12Conductance;
79 unsigned long rxd13Conductance;
80 unsigned long rxd14Conductance;
81 unsigned long rxd15Conductance;
82
83 long rxd1Force; // Оголошуємо змінні для зчитування сили
84 long rxd2Force;
85 long rxd3Force;
86 long rxd4Force;
87 long rxd5Force;
88 long rxd6Force;
89 long rxd7Force;
90 long rxd8Force;
91 long rxd9Force;
92 long rxd10Force;

```

Рис. 2.9. Код для програмування мікропроцесора Arduino Mega 2560 Rev3:
рядки 1-92 [32]

За допомогою рядків 1 та 2 у програмний код підключена стандартна бібліотека Arduino для можливості подальшого використання для передачі отриманих результатів із датчиків на комп'ютер.

Рядки 3-17 необхідні для активації та присвоєння аналогових виходів до датчиків Taidacent RXD 1016.

Щоб у подальшому зчитувати отриманні значення із п'єзорезистивних датчиків оголошено змінну rxdReading для кожного елемента.

Для обробки значень напруг, опорів, провідностей та сил у коді прописані змінні у рядках 19-97 для кожного датчика відповідно.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

```

93 long rxd11Force;
94 long rxd12Force;
95 long rxd13Force;
96 long rxd14Force;
97 long rxd15Force;
98
99 int kompresor = 2; // оголошуємо змінну і присвоюємо їй значення 2
100
101 void setup(void) {
102   Serial.begin(9600);
103   BTSerial.begin(9600);
104   pinMode(kompresor, OUTPUT); // призначаємо контакт 2 як вихід
105 }
106
107 void loop(void) {
108   analogWrite(kompresor, 133) // задаємо напругу контакту 2 на рівні 52% = 2,6 Вольт = 133
109
110   rxd1Reading = analogRead(rxd1Pin); // зчитуємо сигнали від аналогових виходів і зберігаємо у змінні
111   rxd2Reading = analogRead(rxd2Pin);
112   rxd3Reading = analogRead(rxd3Pin);
113   rxd4Reading = analogRead(rxd4Pin);
114   rxd5Reading = analogRead(rxd5Pin);
115   rxd6Reading = analogRead(rxd6Pin);
116   rxd7Reading = analogRead(rxd7Pin);
117   rxd8Reading = analogRead(rxd8Pin);
118   rxd9Reading = analogRead(rxd9Pin);
119   rxd10Reading = analogRead(rxd10Pin);
120   rxd11Reading = analogRead(rxd11Pin);
121   rxd12Reading = analogRead(rxd12Pin);
122   rxd13Reading = analogRead(rxd13Pin);
123   rxd14Reading = analogRead(rxd14Pin);
124   rxd15Reading = analogRead(rxd15Pin);
125
126
127   // Датчик 1
128   BTSerial.print("Analog1 reading = "); // записуємо пояснення на модуль HC-06
129   BTSerial.println(rxd1Reading); // відправляємо значення на модуль HC-06 від першого датчика
130   rxd1Voltage = map(rxd1Reading, 0, 1023, 0, 5000); // переводимо значення із аналогового входу
131   // у значення напруги
132   BTSerial.print("Voltage1 reading in mV = "); // записуємо пояснення: "зчитана напруга1 у мВ"- на модуль HC-06
133   BTSerial.println(rxd1Voltage); // відправляємо значення на модуль HC-06 від першого датчика у мВ
134   if (rxd1Voltage == 0) { // якщо значення напруги датчика становить 0, то
135     BTSerial.println("No pressure 1"); //пишемо та відправляємо на модуль HC-06: "немає тиску за датчиком 1"
136   } else { // у іншому випадку
137     rxd1Resistance = 5000 - rxd1Voltage; // 5000 мВ(живлення плати) віднімаємо отримане значення у мВ від датчика 1
138     rxd1Resistance = rxd1Resistance * 10000; // множимо значення опору на значення опору резистора 10000 Ом

```

Рис. 2.10. Код для програмування мікропроцесора Arduino Mega 2560 Rev3:
рядки 93-138 [32]

У рядку 99 прописано команду для присвоєння змінній значення 2 для подальшого підключення компресора D40P-BL4.

Рядки 102 та 103 контролюють швидкість обміну даними за допомогою значення 9600, а 104 – оголошує пін 2 як вихідний контакт.

Щоб контролювати потужність компресора, його підключено до цифрового виходу 2 та використано рядок 108. Змінюючи значення величини ШІМ сигналу від 0 до 255, користувач контролює роботу приладу.

Рядками 110-124 програма зчитує сигнал із аналогових виходів та зберігає їх у власну пам'ять.

На рядках 128-158 прописано методику програмування та фізичні залежності, які застосовані для п'єзорезистивного датчика №1. Використано функцію map для переведення значення із 0-1023 у значення напруги у мілівольтах від 0 до 5000. Застосовано умовні оператори if, else для розрахунків

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

та функції `BTSerial.print` та `BTSerial.println` для надсилання значень на Bluetooth модуль та подальшого їх відображення на комп'ютері.

```

139 rxd1Resistance = rxd1Resistance / rxd1Voltage; // отриманий опір ділимо на напругу живлення плати
140 BTSerial.print("RXD1 resistance in ohms = "); //записуємо текстове пояснення на модуль HC-06
141 BTSerial.println(rxd1Resistance); // записуємо значення опору у модулі HC-06 від першого датчика
142
143 rxd1Conductance = 1000000; // записуємо коефіцієнт для переведення значень у мікродинії
144 rxd1Conductance = rxd1Conductance / rxd1Resistance; // ділимо коеф. провідності на опір датчика 1
145 BTSerial.print("Conductance1 in microSiemens: "); // записуємо пояснення на модуль HC-06 у Сіменсах
146 BTSerial.println(rxd1Conductance); // відправляємо значення провідності на модуль HC-06 від першого датчика
147
148 if (rxd1Conductance <= 1000) { // якщо значення провідності <=1000, то
149 rxd1Force = rxd1Conductance / 80; // сила прикладена на датчик 1 = провідність датчика 1 / 80
150 BTSerial.print("Force1 in Newtons: "); // записуємо пояснення на модуль HC-06 у Ньютонах
151 BTSerial.println(rxd1Force); // відправляємо значення сили на модуль HC-06 від першого датчика
152 } else { // у іншому випадку
153 rxd1Force = rxd1Conductance - 1000; // віднімаємо від знач. провідності датчика 1 значення точки зламу
154 rxd1Force = rxd1Force / 30; // ділимо значення сили датчика 1 на 30
155 BTSerial.print("Force1 in Newtons: "); // записуємо пояснення на модуль HC-06 у Ньютонах
156 BTSerial.println(rxd1Force); // відправляємо значення сили на модуль HC-06 від першого датчика
157 }
158 }
159 // Датчик 2
160 BTSerial.println("-----");
161 BTSerial.print("Analog2 reading = ");
162 BTSerial.println(rxd2Reading);
163 rxd2Voltage = map(rxd2Reading, 0, 1023, 0, 5000);
164 BTSerial.print("Voltage2 reading in mV = ");
165 BTSerial.println(rxd2Voltage);
166 if (rxd2Voltage == 0) {
167 BTSerial.println("No pressure 2");
168 } else {
169 rxd2Resistance = 5000 - rxd2Voltage;
170 rxd2Resistance = rxd2Resistance * 10000;
171 rxd2Resistance = rxd2Resistance / rxd2Voltage;
172 BTSerial.print("RXD2 resistance in ohms = ");
173 BTSerial.println(rxd2Resistance);
174
175 rxd2Conductance = 1000000;
176 rxd2Conductance = rxd2Conductance / rxd2Resistance;
177 BTSerial.print("Conductance2 in microSiemens: ");
178 BTSerial.println(rxd2Conductance);
179
180 if (rxd2Conductance <= 1000) {
181 rxd2Force = rxd2Conductance / 80;
182 BTSerial.print("Force2 in Newtons: ");
183 BTSerial.println(rxd2Force);
184 } else {

```

Рис. 2.11. Код для програмування мікропроцесора Arduino Mega 2560 Rev3: рядки 139-184 [32]

```

185 rxd2Force = rxd2Conductance - 1000;
186 rxd2Force = rxd2Force / 30;
187 BTSerial.print("Force2 in Newtons: ");
188 BTSerial.println(rxd2Force);
189 }
190 }
191 // Датчик 3
192 BTSerial.println("-----");
193 BTSerial.print("Analog3 reading = ");
194 BTSerial.println(rxd3Reading);
195 rxd3Voltage = map(rxd3Reading, 0, 1023, 0, 5000);
196 BTSerial.print("Voltage3 reading in mV = ");
197 BTSerial.println(rxd3Voltage);
198 if (rxd3Voltage == 0) {
199 BTSerial.println("No pressure 3");
200 } else {
201 rxd3Resistance = 5000 - rxd3Voltage;
202 rxd3Resistance = rxd3Resistance * 10000;
203 rxd3Resistance = rxd3Resistance / rxd3Voltage;
204 BTSerial.print("RXD3 resistance in ohms = ");
205 BTSerial.println(rxd3Resistance);
206
207 rxd3Conductance = 1000000;
208 rxd3Conductance = rxd3Conductance / rxd3Resistance;
209 BTSerial.print("Conductance3 in microSiemens: ");
210 BTSerial.println(rxd3Conductance);
211
212 if (rxd3Conductance <= 1000) {
213 rxd3Force = rxd3Conductance / 80;
214 BTSerial.print("Force3 in Newtons: ");
215 BTSerial.println(rxd3Force);
216 } else {
217 rxd3Force = rxd3Conductance - 1000;
218 rxd3Force = rxd3Force / 30;
219 BTSerial.print("Force3 in Newtons: ");
220 BTSerial.println(rxd3Force);
221 }
222 }
223 // Датчик 4
224 BTSerial.println("-----");
225 BTSerial.print("Analog4 reading = ");
226 BTSerial.println(rxd4Reading);
227 rxd4Voltage = map(rxd4Reading, 0, 1023, 0, 5000);
228 BTSerial.print("Voltage4 reading in mV = ");
229 BTSerial.println(rxd4Voltage);
230 if (rxd4Voltage == 0) {
231 BTSerial.println("No pressure 4");
232 } else {
233 rxd4Resistance = 5000 - rxd4Voltage;
234 rxd4Resistance = rxd4Resistance * 10000;
235 rxd4Resistance = rxd4Resistance / rxd4Voltage;
236 BTSerial.print("RXD4 resistance in ohms = ");
237 BTSerial.println(rxd4Resistance);
238
239 rxd4Conductance = 1000000;
240 rxd4Conductance = rxd4Conductance / rxd4Resistance;
241 BTSerial.print("Conductance4 in microSiemens: ");
242 BTSerial.println(rxd4Conductance);
243
244 if (rxd4Conductance <= 1000) {
245 rxd4Force = rxd4Conductance / 80;
246 BTSerial.print("Force4 in Newtons: ");
247 BTSerial.println(rxd4Force);
248 } else {
249 rxd4Force = rxd4Conductance - 1000;
250 rxd4Force = rxd4Force / 30;
251 BTSerial.print("Force4 in Newtons: ");
252 BTSerial.println(rxd4Force);
253 }
254 }
255 // Датчик 5
256 BTSerial.println("-----");
257 BTSerial.print("Analog5 reading = ");
258 BTSerial.println(rxd5Reading);
259 rxd5Voltage = map(rxd5Reading, 0, 1023, 0, 5000);
260 BTSerial.print("Voltage5 reading in mV = ");
261 BTSerial.println(rxd5Voltage);
262 if (rxd5Voltage == 0) {
263 BTSerial.println("No pressure 5");
264 } else {
265 rxd5Resistance = 5000 - rxd5Voltage;
266 rxd5Resistance = rxd5Resistance * 10000;
267 rxd5Resistance = rxd5Resistance / rxd5Voltage;
268 BTSerial.print("RXD5 resistance in ohms = ");
269 BTSerial.println(rxd5Resistance);
270
271 rxd5Conductance = 1000000;
272 rxd5Conductance = rxd5Conductance / rxd5Resistance;
273 BTSerial.print("Conductance5 in microSiemens: ");
274 BTSerial.println(rxd5Conductance);
275
276 if (rxd5Conductance <= 1000) {
277 rxd5Force = rxd5Conductance / 80;

```

а

б

		Деялід				Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ

```

278     BTSerial.print("Force5 in Newtons: ");
279     BTSerial.println(rxd5Force);
280 } else {
281     rxd5Force = rxd5Conductance - 1000;
282     rxd5Force = rxd5Force / 30;
283     BTSerial.print("Force5 in Newtons: ");
284     BTSerial.println(rxd5Force);
285 }
286 }
287 // Датчик 6
288 BTSerial.println("-----");
289 BTSerial.print("Analog6 reading = ");
290 BTSerial.println(rxd6Reading);
291 rxd6Voltage = map(rxd6Reading, 0, 1023, 0, 5000);
292 BTSerial.print("Voltage6 reading in mV = ");
293 BTSerial.println(rxd6Voltage);
294 if (rxd6Voltage == 0) {
295     BTSerial.println("No pressure 6");
296 } else {
297     rxd6Resistance = 5000 - rxd6Voltage;
298     rxd6Resistance = rxd6Resistance * 10000;
299     rxd6Resistance = rxd6Resistance / rxd6Voltage;
300     BTSerial.print("RXD6 resistance in ohms = ");
301     BTSerial.println(rxd6Resistance);
302
303     rxd6Conductance = 1000000;
304     rxd6Conductance = rxd6Conductance / rxd6Resistance;
305     BTSerial.print("Conductance6 in microSiemens: ");
306     BTSerial.println(rxd6Conductance);
307
308     if (rxd6Conductance <= 1000) {
309         rxd6Force = rxd6Conductance / 80;
310         BTSerial.print("Force6 in Newtons: ");
311         BTSerial.println(rxd6Force);
312     } else {
313         rxd6Force = rxd6Conductance - 1000;
314         rxd6Force = rxd6Force / 30;
315         BTSerial.print("Force6 in Newtons: ");
316         BTSerial.println(rxd6Force);
317     }
318 }
319 // Датчик 7
320 BTSerial.println("-----");
321 BTSerial.print("Analog7 reading = ");
322 BTSerial.println(rxd7Reading);
323 rxd7Voltage = map(rxd7Reading, 0, 1023, 0, 5000);
324
325     BTSerial.print("Voltage7 reading in mV = ");
326     BTSerial.println(rxd7Voltage);
327     if (rxd7Voltage == 0) {
328         BTSerial.println("No pressure 7");
329     } else {
330         rxd7Resistance = 5000 - rxd7Voltage;
331         rxd7Resistance = rxd7Resistance * 10000;
332         rxd7Resistance = rxd7Resistance / rxd7Voltage;
333         BTSerial.print("RXD7 resistance in ohms = ");
334         BTSerial.println(rxd7Resistance);
335
336         rxd7Conductance = 1000000;
337         rxd7Conductance = rxd7Conductance / rxd7Resistance;
338         BTSerial.print("Conductance7 in microSiemens: ");
339         BTSerial.println(rxd7Conductance);
340
341         if (rxd7Conductance <= 1000) {
342             rxd7Force = rxd7Conductance / 80;
343             BTSerial.print("Force7 in Newtons: ");
344             BTSerial.println(rxd7Force);
345         } else {
346             rxd7Force = rxd7Conductance - 1000;
347             rxd7Force = rxd7Force / 30;
348             BTSerial.print("Force7 in Newtons: ");
349             BTSerial.println(rxd7Force);
350         }
351     }
352 // Датчик 8
353 BTSerial.println("-----");
354 BTSerial.print("Analog8 reading = ");
355 BTSerial.println(rxd8Reading);
356 rxd8Voltage = map(rxd8Reading, 0, 1023, 0, 5000);
357 BTSerial.print("Voltage8 reading in mV = ");
358 BTSerial.println(rxd8Voltage);
359 if (rxd8Voltage == 0) {
360     BTSerial.println("No pressure 8");
361 } else {
362     rxd8Resistance = 5000 - rxd8Voltage;
363     rxd8Resistance = rxd8Resistance * 10000;
364     rxd8Resistance = rxd8Resistance / rxd8Voltage;
365     BTSerial.print("RXD8 resistance in ohms = ");
366     BTSerial.println(rxd8Resistance);
367
368     rxd8Conductance = 1000000;
369     rxd8Conductance = rxd8Conductance / rxd8Resistance;
370     BTSerial.print("Conductance8 in microSiemens: ");

```

6

```

370     BTSerial.println(rxd8Conductance);
371
372     if (rxd8Conductance <= 1000) {
373         rxd8Force = rxd8Conductance / 80;
374         BTSerial.print("Force8 in Newtons: ");
375         BTSerial.println(rxd8Force);
376     } else {
377         rxd8Force = rxd8Conductance - 1000;
378         rxd8Force = rxd8Force / 30;
379         BTSerial.print("Force8 in Newtons: ");
380         BTSerial.println(rxd8Force);
381     }
382 }
383 // Датчик 9
384 BTSerial.println("-----");
385 BTSerial.print("Analog9 reading = ");
386 BTSerial.println(rxd9Reading);
387 rxd9Voltage = map(rxd9Reading, 0, 1023, 0, 5000);
388 BTSerial.print("Voltage9 reading in mV = ");
389 BTSerial.println(rxd9Voltage);
390 if (rxd9Voltage == 0) {
391     BTSerial.println("No pressure 9");
392 } else {
393     rxd9Resistance = 5000 - rxd9Voltage;
394     rxd9Resistance = rxd9Resistance * 10000;
395     rxd9Resistance = rxd9Resistance / rxd9Voltage;
396     BTSerial.print("RXD9 resistance in ohms = ");
397     BTSerial.println(rxd9Resistance);
398
399     rxd9Conductance = 1000000;
400     rxd9Conductance = rxd9Conductance / rxd9Resistance;
401     BTSerial.print("Conductance9 in microSiemens: ");
402     BTSerial.println(rxd9Conductance);
403
404     if (rxd9Conductance <= 1000) {
405         rxd9Force = rxd9Conductance / 80;
406         BTSerial.print("Force9 in Newtons: ");
407         BTSerial.println(rxd9Force);
408     } else {
409         rxd9Force = rxd9Conductance - 1000;
410         rxd9Force = rxd9Force / 30;
411         BTSerial.print("Force9 in Newtons: ");
412         BTSerial.println(rxd9Force);
413     }
414 }

```

τ

2

```

415 // Датчик 10
416 BTSerial.println("-----");
417 BTSerial.print("Analog10 reading = ");
418 BTSerial.println(rxd10Reading);
419 rxd10Voltage = map(rxd10Reading, 0, 1023, 0, 5000);
420 BTSerial.print("Voltage10 reading in mV = ");
421 BTSerial.println(rxd10Voltage);
422 if (rxd10Voltage == 0) {
423     BTSerial.println("No pressure 10");
424 } else {
425     rxd10Resistance = 5000 - rxd10Voltage;
426     rxd10Resistance = rxd10Resistance * 10000;
427     rxd10Resistance = rxd10Resistance / rxd10Voltage;
428     BTSerial.print("RXD10 resistance in ohms = ");
429     BTSerial.println(rxd10Resistance);
430
431     rxd10Conductance = 1000000;
432     rxd10Conductance = rxd10Conductance / rxd10Resistance;
433     BTSerial.print("Conductance10 in microSiemens: ");
434     BTSerial.println(rxd10Conductance);
435
436     if (rxd10Conductance <= 1000) {
437         rxd10Force = rxd10Conductance / 80;
438         BTSerial.print("Force10 in Newtons: ");
439         BTSerial.println(rxd10Force);
440     } else {
441         rxd10Force = rxd10Conductance - 1000;
442         rxd10Force = rxd10Force / 30;
443         BTSerial.print("Force10 in Newtons: ");
444         BTSerial.println(rxd10Force);
445     }
446 }
447 // Датчик 11
448 BTSerial.println("-----");
449 BTSerial.print("Analog11 reading = ");
450 BTSerial.println(rxd11Reading);
451 rxd11Voltage = map(rxd11Reading, 0, 1023, 0, 5000);
452 BTSerial.print("Voltage11 reading in mV = ");
453 BTSerial.println(rxd11Voltage);
454 if (rxd11Voltage == 0) {
455     BTSerial.println("No pressure 11");
456 } else {
457     rxd11Resistance = 5000 - rxd11Voltage;
458     rxd11Resistance = rxd11Resistance * 10000;
459     rxd11Resistance = rxd11Resistance / rxd11Voltage;
460     BTSerial.print("RXD11 resistance in ohms = ");

```

δ

		Деґлід				ДПО1.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська					44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

```

461     BTSerial.println(rxd11Resistance);
462
463     rxd11Conductance = 1000000;
464     rxd11Conductance = rxd11Conductance / rxd11Resistance;
465     BTSerial.print("Conductance11 in microSiemens: ");
466     BTSerial.println(rxd11Conductance);
467
468     if (rxd11Conductance <= 1000) {
469         rxd11Force = rxd11Conductance / 80;
470         BTSerial.print("Force11 in Newtons: ");
471         BTSerial.println(rxd11Force);
472     } else {
473         rxd11Force = rxd11Conductance - 1000;
474         rxd11Force = rxd11Force / 30;
475         BTSerial.print("Force11 in Newtons: ");
476         BTSerial.println(rxd11Force);
477     }
478 }
479 // Датчик 12
480 BTSerial.println("-----");
481 BTSerial.print("Analog12 reading = ");
482 BTSerial.println(rxd12Reading);
483 rxd12Voltage = map(rxd12Reading, 0, 1023, 0, 5000);
484 BTSerial.print("Voltage12 reading in mV = ");
485 BTSerial.println(rxd12Voltage);
486 if (rxd12Voltage == 0) {
487     BTSerial.println("No pressure 12");
488 } else {
489     rxd12Resistance = 5000 - rxd12Voltage;
490     rxd12Resistance = rxd12Resistance * 10000;
491     rxd12Resistance = rxd12Resistance / rxd12Voltage;
492     BTSerial.print("RXD12 resistance in ohms = ");
493     BTSerial.println(rxd12Resistance);
494
495     rxd12Conductance = 1000000;
496     rxd12Conductance = rxd12Conductance / rxd12Resistance;
497     BTSerial.print("Conductance12 in microSiemens: ");
498     BTSerial.println(rxd12Conductance);
499
500     if (rxd12Conductance <= 1000) {
501         rxd12Force = rxd12Conductance / 80;
502         BTSerial.print("Force12 in Newtons: ");
503         BTSerial.println(rxd12Force);
504     } else {
505         rxd12Force = rxd12Conductance - 1000;
506         rxd12Force = rxd12Force / 30;
507
508         BTSerial.print("Force12 in Newtons: ");
509         BTSerial.println(rxd12Force);
510     }
511 }
512 // Датчик 13
513 BTSerial.println("-----");
514 BTSerial.print("Analog13 reading = ");
515 BTSerial.println(rxd13Reading);
516 rxd13Voltage = map(rxd13Reading, 0, 1023, 0, 5000);
517 BTSerial.print("Voltage13 reading in mV = ");
518 BTSerial.println(rxd13Voltage);
519 if (rxd13Voltage == 0) {
520     BTSerial.println("No pressure 13");
521 } else {
522     rxd13Resistance = 5000 - rxd13Voltage;
523     rxd13Resistance = rxd13Resistance * 10000;
524     rxd13Resistance = rxd13Resistance / rxd13Voltage;
525     BTSerial.print("RXD13 resistance in ohms = ");
526     BTSerial.println(rxd13Resistance);
527
528     rxd13Conductance = 1000000;
529     rxd13Conductance = rxd13Conductance / rxd13Resistance;
530     BTSerial.print("Conductance13 in microSiemens: ");
531     BTSerial.println(rxd13Conductance);
532
533     if (rxd13Conductance <= 1000) {
534         rxd13Force = rxd13Conductance / 80;
535         BTSerial.print("Force13 in Newtons: ");
536         BTSerial.println(rxd13Force);
537     } else {
538         rxd13Force = rxd13Conductance - 1000;
539         rxd13Force = rxd13Force / 30;
540         BTSerial.print("Force13 in Newtons: ");
541         BTSerial.println(rxd13Force);
542     }
543 }
544 // Датчик 14
545 BTSerial.println("-----");
546 BTSerial.print("Analog14 reading = ");
547 BTSerial.println(rxd14Reading);
548 rxd14Voltage = map(rxd14Reading, 0, 1023, 0, 5000);
549 BTSerial.print("Voltage14 reading in mV = ");
550 BTSerial.println(rxd14Voltage);
551 if (rxd14Voltage == 0) {
552     BTSerial.println("No pressure 14");
553 } else {
554     rxd14Resistance = 5000 - rxd14Voltage;
555     rxd14Resistance = rxd14Resistance * 10000;
556     rxd14Resistance = rxd14Resistance / rxd14Voltage;
557     BTSerial.print("RXD14 resistance in ohms = ");
558     BTSerial.println(rxd14Resistance);
559
560     rxd14Conductance = 1000000;
561     rxd14Conductance = rxd14Conductance / rxd14Resistance;
562     BTSerial.print("Conductance14 in microSiemens: ");
563     BTSerial.println(rxd14Conductance);
564
565     if (rxd14Conductance <= 1000) {
566         rxd14Force = rxd14Conductance / 80;
567         BTSerial.print("Force14 in Newtons: ");
568         BTSerial.println(rxd14Force);
569     } else {
570         rxd14Force = rxd14Conductance - 1000;
571         rxd14Force = rxd14Force / 30;
572         BTSerial.print("Force14 in Newtons: ");
573         BTSerial.println(rxd14Force);
574     }
575 }
576 // Датчик 15
577 BTSerial.println("-----");
578 BTSerial.print("Analog15 reading = ");
579 BTSerial.println(rxd15Reading);
580 rxd15Voltage = map(rxd15Reading, 0, 1023, 0, 5000);
581 BTSerial.print("Voltage15 reading in mV = ");
582 BTSerial.println(rxd15Voltage);
583 if (rxd15Voltage == 0) {
584     BTSerial.println("No pressure 15");
585 } else {
586     rxd15Resistance = 5000 - rxd15Voltage;
587     rxd15Resistance = rxd15Resistance * 10000;
588     rxd15Resistance = rxd15Resistance / rxd15Voltage;
589     BTSerial.print("RXD15 resistance in ohms = ");
590     BTSerial.println(rxd15Resistance);
591
592     rxd15Conductance = 1000000;
593     rxd15Conductance = rxd15Conductance / rxd15Resistance;
594     BTSerial.print("Conductance15 in microSiemens: ");
595     BTSerial.println(rxd15Conductance);
596
597     if (rxd15Conductance <= 1000) {
598         rxd15Force = rxd15Conductance / 80;
599         BTSerial.print("Force15 in Newtons: ");
600         BTSerial.println(rxd15Force);
601     } else {
602         rxd15Force = rxd15Conductance - 1000;
603         rxd15Force = rxd15Force / 30;
604         BTSerial.print("Force15 in Newtons: ");
605         BTSerial.println(rxd15Force);
606     }
607 }
608 BTSerial.println("-----");
609 delay(300);

```

e

e

```

553     rxd14Resistance = 5000 - rxd14Voltage;
554     rxd14Resistance = rxd14Resistance * 10000;
555     rxd14Resistance = rxd14Resistance / rxd14Voltage;
556     BTSerial.print("RXD14 resistance in ohms = ");
557     BTSerial.println(rxd14Resistance);
558
559     rxd14Conductance = 1000000;
560     rxd14Conductance = rxd14Conductance / rxd14Resistance;
561     BTSerial.print("Conductance14 in microSiemens: ");
562     BTSerial.println(rxd14Conductance);
563
564     if (rxd14Conductance <= 1000) {
565         rxd14Force = rxd14Conductance / 80;
566         BTSerial.print("Force14 in Newtons: ");
567         BTSerial.println(rxd14Force);
568     } else {
569         rxd14Force = rxd14Conductance - 1000;
570         rxd14Force = rxd14Force / 30;
571         BTSerial.print("Force14 in Newtons: ");
572         BTSerial.println(rxd14Force);
573     }
574 }
575 // Датчик 15
576 BTSerial.println("-----");
577 BTSerial.print("Analog15 reading = ");
578 BTSerial.println(rxd15Reading);
579 rxd15Voltage = map(rxd15Reading, 0, 1023, 0, 5000);
580 BTSerial.print("Voltage15 reading in mV = ");
581 BTSerial.println(rxd15Voltage);
582 if (rxd15Voltage == 0) {
583     BTSerial.println("No pressure 15");
584 } else {
585     rxd15Resistance = 5000 - rxd15Voltage;
586     rxd15Resistance = rxd15Resistance * 10000;
587     rxd15Resistance = rxd15Resistance / rxd15Voltage;
588     BTSerial.print("RXD15 resistance in ohms = ");
589     BTSerial.println(rxd15Resistance);
590
591     rxd15Conductance = 1000000;
592     rxd15Conductance = rxd15Conductance / rxd15Resistance;
593     BTSerial.print("Conductance15 in microSiemens: ");
594     BTSerial.println(rxd15Conductance);
595
596     if (rxd15Conductance <= 1000) {
597         rxd15Force = rxd15Conductance / 80;
598         BTSerial.print("Force15 in Newtons: ");
599         BTSerial.println(rxd15Force);
600     } else {
601         rxd15Force = rxd15Conductance - 1000;
602         rxd15Force = rxd15Force / 30;
603         BTSerial.print("Force15 in Newtons: ");
604         BTSerial.println(rxd15Force);
605     }
606 }
607 BTSerial.println("-----");
608 delay(300);
609 }

```

Ж

З

Рис. 2.12. Код для програмування мікропроцесора Arduino Mega 2560 Rev3

рядки 185-609: а – з [32]

		Дейлід				ДПО1.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська					45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

На Рис. 2.11 та Рис. 2.12 на рядках 160 – 680 продемонстровано код для програмування мікропроцесора та обробки даних, отриманих із датчиків 2 – 15, та технологічна пауза роботи мехатронної системи.

2.7 Розрахунок куксоприймача на міцнісні характеристики методом скінченних елементів

2.7.1 Побудова 3D моделі куксоприймача

Тривимірна модель гільзи куксоприймача створена за допомогою знімків комп'ютерної томографії та імпортована до програмного пакету Ansys у модуль SpaceClaim у форматі STL.

Оскільки у подальших кроках для прикладання граничних умов та розрахунку модель має бути твердотільною, тому за допомогою SpaceClaim сіточну геометрію конвертовано, а грані у ручному режимі спрощено до суцільних поверхонь. Однак, через програмні обмеження зазначеного програмного забезпечення для проєктування дуже важко конвертувати модель та відтворити ідеальні органічні форми.

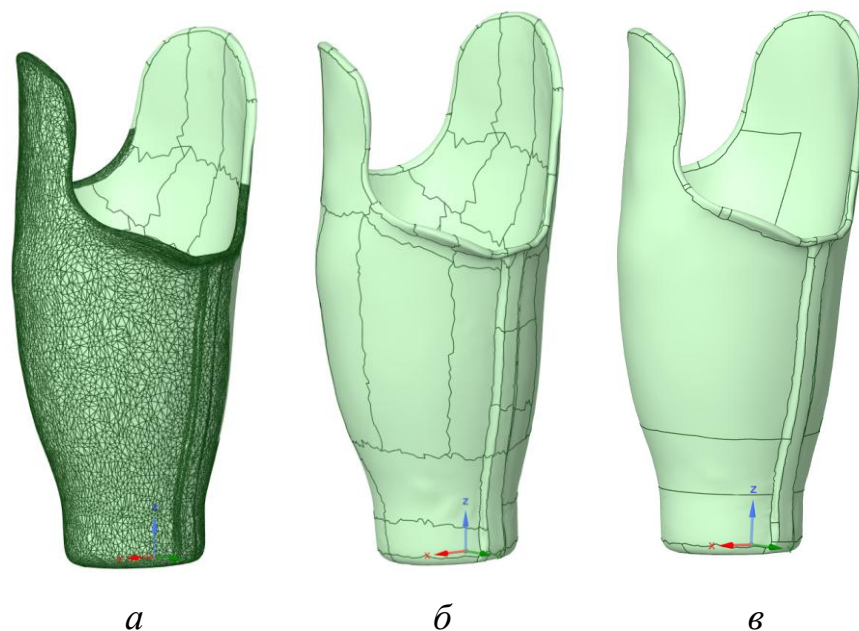


Рис. 2.13. Сіточна модель конвертована покроково у твердотільний об'єкт: *а* - перший, *б* – другий, *в* – третій етапи

2.7.2 Визначення матеріалу та побудова скінченних елементів

Куксоприймач має бути виготовлений із міцного ізотропного матеріалу, для витримування навантаження при його експлуатації. Для забезпечення

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

зазначених параметрів обрано полімерний матеріал поліамід 12 (PA12). Головною його особливістю є можливість використання для виготовлення куксопримачів методом адитивних технологій, а саме MJF – порошковою технологією 3Д друку. Характеристики PA12 використані у розрахунках наступні: густина – 1,01 г/см³, модуль Юнга – 1800 МПа, коефіцієнт Пуассона – 0,47 [53].

Для розрахунку поставленої задачі методом скінченних елементів використано програмний пакет Ansys модуль Static Structural, який є ефективним інструментом для обчислення статичних задач.

Побудову скінченних елементів можна виконувати декількома способами, використовуючи різні типи СЕ, однак у представлений роботі застосований метод автоматичної генерації із використанням тетраедричних елементів.

Точність отриманої сітки визначається наступними параметрами: Skewness (асиметрія) та Orthogonal Quality (ортогональна якість). Параметр Skewness демонструє на скільки площа або клітинка рівностороння або рівнокутна. Значення за цим параметром повинні бути близькими до 0, де 0 – це найкращий показник, 1 – найгірший. Параметр Orthogonal Quality показує на скільки скінченний елемент по формі наближений до куба. Для нього СЕ повинні набувати значень близьких до 1. Тобто, 1 – це найкращий показник, а 0 – найгірший [54].

Табл. 2.5. Параметри якості побудованої скінченно-елементної моделі

Skewness		Orthogonal Quality	
Кількість елементів, %	Якісний показник	Кількість елементів, %	Якісний показник
73.22	0.05-0.35	1.1	0.05-0.35
25.63	0.35-0.65	24.74	0.35-0.65
1.15	0.65-0.95	74.16	0.65-0.95

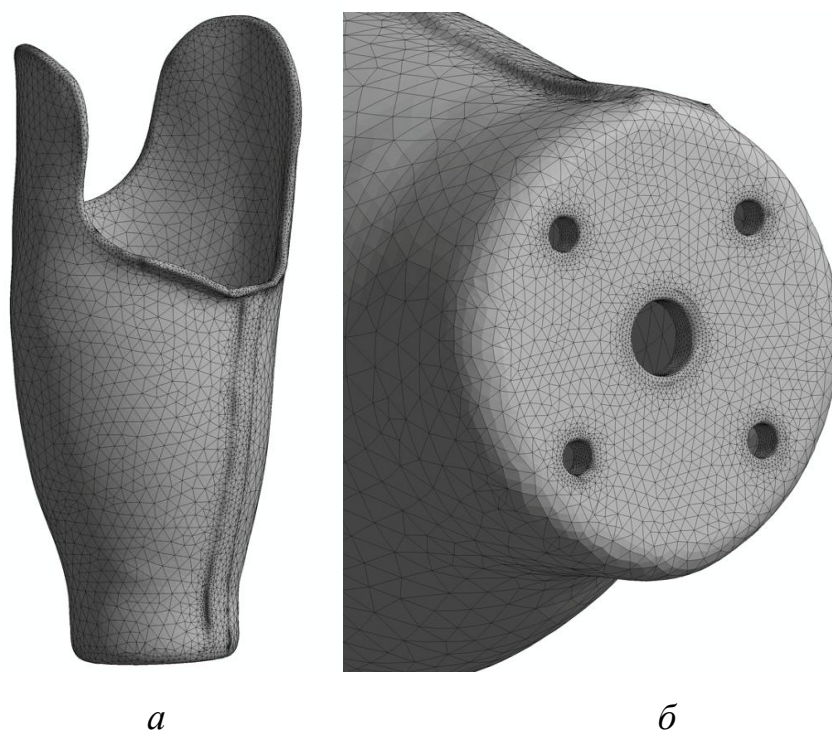


Рис. 2.14. Побудована скінченно-елементна модель: *а* – вид збоку, *б* – вид на кріплення знизу

Кількість побудованих елементів становить 111 107 та обумовлюється оптимальною точністю отриманого результату після проведення розрахунку та часом проведення моделювання [55].

2.7.3 Застосування кінематичних та статичних граничних умов

Обмеження руху гільзи куксоприймача виконано за допомогою двох типів кінематичних граничних умов: «Переміщення», яке прикладене до нижньої зовнішньої сторони гільзи для першого варіанту розрахунку, та «Консольне защемлення». Другий тип фіксує модель по п'яти отворах *а*, *б*, *в*, *г*, *д* або попарно – *а* та *г* чи *б* та *в* (Рис. 2.15).

Прикладання навантаження виконано за допомогою статичної граничної умови «Сила», яка розподілена по внутрішній стінці гільзи та спрямована по осі *OZ* у декартовій системі координат у напрямку від'ємних чисел. Величина становить 750Н, що відповідає середньостатистичній вазі людини.

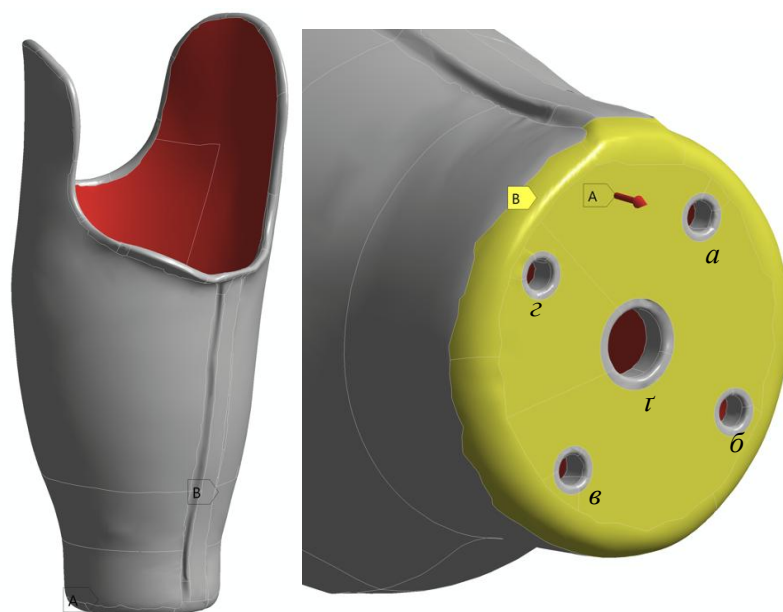


Рис. 2.15. Прикладені граничні умови на модель куксоприймача: А – статична умова – розподілене навантаження по внутрішній стінці гільзи, В – кінематична умова типу «Переміщення»

2.7.4 Результати моделювання

У результаті моделювання можна зробити висновок, що при задані різних типів фіксації гільзи на штативі, найбільші напруження виникають на елементах фіксації: при фіксації у зоні В (Рис. 2.15) – 1,42 МПа, при кріпленні за отвори а, б, в, г, д – 9,455 МПа, при кріпленні у а та г – 59,982 МПа, при кріпленні у б та в – 40,133 МПа.

Таким чином, найбільш небезпечним кріпленням гільзи є фіксування на штативі лише використовуючи отвори а та г, оскільки у такому випадку у кріпильних отворах виникають найбільші напруження у порівнянні із іншими методами фіксації.

Щодо концентраторів, вони виникають через проблематичність конвертації моделі та відповідно нерівномірність подальшої сітки. Проектування демонструє – використання SpaceClaim можливе для роботи із простими моделями, проте при роботі із органічними формами необхідно застосовувати спеціалізоване програмне забезпечення, яке автоматично зможе розділити поверхні на рівні геометричні форми.

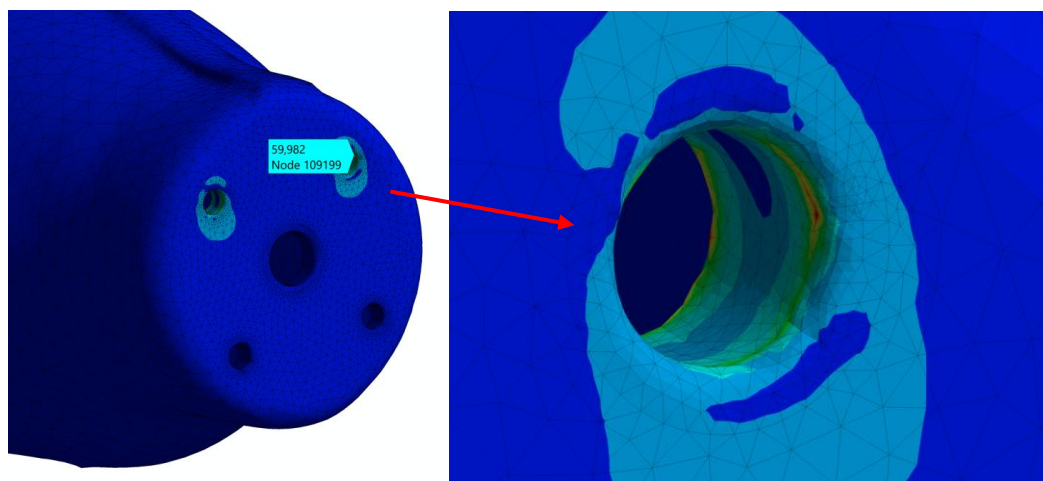


Рис. 2.16. Розподіл напружень за Мізесом у кріпленнях *a* та *г* у куксоприймачі після розрахунку

2.8 Висновок до розрахункового розділу

У розрахунковому розділі було розташовано п'єзорезистивні датчики на гільзі куксоприймача для подальшого аналізу розподілу напружень. Також оцінено розрахункові відхилення обраного датчика. Проведено розрахунок пневматичних подушок на міцнісні характеристики, розраховано об'ємну витрату для забезпечення їх роботи. Розраховано тиск у трубопроводах для поставленої задачі, підібрано відповідне обладнання для коректного функціонування пневматичної системи. Зібрано пневматичну схему.

Для можливості автономної роботи проєкту підібрано електричні компоненти, розраховано об'єм та час роботи акумуляторів. Також наведена схема підключення електричних та пневматичних компонентів до плати Arduino Mega. Побудовано блок-схему роботи системи та написано програмний код для її керування. Проведено аналіз кріплення гільзи куксоприймача на міцнісні характеристики при статичному розрахунку методом скінченних елементів для матеріалу, який у подальшому можливо використати для виготовлення гільзи методом адитивних технологій.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ

3.1 Завдання на розробку технологічного процесу

Назва деталі	- “Куксоприймач”
Службове призначення	- Деталь є елементом конструкції протезу для нижніх кінцівок людини. Застосовується для функціонального використання ампутованої кінцівки.
Матеріал	- РАНТ CF15
Замовлення	- 1 шт

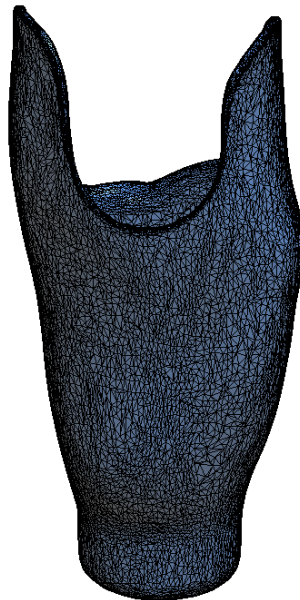


Рис. 3.1. Тривимірна модель куксоприймача

При застосуванні адитивних технологій для виробництва куксоприймача необхідно забезпечити достатню адгезію шарів та оптимальний час виготовлення.

Точність виготовленої деталі залежить головним чином від CAD-моделі, що імпортується у програмне забезпечення для друку. Враховуються також обрані налаштування друку та технічні можливості виробництва. Варто зазначити, що у слайсері можна регулювати висоту шару наплавки філаменту. Однак через властивості матеріалу, що використовується у даному дипломному проєкті, використання меншої висоти лінії ніж зазначено небажано.

3.2 Вибір матеріалу

При обранні методу отримання заготовки враховують матеріал деталі, спосіб виготовлення деталі, її точність та міцність. Важливою складовою також є наявність виробничого обладнання.

У випадку поставленої задачі доступним є метод 3Д друку FFF – виробництво з розплавленого філаменту. Для друку використаний матеріал РАНТ CF15. Його головною особливістю є вміст карбону, який надає високі показники міцності, наприклад, на розтяг у напрямку ХУ матеріал витримує 62,9 МПа [56], та вирішує проблему втоми матеріалу у зоні дистальної частини куксоприймача [57].



Рис. 3.2. Філамент РАНТ CF15 [58]

3.3 Розробка маршрутного технологічного процесу

При використанні адитивних технологій, а саме 3Д друку, користувач отримує велику кількість налаштувань виготовлення. Головні налаштування наступні: попереднє розташування деталі, товщина зовнішніх шарів, спосіб заповнення проміжних шарів та швидкість наплавлення матеріалу. Кожен із параметрів впливає на подальший час виготовлення деталі.

Швидкість наплавлення матеріалу можна визначити залежно від технічних характеристик 3Д принтеру та матеріалу.

У курсовому проєкті використаний принтер WASP-4070-ZX, як пристрій, що набув широкого застосування при друці поліамідів, армованих вуглецем [59].

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Щоб розрахувати тривалість виготовлення деталі, застосовується профіль руху сопла форми трапеція, ділянки якої визначаються по формулам заданим у G-кодi слайсеру.

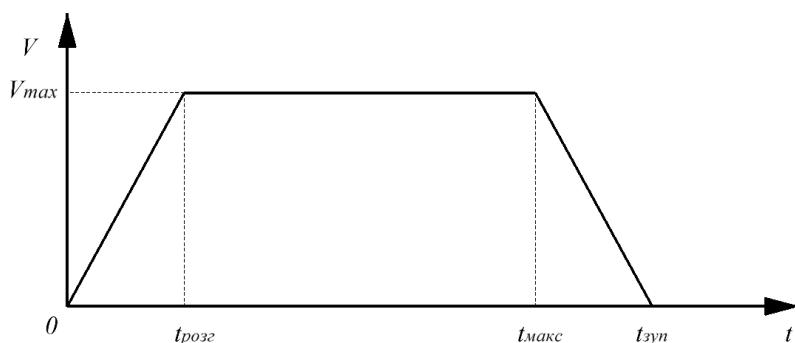


Рис. 3.3. Профіль руху сопла форми трапеція

До найголовніших формул для розрахунку належать:

- швидкість у будь-який момент часу, формула 3.1 із [60]

$$v = s + a \cdot t, \quad (3.1)$$

де s – початкова швидкість сопла, a – прискорення сопла, t – час;

- пройдена відстань, формула 3.2 із [60]

$$d = \int v dt = s \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}, \quad (3.2)$$

- відстань для досягнення максимальної швидкості, формула 3.3 із [60]

$$d = \frac{m^2 - s^2}{2a}, \quad (3.3)$$

де m – максимальна швидкість сопла.

- максимально можлива швидкість сопла при пройденому шляху, формула 3.4 із [60]

$$m = \sqrt{2 \cdot a \cdot d + s^2}. \quad (3.4)$$

Отже, час розгону та гальмування сопла розраховується за формулою швидкості у будь-який момент часу за формулою 3.5:

$$t = \frac{v - s}{a}. \quad (3.5)$$

Для розрахунку часу руху на максимальній швидкості, отримуємо формулу 3.6:

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

$$t = \frac{d}{m}. \quad (3.6)$$

Додаючи три ділянки графіка руху, отримуємо формулу 3.7 для розрахунку необхідного часу друку виробу:

$$t = t_{\text{розг}} + t_{\text{макс}} + t_{\text{зуп}}, \quad (3.7)$$

де $t_{\text{розг}}$ – час розгону сопла, $t_{\text{макс}}$ – час руху сопла на максимальній швидкості, $t_{\text{зуп}}$ – час зупинки сопла.

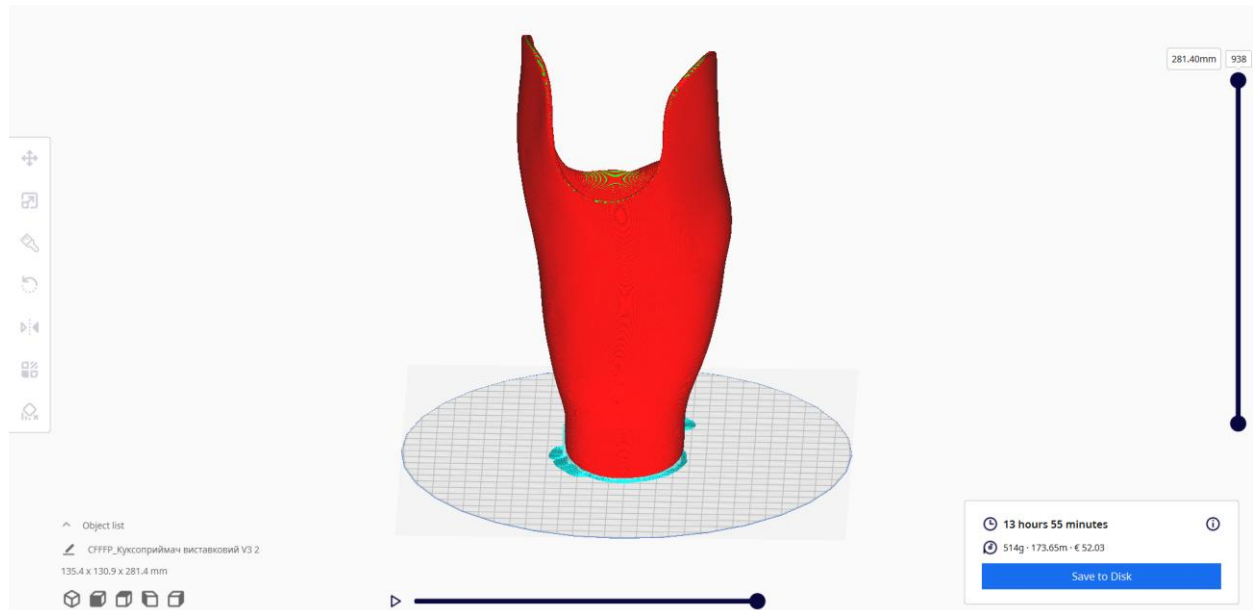


Рис. 3.4. Розташування куксоприймача у положенні №1 для подальшого друку

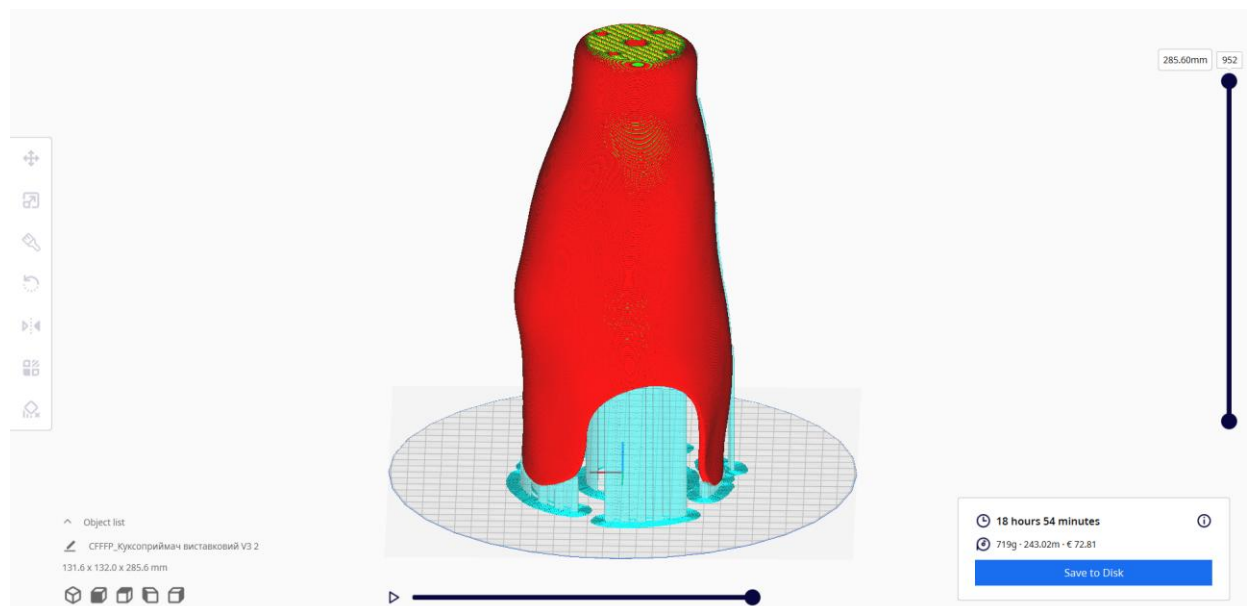


Рис. 3.5. Розташування куксоприймача у положенні №2 для подальшого друку

Висота шару друку відповідає 0,3 мм, а ширина лінії друку – 0,75 мм.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Ширину стінки приймаємо 2,5 мм, для забезпечення більшої міцності деталі. Заповнення між стінками налаштовуємо на 100%. Форму заповнення обираємо гіроїд, як патерн, що має ізотропну поведінку та дозволяє рівномірно розділювати напруження [61]. Він збільшує надійність структури навіть при низьких щільностях [61].

Охолодження матеріалу під час друку за допомогою вбудованої системи охолодження у принтері вимкнено, оскільки це погіршуватиме адгезію шарів при побудові моделі.

Табл. 3.1. Розрахунок виробничих затрат на 3Д друк куксоприймача у різних положеннях

Положення, №	Час, хв	Кількість матеріалу, г	Ціна на матеріал, €
1	835	514	52,03
2	1134	719	72,81

Висновок: найдоцільніше розташування куксоприймача для виготовлення у положенні №1 (Рис. 3.4), оскільки, як видно з розрахунку, даний спосіб розташування забезпечує мінімальну кількість часу, матеріалу та найменші затрати на виробництво за однаково заданими налаштуваннями друку.

Табл. 3.2. Розділений на операції розрахований час друку куксоприймача у положенні №1

Положення, №	Компонент	Час, хв	Час, %
1	Заповнення	49	6
	Внутрішні стінки	333	40
	Зовнішня стінка	294	35
	Ретракції	21	3
	Оболонка	46	6
	Основа	3	0
	Підтримка	30	4
	Холостий хід	57	7

3.4 Вибір друкуючого інструменту. Розрахунок режимів друку

Відповідно до технічних характеристик матеріалу за каталогом обримо швидкість друку 55 мм/с. Стіл для друку розігріваємо до 120 °С, а сопло – до 280 °С. Діаметр сопла обираємо 0.7 мм, при мінімально допустимому 0.6 мм [56].



Рис. 3.6. WASP ZEN X екструдер [62]

Табл. 3.3. Технічні характеристики екструдера WASP ZEN X [62]

Діаметр матеріалу, мм	1.75
Діаметр сопла, мм	0.4, 0.7
Максимальна температура, °C	350
Максимальна потужність, Вт	120
Тип під'єднання	RJ48
Ціна, €	460

3.5 Оснащення операції

Для виготовлення куксоприймача застосовано 3Д принтер WASP-4070-ZX з дельта кінематикою. Ціна принтера становить €13,700 [59].



Рис. 3.7. Принтер WASP-4070-ZX [59]

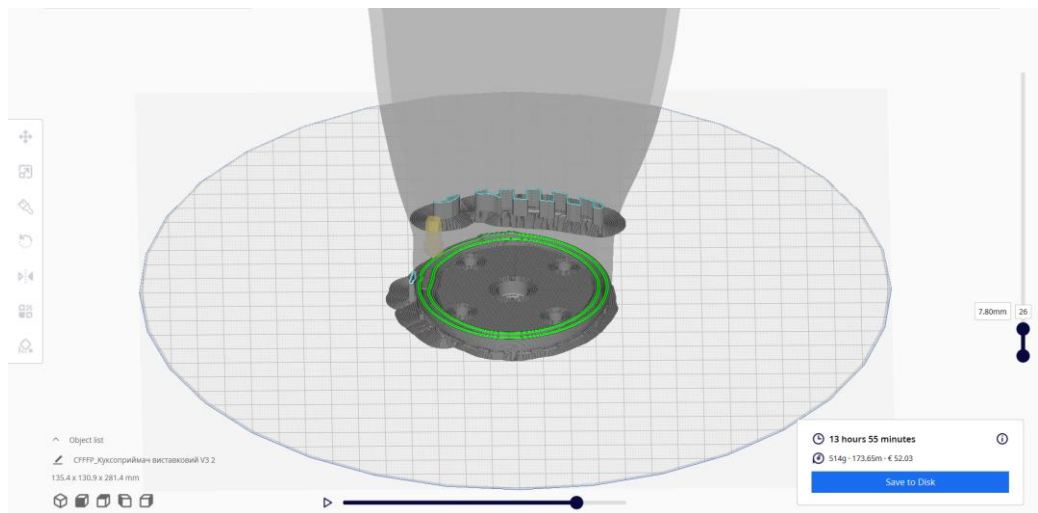
General features	
Length	78 cm
Width	85,5 cm
Height	195 cm (205 cm with wheels)
Approximated weight	120 kg
Noisiness	< 70 db (A)
Mechanical features	
Frame and cover	Metal sheet and aluminium
Print bed	Vacuum bed with base in machined aluminium, multiple printing plates
Movement	Rolling on anodized aluminium slide
Motors	Stepper Nema 17
Electrical features	
Input	220/240 V - 50/60 Hz
Absorbed power	Extruder: max 120W Heated bed : max 1300 W Heated chamber: max 1500 W
Use features	
Environment of use	20-30 °C
Warehouse	0-30 °C
Nozzle	max 350 °C
Heated bed	max 120 °C
Heated chamber	max 70 °C
3D printing Informations	
Technology	FFF
Cilndric build area	Ø 400 x 700 mm
Nozzle diameter	standard 0.7 mm (0.4 mm)
Layer resolution	50-350 micron
Maximum speed	200 mm/s
Filament diameter	1,75 mm
Suitable filaments	ABS, HIPS, PA CF, PMMA, PETG, PLA
Interface and software	
Operative systems	Windows, Mac, Linux
Supported slicing software	Simplify3D
File formats	.stl, .obj, .gcode
Interface	USB pendrive, TFT touch display, Wi-Fi

Рис. 3.8. Технічні характеристики 3Д принтер WASP-4070-ZX [63]

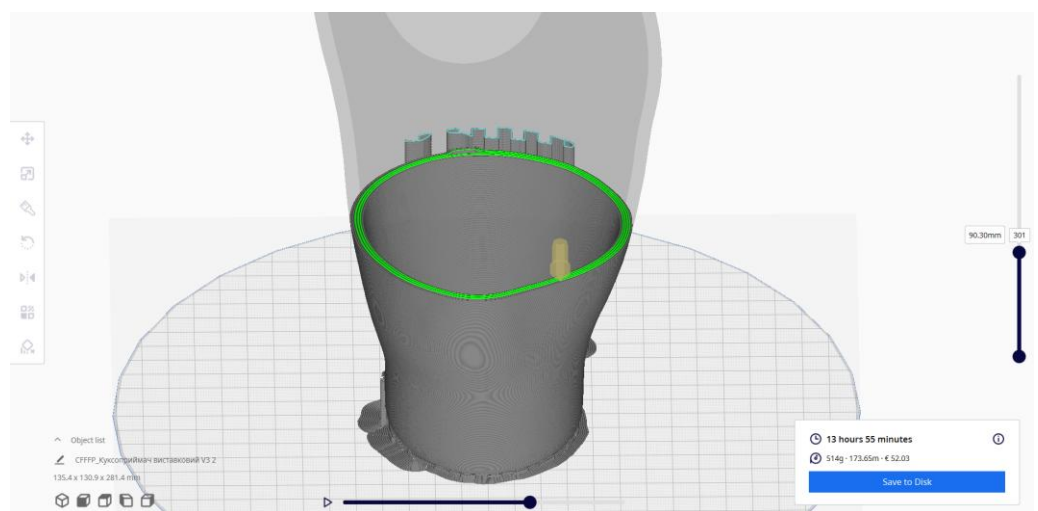
3.6 Написання управляючої програми

Технологічний процес розроблено у програмному забезпеченні UltiMaker Cura відповідно до рекомендацій із каталогів [56, 62, 63].

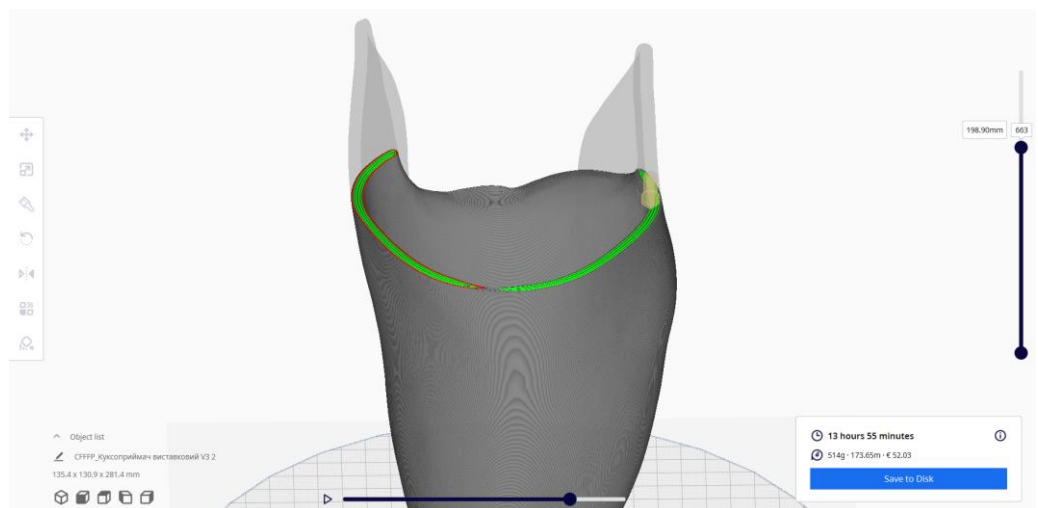
		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57



a

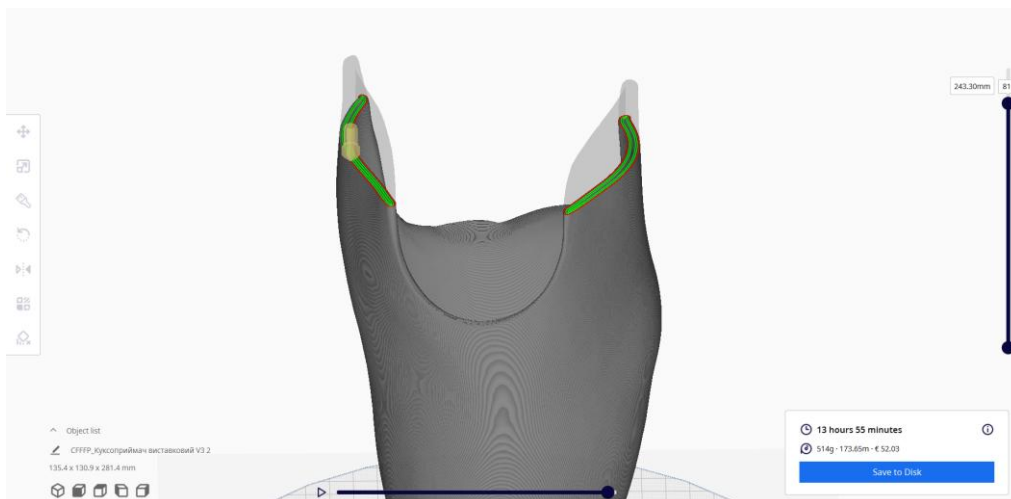


б



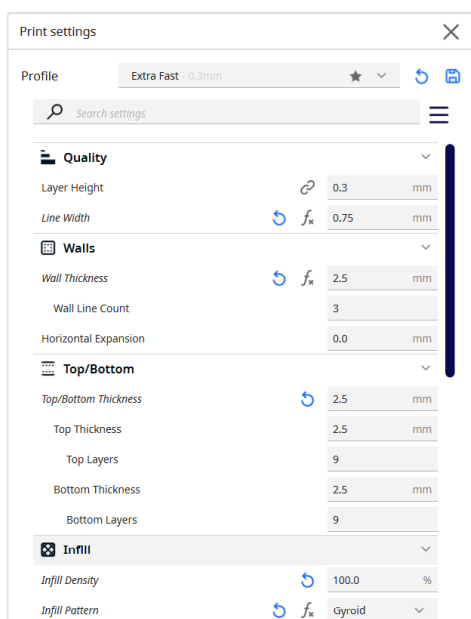
в

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

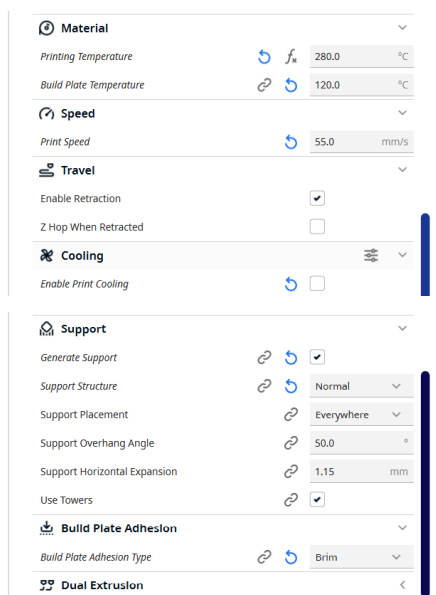


г

Рис. 3.9. Процес друку кукусприймача у програмному забезпеченні UltiMaker Cura: а, б, в, г



а



б

Рис. 3.10. Налаштування друку кукусприймача у програмному забезпеченні UltiMaker Cura: а, б

3.7 Постобробка

Після виготовлення кукусприймача на принтері виріб має пройти постоброблювальний етап для можливості його застосування.

Обробка складається із наступних кроків:

- механічне очищення;

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

- відпал;
- герметизація.

Механічне очищення – це зняття підтримок після 3Д друку. Їх видалення відбувається за допомогою кусачок.

Product information

78 61 125

Electronic Super Knips®

DIN ISO 9654



- Precision pliers for ultra fine cutting work, e. g. in electronics and fine mechanics
- Ground, very sharp cutting edges without bevel
- Precision shaped tips cut wires flush to a surface from Ø 0.2 mm.
- Shear cut with controlled micro cutting edge misalignment for the most precise cutting of even the thinnest of wires and for a long service life
- Joint with stainless steel rivet
- Extremely smooth movement for minimum operator fatigue
- With opening spring and opening limiter
- Also suitable for cutting glass fibre cables (fibre optics)
- Cutting edges additionally induction-hardened, cutting edge hardness approx. 64 HRC
- Special tool steel, oil hardened in multiple stages

General	
Article No.	78 61 125
EAN	4003773035404
Pliers	burnished
Head	burnished
Handles	with multi-component grips
weight	56 g
Dimensions	125 x 62 x 13 mm
Standard	DIN ISO 9654
Technische Attribute	
Style	6
Cutting capacities medium hard wire (diameter)	Ø 1.2 mm
Cutting capacities soft wire (diameter)	Ø 0.2 – 1.6 mm
	9 mm
	7.5 mm
Head width	13.5 mm
Classification	
eCl@ss 5.1.4	21040302
ETIM 5.0	EC000165
ETIM 6.0	EC000165
proficl@ss 6.0	AAA949c004
UNSPSC 13.1	27112149

Рис. 3.11. Кусачки Knipex Electronic Super Knips [64]

Ціна кусачок становить \$24,32 [65].

Для підвищення міцнісних характеристик матеріалу застосовується відпал. Відповідно до технічних характеристик РАНТ CF15 при виконанні даної обробки необхідно притримуватися наступних рекомендацій [56]:

- мати піч, що може розігріватися до 100 °C;
- зафіксувати деталь у печі для запобігання її деформацій під час відпалу.

Фіксація моделі проводиться за рахунок піску у формі для відпалу.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Кроки відпалу [56]:

- нагрівати куксоприймач від кімнатної температури до 90 °С протягом 60 хв;
- витримувати температуру 90 °С протягом 120 хв;
- охолодження проводити від 90 °С до кімнатної температури протягом 180 хв.

Герметизація куксоприймача виконується за рахунок медичної смоли для створення вакууму у середині виробу для подальшої фіксації кінцівки пацієнта. Смола має бути біосумісна, тому обрано Opti-tec 5006-1, як двокомпонентний нецитотоксичний матеріал, можливий у використанні у медичних цілях [66]. Ціна за картридж у 50 г становить \$25,21 [67].

3.8 Multi Jet Fusion – друк куксоприймачів

Для постійного носіння гільзи окрім стандартного методу із використанням негативного та позитивного зліпків кукси пацієнта та подальшого виготовлення моделі із карбонового волокна, також використовують метод друку порошком, а саме технологію Multi Jet Fusion (MJF). Популярною машиною для виробництва є HP Jet Fusion 5200.



Рис. 3.12. 3д принтер HP Jet Fusion 5200 [68]

Технологія виробництва наступна: інженер завантажує модель для друку у спеціалізовану програму, наприклад, Autodesk Fusion та розміщує її у друкуючій області, задає параметри друку. Спеціаліст завантажує у друкувальну машину юніт із поліамідом 12 (PA12) та через g-code машина друкує пошарово модель,

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

використовуючи інфрачервону лампу (Рис. 3.13) та сплавлювальний і деталізуючий реагенти [69]. Сплавлювальний реагент використовується для місць, де матеріал має сплавитися між собою, деталізуючий – необхідний для зменшення ступеня сплавлення, для отримання гладкої поверхні вихідного виробу.



Рис. 3.13. Інфрачервона лампа 8VJ63A для HP Jet Fusion [70]

Цикл друку розпочинається із нанесення тонкого шару матеріалу у області робочої зони. Далі каретка, що оснащена термоструменевими друкувальними голівками здійснює прохід зліва направо, наносячи хімічні реагенти. Процес утворення шару та термічного сплавлення під час проходження каретки №2 відбувається зверху вниз. Наведений процес повторюється до утворення деталі.

Після закінчення процесу друку юніт з порошком необхідно залишити для охолодження перед подальшою обробкою. Використовуючи технологію «Швидке охолодження» порошок варто залишити на 3 або 4 години для природного охолодження. Стандартний час для даної технології займає 6 годин для наполовину заповненої камери та 11 годин для повністю заповненого юніту матеріалом PA12 [69].

Після виготовлення деталі невикористаний порошок очищується спеціальною станцією обробки (Рис. 3.14).



Рис. 3.14. Станція обробки HP Jet Fusion 5200 3D [71]

Постобробку виготовленої деталі можна проводити різними методами:

- піскоструминна обробка для видалення налиплого матеріалу;
- обробка тиском для видалення залишків матеріалу залишених після піскоструминної обробки.

Також можливі інші варіанти обробки поверхні для покращення її якості:

- віброшліфування – деталь поміщається у віброшліфувальну машину з абразивним матеріалом для згладження нерівностей поверхні [69].
- ручне шліфування.

Нанесення кольору на вироби можливо виконувати трьома способами:

- піскоструминна обробка з додаванням кольорових добавок для досягнення однорідної обробки поверхні;
- занурення деталі у ванну для фарбування;
- фарбування деталі за допомогою балончика з розпилювачем, фарбопульту або пензля [69].

У разі необхідності на виробленні деталі можна нанести покриття для зносостійкості, термостійкості, міцності, водонепроникності, захисту від ультрафіолету тощо [69].

3.9 Висновки до технологічного розділу

У даному розділі дипломного проєкту було виготовлено куксоприймач методом адитивних технологій.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Обрано та обґрунтовано вибір матеріалу для друку. Наведено маршрутно-технологічний процес із профілем руху сопла. Також представлено два положення друку гільзи на принтері та обрано найкращий варіант відповідно до використаного часу на виробництво та грошових затрат на матеріал.

Наведено друкуюче сопло та FFF принтер для виробництва з їх технологічними характеристиками.

Написано управляючу програму у програмному забезпеченні UltiMaker Cura, використовуючи обрані налаштування друку залежно від матеріалу.

Представлено етапи постобробки виробу покроково. До кожного етапу обрано та наведено необхідні пристрої або компоненти із вказанням цін.

Додатково наведено інформацію про новітню технологію виготовлення кукосприймачів методом спікання порошку для постійного використання – Multi Jet Fusion. Представлено необхідне устаткування, технологічний процес, що включає кроки інженера для виготовлення моделі, додаткові компоненти для друку, спосіб охолодження та очищення отриманого виробу. Наведенні способи постобробки моделі та можливості її фарбування або покриття додатковими компонентами для зміни характеристик виробу.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

При роботі з установкою у дипломному проєкті за темою «Розробка експериментальної установки для багатоосьового навантаження та аналізу розподілу тиску в куксоприймачах протезів нижніх кінцівок» необхідно приймати до уваги фактори, які можуть нашкодити здоров'ю працівника на робочому місці. Для запобігання цього представлений четвертий розділ – «Охорона праці».

У даному розділі розглядатиметься відповідно до законів України про охорону праці рівні потенційної загрози працівників та необхідні способи захисту.

Потенційно шкідливими та небезпечними факторами під час роботи із установкою є:

- мікроклімат;
- виробниче освітлення;
- ураження електричним струмом;
- навантаження зорових якостей;
- пожежонебезпека.

4.1 Мікроклімат

Для забезпечення комфортних умов праці, на підприємстві необхідно контролювати наступні параметри: температура, вологість та швидкість руху повітря і швидкість теплового опромінення.

Головна діяльність при виготовленні та роботі з установкою відбуватиметься у приміщенні, тому оптимальні параметри встановлюємо для постійних робочих місць. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, вважаємо місце роботи постійним, оскільки на робочому місці працюючий знаходитиметься понад 50% робочого часу [72].

Робота з експериментальною установкою згідно до категорії робіт за ступенем важкості відповідає легким роботам, категорії Іб. Загальні енерговитрати організму становлять 121-150 ккал/год або 141-175 Вт.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Характеристика – роботи, що виконуються сидячі, стоячи або пов'язані з ходінням, та супроводжуються деякими фізичними напруженнями.

Таким чином, показники оптимальної величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень для категорії Іб повинні відповідати наступним показникам:

Табл. 4.1. Оптимальні показники мікроклімату робочого середовища

Період року	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху, м/сек.
Холодний період року	21-23	60-40	0,1
Теплий період року	22-24	60-40	0,2

Однак значення показників мікроклімату можуть знаходитися в допустимих межах, які наведені у таблиці Табл. 4.2

Табл. 4.2. Допустимі показники мікроклімату робочого середовища

Період року	Температура на постійних робочих місцях, °С	Відносна вологість (%) на робочих місцях – постійних і непостійних	Швидкість руху (м/сек) на робочих місцях – постійних і непостійних
Холодний період року	20-24	75	Не більше 0,2
Теплий період року	21-28	60	0,3-0,1

4.2 Виробниче освітлення

При роботі із експериментальною установкою, розглянутою у даному дипломному проєкті, працівник працюватиме у спеціалізованому приміщенні. Приміщення з постійним перебуванням людей повинні мати природнє освітлення.

Для розрахунку освітленості із оптимальною кількістю світильників використаємо формулу 4.1:

$$E_p = \frac{F_l \cdot N_p \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k_3 \cdot z}, \quad (4.1)$$

де $F_{\text{л}}$ – світловий потік, який випромінює кожна з ламп, лм, N_p – оптимальна кількість світильників, n – світильники типу ШОД, η – коефіцієнт використання світлового потоку, S – площа переміщення, м^2 , k_z – коефіцієнт запасу, z – коефіцієнт нерівномірності.

Оптимальну кількість світильників знайдемо за формулою 4.2:

$$N_p = \frac{S \cdot k_z \cdot z \cdot E_H}{F_{\text{л}} \cdot n \cdot \eta}, \quad (4.2)$$

де E_H – нормоване значення освітленості на робочому місці, $F_{\text{л}}$ – світловий потік, який випромінює кожна з ламп.

Приймаємо лампу ЛДЦ із потужністю 40 Вт, стеля приміщення біла $\rho_{\text{стелі}} = 0,7$, стіни світлі $\rho_{\text{стіни}} = 0,5$, коефіцієнт підлоги $\rho_{\text{підлоги}} = 0,1$, індекс приміщення $i = 0,95$. Довжина приміщення $a = 6$ м, ширина приміщення $b = 3,67$ м, висота приміщення $h = 5$ м, висота робочої поверхні $h_p = 0,8$ м.

Висота світильника над робочою поверхнею:

$$h_c = h - h_p = 5 - 0,8 = 4,2 \text{ м.}$$

Індекс приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h_c \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,67}{4,2 \cdot (6 + 3,67)} = 0,54.$$

Отже, оптимальна кількість світильників для загального штучного освітлення становить:

$$N_p = \frac{22 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 200}{2100 \cdot 2 \cdot 0,2} = 8,64 \approx 10.$$

Показник освітленості з оптимальною кількістю світильників становитиме:

$$E_p = \frac{2100 \cdot 8,64 \cdot 2 \cdot 0,2}{22 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 199,93.$$

Відсоток при оптимальній кількості світильників:

$$\frac{E_H - E_p}{E_H} \cdot 100\% = \frac{200 - 199,93}{200} \cdot 100\% = 0,00035\%.$$

Загальне штучне освітлення задовольняє вимогам ДБН.

		Дейлід			ДПО1.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

4.3 Ураження електричним струмом

Приміщення, в якому відбуваються робота із установкою та комп'ютерними обладнанням, є приміщенням з підвищеною небезпекою через наявність струмопровідної підлоги та можливості одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, які мають з'єднання із землею, з одного боку і до металевих корпусів з іншого [73].

Робота з електромережою має забезпечуватися правилами, головні з яких:

- конструкція, виконання, спосіб установлення, прокладання і клас ізоляції машини, апаратів, приладів та іншого застосовуваного електроустаткування, а також кабелів і проводів мають відповідати розрахунковим параметрам електроустановки, режимам її роботи, умовам навколишнього середовища [73];
- в електроустановках має бути забезпечено можливість легкого розпізнавання частин, які належать до окремих їх елементів (простота і наочність схем, належне розташування електроустаткування, написи, маркування, забарвлення) [73];
- захисні провідники у всіх електроустановках повинні мати буквене позначення РЕ чи кольорове позначення повздовжніми або поперечними смугами однієї ширини жовтого і зеленого кольорів. Нейтральний провідник позначають буквою N і блакитним кольором [73];
- буквено-цифрові позначення однойменних шин для кожної електроустановки мають бути однаковими [73].

Відповідно до ПУЕ 2017 граничний струм, що може протікати через тіло людини при нормальному режимі роботи електроустановки становить для змінного струму у 50 Гц не більше 0,3 мА, для постійного струму не більше 1,0 мА.

Для забезпечення електробезпеки та дотримання правил з охорони праці передбачені наступні організаційні та технічні заходи:

- ізоляція струмопровідних частин установки та комп'ютерної техніки;
- регулярне проведення технічного обслуговування;

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

- доведення працівників до відома правилам безпеки та інструктажів з електробезпеки.

4.4 Навантаження органів зору

При постійній роботі за комп'ютером основне навантаження припадає на органи зору. Виявлено збільшення симптомів астенопії у операторів, які через специфіку своєї діяльності, проводять більшу частину часу за комп'ютером із ведення, налагодження та аналізу програм.

Критичними чинниками, які впливають на вади зору, є нечітке зображення та мерехтіння на екрані дисплею. При користуванні таким дисплеєм більше 4 годин, гострота зору знижується приблизно в 2 рази. Також постійний напружений погляд на екран знижує частоту моргання.

Для забезпечення комфортних умов праці із комп'ютерною технікою необхідно:

- забезпечити раціональне освітлення робочих місць;
- використовувати сучасні монітори, які мають покращенні характеристики;
- дотримуватися режимів праці та відпочинку, рекомендованих санітарними нормами.

4.5 Пожежонебезпека

Для дотримання вимог пожежонебезпеки у проєкті передбачено систему зв'язку та оповіщення, вогнегасники порошкові універсальні та вуглекислотні для електрообладнання. Додатково присутні первинні засоби пожежогасіння, до яких відносяться пожежний інвентар та спеціалізовані інструменти.

Будівля оснащена евакуаційними виходами, сигналізацією, системою автоматичного виявлення пожежі, системою автоматичного вимикання струму у мережі та планом евакуації.

Головною причиною виникнення пожежі є: проблеми електромережі, використання пошкоджених кабелів та некоректне поводження з електроприладами.

Перелік дій та план поводження у разі виникнення пожежі доведено до співробітників.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

4.6 Висновок до розділу «Охорона праці»

У даному розділі було розглянуто потенційні загрози, які можуть виникнути на робочому місці при роботі із електричним та цифровим обладнанням.

Визначено показники мікроклімату, яким має відповідати робоче місце відповідно до стандартів окремо для двох періодів року залежно від складності та типу виконуваних робіт.

Розраховано кількість необхідних світильників для забезпечення оптимального рівня освітлення у приміщенні, визначено показник освітленості з оптимальною кількістю світильників та зроблено висновок, що таке місце зі штучним освітленням задовольняє вимогам ДБН.

У частині «Ураження електричним струмом» розглянуто та запропоновано правила, яких необхідно дотримуватися при роботі з електричними кабелями. Для забезпечення електробезпеки наведено способи маркування кабелів та передбачено організаційні та технічні заходи.

Для запобігання погіршення зору у працівників та забезпечення комфортних умов праці наведено перелік рекомендацій.

У разі виявлення пожежі на робочому місці працівники мають перелік обладнання для ліквідації полум'я. Якщо полум'я стає неконтрольованим, то, відповідно до наявного плану, персонал може покинути робоче приміщення через передбачені евакуаційні виходи.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даному дипломному проєкті створено експериментальну установку для вимірювання осьового навантаження у гільзі куксоприймача нижньої кінцівки людини при трансфеморальній ампутації, використовуючи пневматичні актуатори, систему автоматизації та новітні розробки і машини у сфері технології машинобудування.

У першому етапі проєкту наведено та розглянуто різні типи гільз куксоприймачів людини при трансфеморальній ампутації. Розглянуто різні способи кріплення датчиків і безпосередньо датчики та їх особливості під час зняття результатів навантаження в експериментальній установці.

Другим розділом забезпечена розрахункова частина проєкту. Спираючись на анатомію людини, було розташовано датчики у визначених місцях кукси. Особливу увагу приділено розрахунку пневматичних актуаторів та підбору і розрахунку пневматичних компонентів системи. Для забезпечення мобільності розроблено електричну схему та підібрано відповідні компоненти, пораховано необхідний об'єм акумуляторів. Щоб контролювати отримані дані від експериментальної установки дистанційно, за допомогою можливостей плати Arduino Mega та програмного забезпечення Arduino IDE прописано код для програмування системи. Також методом скінченних елементів проведено розрахунок та аналіз кріплення куксоприймача до металевого штативу протезу відповідно до різних фаз ходьби.

Технологія машинобудування демонструє розробку методики виготовлення куксоприймача нижньої кінцівки людини при трансфеморальній ампутації методами адитивних технологій.

Останній четвертий розділ забезпечує правилами та актуальними питаннями у сфері охорони праці відповідно до державних стандартів та рекомендації, які наведені у документах.

Таким чином, у дипломному проєкті продемонстровано можливість поєднання інженерної задачі з автоматизації із задачею біомеханіки. За допомогою роботи поєднано декілька підсистеми у комплексну автоматизовану

механотронну систему.

Розроблений проєкт може бути корисним у реабілітаційних центрах при налагоджуванні та корекції ергономіки гільз куксоприймачів для пацієнтів із ампутаціями нижніх кінцівок.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] S. B. Awuah, E. C. Egwuatu, C. I. Ezugwu, A. K.-A. Wright, K. K. Eze та I. P. S. Adebayo, «Prevalence and Overall Burden of Lower Limb Amputations in Patients with Severe Lower Extremity Injury Following Road Traffic Accidents: A Systematic Review and Meta-Analysis,» *Australian Journal of Biomedical Research*, т. 2, № 1, 2026.

[2] T. Dillingham, L. Pezzin, E. MacKenzie та A. Burgess, «Use and satisfaction with prosthetic devices among persons with trauma-related amputations: a long-term outcome study,» *Physical Medicine & Rehabilitation*, т. 80, № 8, pp. 563-571, 2001.

[3] Н. О. Гнатейко, Методичні вказівки до практичного заняття для студентів V курсу медичного факультету загальні питання травматології та ортопедії, Львів, 2021.

[4] J. Behr, J. Friedly, I. Molton, D. Morgenroth, M. P. Jensen та D. G. Smith, «Pain and pain-related interference in adults with lower-limb amputation: Comparison of knee-disarticulation, transtibial, and transfemoral surgical sites,» *Journal of Rehabilitation Research & Development*, т. 46, № 7, pp. 963-972, 2009.

[5] Physiopedia, «Принципи ампутації,» 03.2022. [Онлайновий]. URL: <https://langs.physio-pedia.com/uk/principles-of-amputation-uk/>. [Дата звернення: 11.04.2026].

[6] ТССС, «Ампутації нижніх кінцівок,» 11.2022. [Онлайновий]. URL: <https://tccc.org.ua/files/downloads/ch30-lower-extremity-amputations-asset-ua.pdf>. [Дата звернення: 15.04.2026]

[7] C. Colosimo, C. Fredericks, J. R. Yon, J. C. Kubasiak, F. Bokhari та S. Poulakidas, «Damage control hip disarticulation: two-stage operation with index creation of a large medial flap for the septic hip,» *Trauma Surgery & Acute Care Open*, т. 5, № 1, pp. 1-4, 05.08.2020.

[8] E. Esfandiari, A. Yavari, A. Karimi, M. Masoumi, M. Soroush та H. Saeedi, «Long-term symptoms and function after war-related lower limb amputation: A national cross-sectional study,» *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*, т. 52, № 5, pp. 348-351, 2018.

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

[9] American Academy of Orthopaedic Surgeons, «Transfemoral Amputation,» в *Atlas of limb prosthetics: surgical, prosthetic, and rehabilitation principles*, St. Louis, Mosby Year Book, 1992, pp. 501-525.

[10] F. A. Gottschalk, S. Kourosh, M. Stills, B. McClellan та J. Roberts, «Does Socket Configuration Influence the Position of the Femur in Above-Knee Amputation?,» *Journal of Prosthetics and Orthotics*, т. 2, № 1, pp. 94-102, 1989.

[11] M. JW, «Current concepts in above-knee socket design,» *Instr Course Lect*, pp. 373-378, 1990.

[12] C. W. Radcliffe, «Above-knee prosthetics,» *Prosthetics and Orthotics International*, т. 1, № 3, pp. 146-160, 1977.

[13] N. Nawaz, 2024. [Онлайновий]. URL: https://www.linkedin.com/posts/noor-nawaz-4a4312262_a-quadrilateral-socket-prosthetic-refers-activity-7131135613939929089-WtWf. [Дата звернення: 04.13.2026].

[14] M. Brodie, L. Murray та A. McGarry, «Transfemoral Prosthetic Socket Designs: A Review of the Literature,» *Journal of Prosthetics and Orthotics*, т. 34, № 2, pp. 1-30, 2021.

[15] N. Suzuki, M. Miyagi, Y. Furusawa, T. Miura, T. Agarie, Y. Imaizumi, C. Nakazawa, T. Takahashi, K. Obata, Y. Izumiyama, K. Nishijima, H. Miyauchi, N. Iwata, T. Sobu, Y. Sekiguchi, K. Ataka, K. Takahashi, M. Takeuchi, T. Okazaki та S. Ebihara, «Gait Acquisition with a Quadrilateral Socket after Ultra-short Transfemoral Amputation because of Staphylococcal Toxic Shock Syndrome,» *Progress in Rehabilitation Medicine*, т. 9, pp. 1-9, 2024.

[16] I. A. Long, «Normal shape-normal alignment (NSNA) above-knee prosthesis,» *Clinical Prosthetics and Orthotics*, т. 9, № 4, pp. 9-14, 1985.

[17] J. Sabolich, «Contoured adducted trochanteric-controlled alignment method (CAT-CAM) ; Introduction and basic principles,» *Clinical Prosthetics and Orthotics*, т. 9, № 4, pp. 15-26, 1985.

[18] fabcodesigns, «Bilateral AK ischial containment sockets,» 23.03.2021. [Онлайновий]. URL: https://www.instagram.com/p/CMw8IWOJAUG/?img_index=1. [Дата звернення: 13.04.2026].

[19] I. Loiret, C. Duraffourg, I. Permentiers, P. Barbazanges, G. Bokobza, M. Da Costa, E. Elie, N. Fons, C. Popineau, S. Rey, G. Roche, Y. Ronzi, M. Thomas-Pohl, R. Klotz та L. Calistri, «Subischial vs. Ischial Containment Sockets: A Multicenter Randomized Crossover Trial to Assess Comfort and Mobility in Daily Life Situations,» *Prosthesis*, т. 8, № 1, pp. 1-13, 2025.

[20] R. Pellegrini, G. Denza, S. Brunelli, D. Zenardi, M. Imperio, G. Vannozzi та M. Traballesi, «The hybrid subischial socket for persons with transfemoral amputation: gait parameters and clinical assessment of a case series,» *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, т. 4, № 1, pp. 1-7, 2021.

[21] S. Fatone, M. Dillon, R. Stine та R. Tillges, «Coronal plane socket stability during gait in persons with transfemoral amputation: Pilot study,» *Journal of Rehabilitation Research and Development*, т. 51, pp. 1217-1228, 2014.

[22] M. Guenther та G. Fiedler, «The Milwaukee - Socket: Scientific Findings as the Foundation of an Improved General Trans-Femoral Socket Design Concept,» *Orthopädie-Technik*, т. 2, № 11, pp. 93-95, 2011.

[23] Guenther Bionics GmbH, «Milwaukee Schaft,» 2023. [Онлайновий]. URL: <https://www.subischial-schaft.de/mwk-schaft/patienteninformation/>. [Дата звернення: 14.04.2026].

[24] Dwyer Instruments, LLC, «Diaphragm Strain Gauges,» [Онлайновий]. URL: <https://www.dwyeromega.com/en-us/force-and-strain/strain-gauge/c/diaphragm-strain-gauge?srsId=AfmBOoon5B7VWnScL7CvuslCGhUuvTmjvdAlY-8DCIMjRkJQxh70Meuq>. [Дата звернення: 15.04.2026].

[25] Viatran, «The Strain Gage Pressure Transducer,» [Онлайновий]. URL: https://www.viatran.com/static/media/uploads/white_papers/strain_gage_pressure_transducer_white_paper.pdf. [Дата звернення: 15.04.2026].

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

[26] A. Fiorillo, C. Critello та A. Pullano, «Theory, Technology and Applications of Piezoresistive Sensors: a Review,» *Sensors and Actuators A: Physical*, т. 281, pp. 1-76, 2018.

[27] M. I. Tiwana, S. J. Redmond та N. H. Lovell, «A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering,» *Sensors and Actuators A: Physical*, т. 179, pp. 17-31, 2012.

[28] M. H. Yassin, M. H. Farhat, R. Soleimanpour та M. Nahas, «Fiber Bragg grating (FBG)-based sensors: a review of technology and recent applications in structural health monitoring (SHM) of civil engineering structures,» *Discover Civil Engineering*, т. 1, pp. 1-39, 2024.

[29] HBK, «Frequently Asked Questions on Fiber Bragg Grating Technology & Systems,» [Онлайновий]. URL: <https://www.hbm.com/1629/fiber-bragg-grating-technology-explained/>. [Дата звернення: 16.04.2026].

[30] A. Al-Fakih, N. Abu Osman та F. Mahmad Adikan, «Techniques for Interface Stress Measurements within Prosthetic Sockets of Transtibial Amputees: A Review of the Past 50 Years of Research,» *Sensors for Globalized Healthy Living and Wellbeing*, pp. 1-30, 20 Jul 2016.

[31] Kyowa Electronic Instruments, «Small-sized Pressure Transducer,» [Онлайновий]. URL: <https://product.kyowa-ei.com/en/products/pressure-transducers/type-pgmc-a>. [Дата звернення: 14.04.2026].

[32] Мельник Г. В. Розробка методики оцінки ефективності протезування нижніх кінцівок : дис. ... д-ра філософії у галузі 16 Хім. інженерія та біоінженерія : 163 / Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Міністерство освіти і науки України. Київ, 2023. 161 с.

[33] Shenzhen Taida Century Technology Co., Ltd, «Taidacent Flexible Gait Analysis Piezoresistive Sensor Switch Thin Film Pressure Sensors RXD1016 Film Pressure Sensor Mat,» [Онлайновий]. URL: https://www.alibaba.com/product-detail/Taidacent-Flexible-Gait-Analysis-Piezoresistive-Sensor_62009710915.html. [Дата звернення: 14.04.2026].

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

[34] Technica Optical Components, «T60 / Small Diameter Fiber (Thin) FBG,» [Онлайновий]. URL: <https://technicasa.com/wp-content/uploads/2017/01/T60-Small-Diameter-Fiber-Thin-FBG.pdf>. [Дата звернення: 15.04.2026].

[35] Douglas G. Smith , John W. Michael та John H. Bowker, «Atlas of Amputations and Vascular Deficiencies (3rd Edition, 2002),» в «*Transfemoral Prosthetics*», Amer Academy of Orthopaedic, 2004, pp. 515-520.

[36] «Clinical investigation of the pressure and shear stress on the transtibial,» *Medical Engineering & Physics* 20, pp. 188-198, 20.11.1997.

[37] V S P Lee, S E Solomonidis та W D Spence, «Stump–socket interface pressure as an aid to socket design in prostheses for trans-femoral amputees - a preliminary study,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, pp. 167-180, 1 February 1997.

[38] V. T. Tran, S.-i. Yamamoto, A. Hanafusa, K. Ohnishi, H. Otsuka та Y. Agarie, «Analyzing the Shear Stress on the Contacting Interface During Ambulation with Transfemoral Prosthesis Socket,» *IFMBE Proceedings*, p. 102–110, 19.04.2021.

[39] J. Yang, P. Di, Q. Li, X. Wang, H. Ding, Y. Bai та S. Zhu, «Characterization of a Commercial Thin Film-based Pressure Sensor,» *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-6, 2021.

[40] Phillips C, Nagpal A та Azhari F, «A biofidelic mock residual limb for prosthetic socket testing,» *Canadian Prosthetics & Orthotics Journal*, т. 8, № 2, pp. 1-9, 2025.

[41] R. Niiyama, X. Sun, C. Sung, B. An, D. Rus та S. Kim, «Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design,» *Soft Robotics*, pp. 59-70, 06. 2015.

[42] BASF, «Ultrafuse TPU 95A,» 22.08.2022. [Онлайновий]. URL: https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Flexible%20Filaments/TPU%2095A/TDS/Ultrafuse_TPU-95A_TDS_EN_v1.0.pdf. [Дата звернення: 10.02.2026]

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

[43] Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка та Є. С. Уманський, «Розтяг і стиск. Механічні характеристики матеріалів,» в *Опір матеріалів*, Київ, Вища школа, 2004, pp. 83-112.

[44] I. Skeist та J. Miron, «Adhesive Selection and Screening Testing,» в *Handbook of Adhesives*, New York, Chapman & Hall, 1990, pp. 94-119.

[45] ASTM International, «Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test),» 2023. [Онлайновий]. URL: <https://u.dianyu.com/bbs/u/46/1162194485.pdf>. [Дата звернення: 21.02.2026]

[46] Avantor, Inc, «MED-2000,» 17.02.2020. [Онлайновий]. URL: <https://www.silicone-polymers.co.uk/pdfMaster/MED-2000.pdf>. [Дата звернення: 24.02.2026]

[47] Hilintec, «D40 Series Micro Piston Vacuum Pump & Compressor,» 07.01.2026. [Онлайновий]. URL: <https://mini-pump.com/documents/D40-Datasheet.pdf>. [Дата звернення: 09.04.2026]

[48] F. M. White, «Thermodynamic Properties of a Fluid,» в *Fluid Mechanics*, New York, McGraw-Hill, 2011, p. 21.

[49] В. К. Буслов, «Гідравлічний розрахунок і вибір розмірів трубопроводів,» в *Проектування об'ємних гідроприводів*, Київ, НТУУ "КПІ", 2008, p. 57.

[50] SMC, «3 Port Solenoid Valve,» [Онлайновий]. URL: https://static.smc.eu/pdf/S070_EU.pdf. [Дата звернення: 10.04.2026]

[51] «Arduino Mega 2560 Rev3,» [Онлайновий]. URL: <https://arduino.ua/prod243-arduino-mega-2560-rev3?srsId=AfmBOorKPNZcfNy1iM66JfkVMrjEzj8UauWHUpzlk2NmCfjLjq50j1-f>. [Дата звернення: 01.04.2026].

[52] «Arduino/Processing/Python Language Comparison,» [Онлайновий]. URL: <https://docs.arduino.cc/tutorials/generic/language-comparison/>. [Дата звернення: 11.01.2026].

[53] HP, «Datasheet PA 12 Extended-6,» [Онлайновий]. URL: <https://www.scribd.com/document/634505128/Datasheet-PA-12-Extended-6>. [Дата звернення: 26.04.2026].

[54] Д. С. Дейлід, О. С. Мусієнко, Б. М. Васильченко та О. А. Іщенко, «Модернізація скінченно-елементної моделі апарату зовнішньої фіксації,» в *X Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Об'єднані наукою: перспективи міждисциплінарних досліджень"*, м. Київ, КНУ ім. Т. Шевченка, 2023, pp. 76-78.

[55] Б. Ю. Красько, Д. С. Дейлід та О. С. Мусієнко, «Визначення оптимальної сітки для скінченно-елементного аналізу колінного суглоба з урахуванням аналітичної оцінки,» *Інновації молоді в машинобудуванні*, 12.05.2025.

[56] Forward AM, «Ultrafuse PAHT CF15,» 2025. [Онлайновий]. URL: <https://forward-am.com/material-portfolio/ultrafuse-filaments-for-fused-filaments-fabrication-fff/reinforced-filaments/ultrafuse-paht-cf15/#printing-profiles-paht-cf15>. [Дата звернення: 16.04.2026].

[57] Prashant Jindal, Prashant Prakash, Harsh Bassal, Prashant Singh, Muhammad Arsh M. Din, Cleveland T. Barnett та Philip Breedon, «Two-Material-Based Transtibial Socket Designs for Enhanced Load-Bearing Capacity Using FEA,» *MDPI*, p. 2, 13.03.2025.

[58] Forward am, «PAHT CF15 ultrafuse,» 2026. [Онлайновий]. URL: <https://filament2print.com/en/advanced/1928-paht-cf15-ultrafuse.html>. [Дата звернення: 18.04.2026].

[59] WASP, «4070 ZX,» 03.2022. [Онлайновий]. URL: <https://www.3dwasp.com/en/wasp-4070-zx/>. [Дата звернення: 19.04.2026].

[60] S. Lahtine, «Marlin/src/module/planner.cpp,» 18.02.2026. [Онлайновий]. URL: <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/blob/bugfix-2.1.x/Marlin/src/module/planner.cpp>. [Дата звернення: 19.04.2026].

[61] Pradeep Raja, Karthik Babu, Elif Kaynak та Oisik Das, «Impact of Design Variations and Infill Density in 3D-Printed PLA Components,» *MDPI*, pp. 1-12, 18.12.2025.

[62] WASP, «WASP ZEN X Extruder,» [Онлайновий]. URL: <https://www.3dwasp.shop/en/prodotto/dual-extruder-wasp-zen-extruder/>. [Дата звернення: 20.04.2026].

[63] WASP, «WASP 4070 ZX manual of use and maintainance,» 24.03.2022. [Онлайновий]. URL: https://www.3dwasp.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2022/04/Manual-WASP-4070-ZX-ENG.pdf. [Дата звернення: 20.04.2026].

[64] KNIPEX, «Electronic Super Knips,» 09.03.2020. [Онлайновий]. URL: https://www.tme.eu/Document/d89d437afcbeb744936ddbdf5102f9d7861125_en.pdf. [Дата звернення: 20.04.2026].

[65] KNIPEX, «Electronic Super Knips KNIPEX 78 61 125,» 2023. [Онлайновий]. URL: <https://www.knipex.com.ua/shop/kusachki-bokorizi-instrumenti-dlya-rizannya/electronic-super-knips-uk/electronic-super-knips-knipex-78-61-125?lang=uk>. [Дата звернення: 21.04.2026].

[66] Opti-tec, «Opti-tec 5006-1 Optically Clear ISO 10993 Epoxy Adhesive,» 11.2022. [Онлайновий]. URL: <https://intertronics.shop/wp-content/uploads/2023/11/OPT-5006-1-Product-Data-Sheet.pdf?srsltid=AfmBOoo58wJRksrjnbFOVJsDBTNQkhw1g2OZ3exjYyhZxXyUayLuc0Wv>. [Дата звернення: 23.04.2026].

[67] Intertronics, «Opti-tec 5006-1 Optically Clear ISO 10993 Epoxy Adhesive,» 2026. [Онлайновий]. URL: https://intertronics.shop/product/opti-tec-5006-1-optically-clear-iso-10993-epoxy-adhesive/?srsltid=AfmBOopWHnYHFB3ovr2mON6BIgLzqdHaxZ4Pp5InP7elwjfmjzpHm_S9. [Дата звернення: 24.04.2026].

[68] Europac 3D, «Final Part AddItive Manufacturing with Breakthrough Economics,» [Онлайновий]. URL: <https://europac3d.com/3d-printers/hp-jet-fusion-5200-uk/?srsltid=AfmBOorkMSNGfYAN6yGlqxBErQGM50P3InTn0HErtsMs-TdZFxaPVcGt>. [Дата звернення: 27.04.2026].

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

[69] HP, «HP Jet Fusion 5200 Series 3D Printing Solution User Guide,» 02.2026. [Онлайновий]. URL: https://kaas.hpcloud.hp.com/pdf-public/pdf_2445115_en-US-1.pdf. [Дата звернення: 27.04.2026].

[70] 3dgr_med, «8VJ63A Compatible heating lamps for HP Jet Fusion 42XX / 52XX | MJF 3D Printing,» [Онлайновий]. URL: https://www.ebay.com/itm/298149756799?_trkparms=itm%3D1%26aid%3D1110006%26rkt%3D2%26algo%3DHOMESPLICE.SIM%26mech%3D1%26algv%3DDefaultOrganicWebV9BertRefreshRankerWithCassiniEmbRecall%26pmt%3D0%26amclksrc%3DITM%26sd%3D298111621966%26sid%3DAQALAAAE01922kS. [Дата звернення: 27.04.2026].

[71] HP, «HP Jet Fusion 5200 3D Processing Station,» [Онлайновий]. URL: <https://support.hp.com/ua-uk/product/product-specs/hp-jet-fusion-5200-3d-processing-station/29099694>. [Дата звернення: 27.04.2026].

[72] МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ, «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99,» 01 12 1999. [Онлайновий]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>. [Дата звернення: 06.05.2026].

[73] Міненерговугілля України, «ПРАВИЛА УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК,» 21 07 2017. [Онлайновий]. URL: https://enext.ua/upload/books/pueh_ukraina_2017.pdf. [Дата звернення: 07.05.2026].

		Дейлід			ДП01.МА2102.00.00.00 ПЗ	Лист
		Семінська				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81