

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.ПМ-33.00.00.000.ПЗ

Група ПМ-21-1

МАТЕЙЧУК Діана Олегівна

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут інженерної механіки та робототехніки  
Кафедра: комп'ютеризованого машинобудування

Матейчук Діана Олегівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 678.027.3:691.175  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Установка для переробки ПЕТ-пляшок у нитку для 3D-друку  
(назва роботи)

Прикладна механіка  
(назва освітньої програми)

131 – Прикладна механіка  
(шифр і назва спеціальності)

---

Матейчук Д. О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Врюкало В.В., к.т.н., доцент кафедри КМВ

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

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

професор

(посада)

(підпис)

(дата)

Панчук В. Г.

(ініціали та прізвище)

Рецензент

---

(посада)

(підпис)

(дата)

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

м. Івано-Франківськ — 2025 рік

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра комп'ютеризованого машинобудування

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ**

Студенту Матейчук Діані Олегівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Установка для переробки ПЕТ-пляшок у нитку для 3D-друку

Керівник роботи Врюкало В.В. к.т.н., доцент кафедри КМВ

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "06" червня 2025 року № 332 / 7

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Реалізація технології виготовлення нитки для 3D-друку як одного з видів утилізації ПЕТ-пляшки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. 1 Технологічна частина

2. Технології 3D-друку та виготовлення філаменту

3. Конструкторська частина

Висновки

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

1. Складальне креслення РЕТаментора – 1 лист А1. 2.Складальне креслення

редуктора – 1 лист А1. 3. Електрична схема – 1 лист А1. 4. Креслення деталей - 6

листів А3. 5. Креслення деталей – 2 листи А4

### 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 - 5	Врюкало В.В., доцент каф. КМВ		

7. Дата видачі завдання 25.02.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер і назва етапів бакалаврського проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1. Загальна характеристика	10.03.2025	
2. Опис і конструкція навчального проєкту	20.03.2025	
3. Технологічна частина	01.04.2025	
4. Конструкторська частина	01.05.2025	
5. захист бакалаврської роботи	20.06.2025	

Студент \_\_\_\_\_ Матейчук Д.О.  
(особистий підпис) (розшифровка підпису)

Керівник \_\_\_\_\_ Врюкало В.В.  
(особистий підпис) (розшифровка підпису)

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

## Реферат

Бакалаврська робота на тему: Установа для переробки ПЕТ-пляшок у нитку для 3D-друку.

Дана робота складається зі 50 аркушів, 20 рисунків, 2 арк. А4 додатків.

Дипломна робота присвячена розробці концепції установки для переробки використаних поліетилентерефталатних (ПЕТ) пляшок у нитку (філамент), придатну для використання в технологіях 3D друку.

У дослідженні здійснено аналіз фізико-хімічних властивостей ПЕТ, а також розглянуто сучасні технології його переробки, зокрема подрібнення, сушіння, екструзію та формування нитки. Розглянуто приклади існуючих промислових і побутових установок для створення філаменту з переробленої сировини.

На основі проведеного аналізу сформульовано технічне завдання для розробки установки, визначено ключові вимоги до її продуктивності, споживання енергії, якості готової продукції та розмірів обладнання. Створено концепцію структури установки, описано її принцип роботи та основні параметри важливих вузлів.

Розроблене рішення орієнтоване на індивідуальних користувачів, заклади освіти та малі виробництва, сприяючи створенню локальних замкнених циклів переробки ПЕТ у корисну продукцію. Робота має вагомим екологічне, економічне та освітнє значення, стимулюючи впровадження принципів сталої інженерії.

Ключові слова: ПЕТ-пляшка, переробка, 3D друк, філамент, екструзія, адитивні технології, вторинна сировина.

Студент

Матейчук Д.О.

## Summary

Bachelor's Thesis Topic: A Device for Recycling PET Bottles into Filament for 3D Printing.

This work consists of 50 pages, 20 figures, 2 sheets of appendices.

The thesis is dedicated to the development of a concept for a device that recycles used polyethylene terephthalate (PET) bottles into filament suitable for use in 3D printing technologies.

The study includes an analysis of the physical and chemical properties of PET and an overview of modern recycling technologies, such as shredding, drying, extrusion, and filament formation. Existing examples of industrial and small-scale machines for producing filament from recycled material are reviewed.

Based on the conducted analysis, a technical specification for the device has been formulated, defining key requirements for its productivity, energy consumption, output quality, and overall dimensions. A structural concept of the system has been developed, along with a description of its operating principle and the main parameters of critical components.

The proposed solution is aimed at individual users, educational institutions, and small-scale manufacturers, promoting the creation of localized closed-loop PET recycling systems. The project has significant environmental, economic, and educational value, supporting the implementation of sustainable engineering principles.

Keywords: PET bottle, recycling, 3D printing, filament, extrusion, additive manufacturing, secondary raw materials.

Student

Mateichuk D.O.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	7
1.1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕРОБКИ ПЕТ ТА ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ .....	7
1.2 ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТУ (РЕТ).....	7
1.3 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕТ У 3D-ДРУЦІ .....	9
2. ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛАМЕНТУ .....	12
2.1 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ .....	12
2.2 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛАМЕНТУ З ПЕТ-ПЛЯШОК.....	14
2.3 МЕТОДИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ .....	16
2.4.АНАЛІЗ ФІЛАМЕНТІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ .....	21
2.5 РІЗНИЦЯ МІЖ ФАБРИЧНИМ РЕТG-ФІЛАМЕНТОМ І ПЕРЕРОБЛЕНИМ РЕТ- ФІЛАМЕНТОМ З ПЛЯШОК (rPET) .....	25
3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	27
3.1 КОНЦЕПЦІЯ ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА РОЗРОБКУ УСТАНОВКИ .....	27
3.2 ПРОГРАМА ARDUINO ТА СПЕЦИФІКА РОБОТИ З ПЛАТОЮ ARDUINO NANO.....	28
3.3 ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ.....	30
3.4 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ТА ПРИНЦИПУ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛАМЕНТУ З РЕТ-ПЛЯШОК .....	45
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТКИ.....	51

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		<i>Матейчук Д.О.</i>			Літ.	Арк.	Аркуші
Перевір.		<i>Врюкало В.В.</i>				4	54
Затверд.					<i>Пояснювальна записка</i>		
					<i>ІФНТУНГ ПМ-21-1</i>		

## ВСТУП

Проблема накопичення пластикових відходів стала однією з найбільш насущних екологічних та соціально-економічних викликів сьогодення. Щороку велика кількість пластикових матеріалів потрапляє у навколишнє середовище, що негативно позначається на природних екосистемах, особливо на морських та наземних біоценозах. Пластик має тривалий період розпаду, що спричиняє накопичення відходів і створює довгострокові загрози для флори та фауни. Вирішення цієї проблеми вимагає розробки ефективних методів переробки і повторного використання пластикових матеріалів.

Сучасні технології, такі як 3D-друк, відкривають нові можливості для утилізації пластикових відходів. Використання вторинної сировини для виготовлення філаменту, який потрібен для 3D-друку, є одним з шляхів зменшення екологічного навантаження та сприяння розвитку економіки замкнутого циклу. Переробка пластикових пляшок у філамент допомагає не лише скоротити обсяг пластикових відходів, але й знизити вартість матеріалів для адитивного виробництва.

Метою цієї дипломної роботи є розробка автоматизованого верстата для переробки пластикових пляшок у філамент для 3D-друку, який може бути застосований у різних сферах — від навчальних закладів до малих виробництв. Основне завдання полягає у створенні пристрою, здатного здійснювати переробку пластикових відходів на місці їх утворення, що зменшує потребу в транспортуванні і зберіганні відходів, а також оптимізує витрати на виробництво філаменту.

В роботі детально розглянуто основні методи переробки пластику, зокрема механічні та термічні способи, а також описано етапи проєктування та конструювання верстата. Особлива увага приділена питанням енергоефективності, надійності та екологічної безпеки розробленого обладнання.

Об'єктом дослідження є процес переробки пластикових відходів у філамент для 3D-друку. Предметом дослідження виступають технологічні

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

методи та інженерні рішення, застосовувані при створенні автоматизованого верстата для переробки пластику.

Актуальність теми полягає в необхідності створення простого, економічного й екологічного рішення для локальної переробки пластикових відходів у корисний матеріал з доданою вартістю.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>6</i>

# 1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Теоретичні основи переробки ПЕТ та властивості матеріалу

Оскільки в цій роботі розглядається проблема переробки пластикових пляшок, більшість із яких виготовлено з поліетилентерефталату (PET), важливо проаналізувати його властивості та характеристики. Поліетилентерефталат, як представник класу полієфірів, є одним із найпоширеніших матеріалів для виробництва пластикової упаковки й широко відомий під різними комерційними назвами. Цей полімер утворюється шляхом поліконденсації етиленгліколю з терефталевою кислотою, формуючи структуру з так званою "зоною кристалізації".

### 1.2 Характеристика поліетилентерефталату (PET)

Однією з основних характеристик PET є показник в'язкості, який залежить від довжини молекулярного ланцюга полімеру. Завдяки своїй структурі PET ефективно утримує кисень всередині упаковки і частково перешкоджає виходу вуглекислого газу, що позитивно впливає на якість та терміни зберігання продуктів. Варто зазначити, що цей матеріал здатний витримувати значні механічні навантаження, такі як розтягування чи багаторазові згини, що посилює його функціональність.

Серед переваг PET слід виділити його високу здатність до переробки. Цей полімер можна очистити та використовувати повторно для створення нових виробів, наприклад, у вигляді вторинних пляшок, текстильних матеріалів чи філаментів для 3D-друку. Водночас PET має обмеження у використанні — наприклад, його не рекомендують для пакування гарячих харчових продуктів або для тривалого зберігання певних видів їжі.

З точки зору прикладних характеристик PET як матеріал для 3D-друку має кілька помітних переваг: він кристально прозорий, ударостійкий і демонструє

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

високу термостійкість у робочому інтервалі температур від -40 до +75 °С. Полімер також вирізняється стійкістю до стирання, є хорошим діелектриком і має високу хімічну інертність, не піддаючись впливу олій, спиртів, кислот, лугів та парафінів.

Крім цього, PET чудово підходить для постобробки: готові вироби з нього легко шліфуються, ґрунтуються, фарбуються і покриваються лаком. Такий набір характеристик робить цей матеріал універсальним і широко застосовуваним у багатьох сферах. Проте важливо враховувати екологічний аспект: виробництво та утилізація PET-виробів вимагають ретельного підходу для мінімізації їхнього негативного впливу на довкілля. Надзвичайно важливо впроваджувати ефективні системи збору та переробки цього корисного полімеру для забезпечення його раціонального повторного використання.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

### 1.3 Аналіз застосування ПЕТ у 3D-друці

Огляд літератури та аналіз існуючих рішень у сфері використання ПЕТ-матеріалів для 3D-друку виявляє ключові аспекти їхньої популярності та функціональних властивостей. У цьому розділі приділено увагу основним характеристикам ПЕТ, його поведінці під час виготовлення ниток та застосуванню в різних контекстах. Такий аналіз дозволяє глибше зрозуміти переваги та виклики, пов'язані з використанням цього матеріалу у відповідних технологіях.

Поліетилентерефталат (ПЕТ) є термопластичним полімером, який знайшов широке застосування, насамперед в упаковці (особливо для виготовлення пластикових пляшок). Цей матеріал характеризується винятковою міцністю, високою хімічною стабільністю, прозорістю і бар'єрними властивостями проти проникнення вологи та газів, що зумовлює його ідеальну придатність для харчової промисловості.

#### Основні фізико-хімічні характеристики матеріалу:

Поліетилентерефталат має хімічну формулу  $(C_{10}H_8O_4)_n$  і демонструє набір унікальних властивостей.

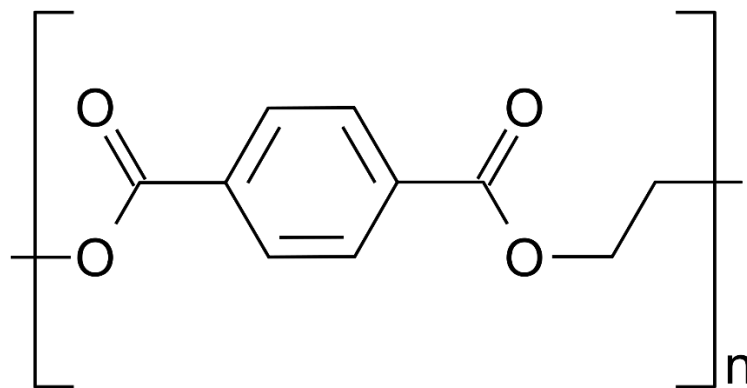


Рис. 1.1 Поліетилентерефталат

Температура плавлення коливається в межах 250-260 °С, що дозволяє йому зберігати стійкість в умовах підвищених температур. Склеювання спостерігається за температури близько 70-80 °С. Матеріал може витримувати значне навантаження, адже рівень міцності на розрив досягає 50-75 МПа, а модуль пружності становить приблизно 2-3 ГПа. Відносна густина 1.38 г/см<sup>3</sup> забезпечує оптимальну вагову структуру полімеру. Що важливо, ПЕТ відзначається стійкістю до впливу масел, жирів та більшості органічних і неорганічних розчинників.

### **Властивості ниток з ПЕТ для 3D-друку:**

На сучасному етапі розвитку адитивних технологій ПЕТ, трансформований у нитку для 3D-друку (позначається як PET чи PETG), є одним із найпопулярніших матеріалів завдяки ряду переваг. Серед них варто зазначити високу міцність і жорсткість ниток, що забезпечує готовим виробам довговічність та надійність. Хімічна стійкість матеріалу робить його актуальним для створення функціональних прототипів чи деталей. Важливою перевагою є гарна адгезія між друкованими шарами під час роботи з ПЕТ, що мінімізує ризики формування розшарувань. До того ж матеріал майже не виділяє запаху під дією тепла, що сприяє комфортнішому процесу друку.

Незважаючи на те, що ПЕТ досить стійкий до впливу вологи, перед використанням нитки рекомендується попередня сушка матеріалу для забезпечення якісного результату. Що стосується міцності та гнучкості надрукованих деталей, ці параметри багато в чому залежать від складу конкретного матеріалу. Приміром, формула PETG забезпечує більшу гнучкість порівняно зі стандартним PET.

### **Особливості ниток з вторинного ПЕТ:**

Ще одним напрямком використання цього полімеру є виробництво ниток зі вторинного ПЕТ, яке має свої особливості. Часто така сировина відзначається нижчою однорідністю та чистотою, що може негативно вплинути на стабільність друкованого процесу. З огляду на це, одним із ключових завдань є очищення й

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

правильна сушка початкової сировини для запобігання дефектам. Наприклад, пухирців у структурі нитки чи нерівностей поверхні. Процес переробки також потребує точного контролю над температурними режимами екструзії, щоб полімер не втратив своїх базових характеристик.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

## 2. Технології 3D-друку та виготовлення філаменту

### 2.1 Огляд технологій 3D-друку

3D-друк являє собою пошарове створення фізичного об'єкта на основі комп'ютерної 3D-моделі, використовуючи матеріали, такі як пластик, гіпс, метал, фотополімери та інші. Існує кілька основних технологій 3D-друку, кожна з яких має свої особливості і сферу застосування.

Метод моделювання пошарового наплавлення (Fused Deposition Modeling або FDM) є найпоширенішим. Ця технологія базується на використанні термопластичного філаменту, який нагрівається і плавиться, після чого друкувальна головка видавлює матеріал, формуючи кожен шар об'єкта.

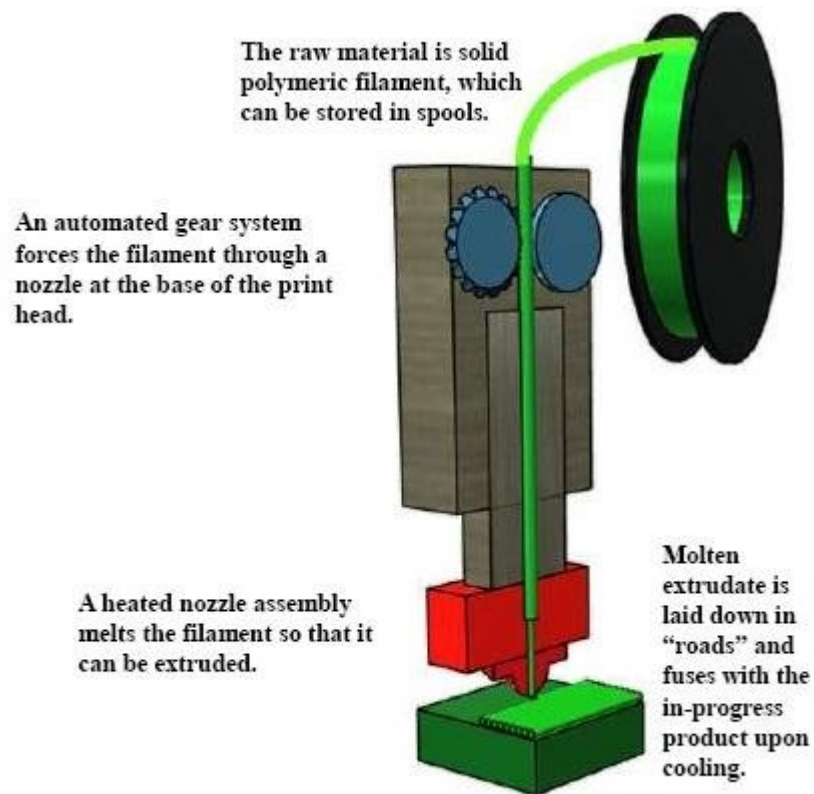


Рис. 2.1 Метод моделювання пошарового наплавлення

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Стереолітографія (Stereolithography або SLA) працює з рідким фотополімером, який твердне під впливом ультрафіолетового випромінювання. Кожен стандартний SLA 3D-принтер зазвичай складається з чотирьох основних компонентів:

- Цистерна заповнена рідким фотополімером. Рідка смола зазвичай є прозорим і рідким пластиком.
- Перфорована платформа занурена в бак: платформа опускається в бак і може переміщатися вгору та вниз відповідно до процесу друку.
- Високоєфективний ультрафіолетовий лазер
- Комп'ютерний інтерфейс, який керує як платформою, так і лазерними рухами.[5]

Ця технологія забезпечує високу точність і якість поверхні, тому її широко використовують у ювелірній справі та стоматологічному протезуванні.

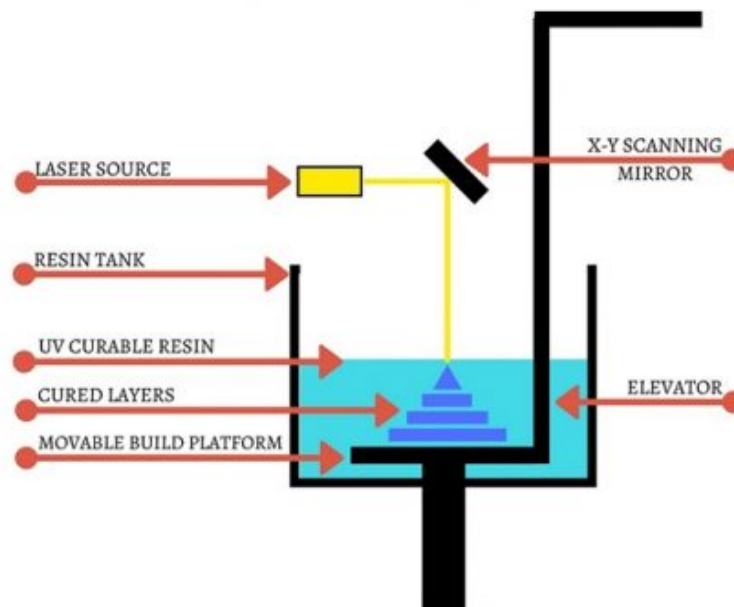


Рис.2.2 Стереолітографія

Селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering або SLS) застосовує лазер для з'єднання тонких шарів порошкового матеріалу (переважно полімерів або металів). Завдяки цій технології можливо створювати деталі складної геометрії без додаткових опорних структур.



4. Охолодження. Щойно сформований філамент проходить через систему охолодження (найчастіше це водна ванна), у результаті чого він твердне й отримує стабільну форму.

5. Намотування і упаковка. Завершальним етапом є намотування філаменту на катушки, контроль якості та його подальша упаковка для продажу чи зберігання.

Цей процес дозволяє ефективно створювати філаменти з різних типів пластику, включаючи вторинну сировину, сприяючи більш екологічному використанню матеріалів.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>15</i>

### 2.3 Методи переробки пластикових відходів

Існує широкий спектр технологій та методів для кожного з етапів виготовлення філаменту, і вибір певного підходу залежить від багатьох факторів. Серед них можна виокремити тип пластику, доступність обладнання, вимоги до якості продукції та бажані характеристики філаменту. Наприклад, окремі виробники застосовують двошнекові екструдери, які забезпечують більш рівномірне змішування та плавлення пластику, тоді як одношнекові екструдери найчастіше використовуються для виготовлення простіших типів філаменту. У деяких випадках також використовують спеціалізовані технології, як-от реактивне екструдювання або додавання добавок, що дозволяє створювати філаменти з унікальними властивостями.

Подальше перероблення пластику для виробництва філаменту може реалізовуватися за допомогою кількох основних методів:

1. Механічна переробка: передбачає подрібнення пластикових відходів, очищення від домішок, сортування за типом та просіювання на частинки певного розміру.

2. Хімічна переробка: під час цього підходу пластикові відходи розчиняються у відповідному розчиннику, після чого проходять процеси осадження та очищення.

3. Піроліз: це термохімічний процес, у якому пластикові відходи розкладаються при високих температурах у безкисневому середовищі. У результаті утворюються газоподібні й тверді продукти, які згодом можуть бути перетворені на філамент для 3D-друку.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



5. Охолодження: сформований філамент швидко охолоджується для збереження форми та запобігання деформаціям. Для цього часто застосовують повітряне охолодження.

6. Намотування на катушку: завершальний етап полягає у намотуванні філаменту на катушку за допомогою редуктора та двигуна. Швидкість намотування підтримується на оптимальному рівні для уникнення перекручень і нерівномірностей.

Процес вимагає ретельного контролю температурних режимів, швидкості витягування та інших ключових параметрів для досягнення високої якості й точності філаменту.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

На сучасному ринку доступні різноманітні типи обладнання для переробки ПЕТ-пляшок у філамент, необхідний для 3D-друку. Ці установки відрізняються за масштабом використання, функціональними можливостями та рівнем автоматизації, що дає змогу вибрати оптимальне рішення для різних потреб.

### 1. Установки для домашнього або невеликого виробництва

Таке обладнання найкраще підходить для хобістів, невеликих майстерень чи лабораторій, де здійснюється тестування або дослідницькі роботи. Установки цього типу зазвичай включають базові компоненти, такі як шредер, екструдер та намотувач:

- Прикладами є Filabot і Recyclebot — компактні DIY-установки для перетворення ПЕТ-пляшок у філамент.

- Переваги такого обладнання: невисока ціна, невеликі габарити й придатність до використання в обмежених умовах.

- До недоліків відносять низьку продуктивність і необхідність значного ручного втручання в робочі процеси.

### 2. Промислові установки

Цей тип обладнання розроблений для переробки великих обсягів ПЕТ-сировини на підприємствах. Вони включають такі етапи процесу, як дроблення, очищення, сушіння, грануляція, екструзія та змотування:

- Відомими виробниками промислових установок є Erema, Starlinger і Next Generation Recyclingmaschinen.

- Основні переваги: висока продуктивність, автоматизація ключових етапів і стабільна якість готового продукту.

- Недоліками є висока вартість, значне енергоспоживання та великі розміри, що потребують спеціальних приміщень.

### 3. Установки повного циклу переробки

Новітні технологічні розробки дозволили створити установки, які об'єднують всі ключові етапи переробки прямо на одному пристрої — від стадії перетворення

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

пляшки до отримання готового філаменту. Такі системи оснащені власними модулями очищення матеріалу, екструзії та намотування:

- Відомими прикладами є прототипи обладнання, які створюються в дослідницьких лабораторіях університетів або в рамках інноваційних проєктів стартапів. Цей підхід дозволяє отримувати практично готовий до використання продукт безпосередньо з відходів ПЕТ.

- Серед переваг систем інтегрованого циклу слід зазначити суттєве скорочення часу на переробку та зниження пов'язаних витрат, забезпечуючи при цьому високу екологічність процесу.

- Проте складність технології та значна залежність від точності калібрування можуть стати потенційною перешкодою для масового впровадження цих рішень у повсякденне використання.

Таким чином, кожен із представлених видів установок має свої переваги й недоліки, що дозволяє обирати обладнання залежно від цілей, масштабів виробництва та фінансових можливостей.

- Основні переваги: мінімізація часу і витрат на переробку, екологічність процесу та економія ресурсів.

- Недоліки: складність у налаштуванні та висока технологічна вимогливість, що може обмежувати їх широке застосування в практичному використанні.

Таким чином, присутність широкого спектра доступного обладнання дозволяє адаптувати його до різних завдань — від домашнього використання до великомасштабного виробництва. З огляду на розвиток технологій у цьому напрямі, у найближчому майбутньому очікується поява ще більш досконалих і універсальних рішень.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

## 2.4. Аналіз філаментів для 3D-друку

Основні типи філаментів для 3D-друку пропонують широкий вибір матеріалів, кожен зі своїми унікальними характеристиками, які задовольняють різноманітні потреби в прототипуванні, виробництві та дизайні.

### 1. PLA (Полілактид):

Цей термопластичний поліефір біологічного походження отриманий з полілактидної кислоти має густину близько  $1.24 \text{ г/см}^3$  і забезпечує межу міцності на розрив у межах 50–70 МПа. З температурою розм'якшення між  $55\text{--}60^\circ\text{C}$ , PLA відзначається високою жорсткістю, хоч і крихкістю, та має низьку стійкість до ультрафіолету. Завдяки своїй біорозкладності в промислових умовах компостування за 45–90 днів, PLA є оптимальним при виготовленні прототипів з обмеженими вимогами до теплостійкості, але при механічних навантаженнях може зазнавати ламання.

### 2. ABS:

Цей матеріал, будучи сополімером із акрилонітрилу, бутадієну і стиролу, має густину в середньому  $1.04 \text{ г/см}^3$  та межу міцності від 40 до 50 МПа, з розм'якшенням при  $105^\circ\text{C}$ . ABS відзначається високою ударною вязкістю і добре підходить для функціональних виробів. Він стійкий до олів, кислот, лугів, однак при нагріванні може виділяти токсичні пари стиролу. Широко використовується в автомобільній промисловості та побутовій техніці.

### 3. PETG (Поліетилентерефталат-гліколь):

Цей модифікований гліколем філамент з хімічною формулою  $(\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4)_n$  має густину приблизно  $1.27 \text{ г/см}^3$  та забезпечує міцність на рівні 45–50 МПа з температурою розм'якшення від  $80$  до  $85^\circ\text{C}$ . PETG об'єднує властивості PLA і ABS: він міцніший за PLA, але легший у друці ніж ABS, а також відрізняється відмінною хімічною стійкістю і може бути використаний для створення об'єктів, що контактують з харчовими продуктами.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



- Завдяки наявності вуглецевого волокна, поверхня після друку має матову текстуру, що додає естетичної привабливості виробам, а також матеріал має низький рівень усадки.

- Висока абразивність — одна з важливих особливостей цього матеріалу. У процесі друку латунні сопла швидко зношуються, тому рекомендується використовувати сопла зі сталі або їх загартовані варіанти.

Застосування:

З огляду на свої технічні характеристики, армований вуглецевим волокном пластик широко використовується для виготовлення деталей і об'єктів з високими вимогами до міцності та терміну служби, зокрема:

- Створення дронів і їхніх частин, які мають витримувати великі механічні навантаження.
- Виробництво спортивного спорядження, такого як легкі, але міцні елементи для зниження ваги.
- Створення механічних кріплень та інших конструктивних деталей у вузлах механізмів.
- Прототипування в автомобільній промисловості, де важливе поєднання стійкості до навантажень і естетичного зовнішнього вигляду.

## **6.2. Metal-Fill (металізований філамент)**

Основа: PLA із додаванням 30–60% дрібнодисперсного порошку металів, таких як мідь, бронза, латунь або алюміній.

Густина: 2,5–3,5 г/см<sup>3</sup>.

Властивості:

- Значно важчий порівняно зі звичайним PLA.
- Піддається шліфуванню та поліруванню.
- Має теплопровідність, але не вирізняється високою структурною міцністю.
- Потребує використання жорсткого сопла через абразивні властивості матеріалу.

Застосування: сувенірна продукція, прикраси та декоративні елементи.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

### **6.3. Wood-Fill (філамент із деревною стружкою)**

Основа: PLA з додаванням 10–30% деревного порошку (зазвичай соснового, дубового або бамбукового).

Температура друку: 190–210°C.

Властивості:

- Відтворює текстуру та навіть запах натуральної деревини.
- Піддається шліфуванню, лакуванню або іншим способам обробки.
- Через структуру філамента існує ймовірність забивання сопел друкарського пристрою.

Застосування: виготовлення дизайнерських об'єктів, архітектурних моделей і макетів.

### **6.4. Glow-in-the-dark (світлочутливі філаменти)**

Основа: PLA або PETG з додаванням флуоресцентного порошку, такого як Aluminate Sr.

Особливості:

- Має здатність заряджатися при наявності світла і випромінювати сяйво у темряві.

Застосування: виготовлення нічних міток, декору та інших декоративних предметів.

### **6.5. Conductive Filament (провідний філамент)**

Основа: PLA чи ABS із додаванням вуглецевих наночастинок або графену.

Властивості:

- Електропровідність у межах  $10^1$ – $10^3$  Ом/см.

Застосовується для створення друкованих електронних схем і сенсорів.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2.5 Різниця між фабричним PETG-філаментом і переробленим PET-філаментом з пляшок (rPET)

### 1). Походження матеріалу

Фабричний PETG виготовляється на основі поліетилентерефталату (PET), модифікованого гліколем (звідси «G» у назві). Додавання гліколю запобігає кристалізації полімеру при охолодженні, завдяки чому він стає гнучкішим і стабільнішим під час 3D-друку.

Перероблений PET (rPET) отримується шляхом подрібнення та переплавлення використаних пластикових пляшок. Це вторинна сировина, яка зазвичай не модифікується гліколем, що зумовлює зовсім іншу поведінку при друці

### 2). Фізико-механічні властивості

Фабричний PETG має стабільні характеристики: високу гнучкість, міцність, добру адгезію між шарами, низьку усадку. Він прозорий, з хорошою поверхневою якістю та блиском. Підходить для друку виробів із середнім навантаженням, зокрема функціональних прототипів, контейнерів, корпусів.

Перероблений PET з пляшок зазвичай є жорсткішим, але менш гнучким, більш крихким і схильним до розтріскування. Через наявність домішок або старіння полімеру втрачається еластичність, а структура шару стає неоднорідною. Крім того, rPET набагато активніше поглинає вологу, що призводить до утворення бульбашок при друці.

### 3). Якість друку та технологічні аспекти

PETG є одним із найбільш "дружніх" філаментів до користувача: він легко друкується, має ширший температурний діапазон, добре прилипає до платформи й не вимагає повністю закритої камери.

Друк із rPET вимагає досвіду та часто — попередньої обробки матеріалу: сушки, фільтрації, контролю діаметра нитки. Матеріал може поводитися

										Арк.
										25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ					

непередбачувано, особливо якщо пляшки були різного походження або ступеня забруднення.

#### **4). Екологічний аспект**

Фабричний PETG, хоч і вважається умовно перероблюваним, виробляється з первинної сировини. Він менш шкідливий, ніж ABS, але не є біорозкладним. Натомість rPET є екологічно обґрунтованим рішенням, адже дозволяє зменшити обсяг пластикових відходів. Його використання у 3D-друці особливо доцільне в навчальних закладах, екологічних ініціативах, дослідницьких лабораторіях, де пріоритетом є не стільки якість, скільки принцип утилізації.

#### **5). Зовнішній вигляд і обробка виробів**

Вироби з PETG зазвичай мають гладку поверхню, блиск, достатньо прозорі. Їх можна фарбувати, клеїти або обробляти механічно.

Вироби з rPET часто мають шорстку, матову або мутнувату поверхню. Через вміст домішок колір може бути не рівномірним. Також вони гірше піддаються шліфуванню й обробці.

#### **6). Області застосування**

PETG застосовується в галузях, де важлива міцність, термостійкість і прозорість. Це корпуси приладів, ємності, пристрої побутового призначення.

rPET доцільний для експериментальних проєктів, навчального моделювання, друку макетів і декоративних предметів. Для серійного виробництва чи відповідальних деталей він малоприсадибний через нестабільні властивості.

#### **7). Висновок різниці між фабричним PETG-філаментом і переробленим PET-філаментом з пляшок (rPET)**

Фабричний PETG — це технічно стабільний, якісний матеріал для функціонального 3D-друку, тоді як перероблений PET з пляшок — це переважно експериментальний або екологічний варіант з більшою кількістю технологічних викликів. Його застосування має сенс за умов належної переробки та контролю якості, але воно поступається фабричному аналогу за передбачуваністю та надійністю друку.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

## 3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Концепція та технічне завдання на розробку установки

#### Постановка технічного завдання

У межах дипломної роботи передбачається розробити компактну установку для переробки використаних ПЕТ пляшок у нитку (філамент) для 3D друку. Установка повинна забезпечувати повний цикл обробки, включно із сушінням, плавленням, екструзією та намотуванням готового продукту. Пристрій призначений для індивідуального користування, освітніх цілей або застосування на малих виробничих підприємствах.

Мета полягає у створенні економічно доцільного та функціонального обладнання, яке дозволить організувати замкнений цикл переробки пластикових пляшок без залучення великомасштабної промислової техніки.

#### Якість продукції (філаменту)

- Поверхня продукту має бути гладкою, без дефектів у вигляді пухирців чи краплень.
- Діаметр нитки повинен залишатися стабільним по всій її довжині.
- Виключення сторонніх домішок забезпечується ефективною фільтрацією.
- Філамент має бути сумісним зі стандартними FDM 3D-принтерами.

#### Експлуатаційні вимоги

- Простота монтажу та легкість обслуговування системи.
- Можливість швидкого очищення та повторного запуску після використання.
- Наявність елементів безпеки, зокрема теплоізоляції і систем аварійного вимкнення.

#### Екологічні вимоги

- Мінімальні впливи на довкілля, виключення відкритих процесів згоряння.
- Переробка ПЕТ без застосування токсичних добавок.
- Забезпечення можливості утилізації залишкових матеріалів.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27



## **Основні етапи роботи з Arduino Nano включають:**

1. Побудова схеми підключення: до аналогових або цифрових пінів плати під'єднують зовнішні пристрої — сенсори, кнопки, світлодіоди, двигуни, дисплеї тощо.

2. Написання скетчу у середовищі Arduino IDE. У програмі наявні дві ключові функції:

- `setup()` — виконується одноразово під час запуску плати, відповідає за ініціалізацію пристроїв і пінів.

- `loop()` — виконується циклічно, забезпечує основну логіку керування.

3. Завантаження скетчу на плату через USB-підключення.

4. Виконання програми безпосередньо мікроконтролером, який керує підключеними елементами відповідно до заданого алгоритму.

### **Особливості використання Arduino Nano**

- Завдяки компактному форм-фактору плата легко встановлюється на макетні плати (breadboard).

- Підтримує як живлення через USB-кабель, так і з зовнішнього джерела (від 7 до 12 В).

- Для підключення до комп'ютера застосовується чип USB-UART (наприклад, CH340 чи FT232), для роботи з яким інколи потрібне встановлення додаткового драйвера.

- Arduino Nano отримала широке визнання у спільноті розробників через доступність документації, відкритих бібліотек та підтримку багатьох користувачів.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

### 3.3 Проектування електричної схеми

Електрична частина пристрою є модулем, що забезпечує живлення, керування та взаємодію всіх складових системи. Вона реалізує збір інформації з датчиків, обробку та передачу електричних сигналів, необхідних для виконання заданих функцій, зокрема регулювання температури, обертання виконавчого механізму та взаємодії з користувачем.

Електрична схема складається з кількох основних вузлів, одним із них є мікроконтролер Arduino Uno, який виконує роль керуючого вузла, здійснюючи логічну обробку даних, отриманих із периферійних елементів, таких як енкодер, та надсилає дані на драйвер крокового двигуна ТВ6600. Другим вузлом служить термостат W3230 з термопарою К-типу. Підключення нагрівального елемента через термостат із використанням термопари забезпечує підтримання стабільної температури у заданому діапазоні. Виконавчий механізм — кроковий електродвигун типу NEMA 17 — керується за допомогою драйвера ТВ6600, що отримує відповідні сигнали з мікроконтролера.

Енергозабезпечення системи здійснюється за допомогою стабілізованого імпульсного блоку живлення, який подає напругу живлення на всі елементи схеми відповідно до їх технічних характеристик. Взаємодія між компонентами відбувається за допомогою дротових з'єднань, що утворюють електричну мережу пристрою. У сукупності, електрична частина забезпечує надійне та точне функціонування пристрою відповідно до технічного завдання.

Живлення електричної частини пристрою здійснюється за допомогою імпульсного блоку живлення постійного струму з напругою живлення 110-260 В, потужністю 240 Вт, номінальною вихідною напругою 12 В. Максимальний вихідний струм становить 20 А, що забезпечує достатній запас потужності для стабільної роботи всіх елементів системи, зокрема мікроконтролера, драйвера крокового двигуна, нагрівального елемента та допоміжних пристроїв.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30



Рис. 3.2 Імпульсний блок живлення 12 В, 240 Вт.

Імпульсний принцип роботи дає змогу суттєво зменшити габаритні розміри блоку живлення та підвищити його енергоефективність. Для захисту від перегріву та забезпечення надійного тепловідведення у конструкції передбачено вбудований кулер з автоматичним регулюванням швидкості обертання, що активується за потреби. Це дозволяє уникнути перегрівання навіть у разі тривалої роботи під максимальним навантаженням.

Блок живлення слугує єдиним джерелом енергії для всіх компонентів пристрою. Живлення подається окремими лініями на силові елементи, зокрема на драйвер двигуна та нагрівальний елемент, а також на мікроконтролер та термостат, щоб уникнути просідання напруги при роботі нагрівального елемента і забезпечити стабільну роботу пристрою.

## Система нагріву та контролю температури на основі термостата W3230 та нагрівального елемента 12 В, 60 Вт.

Нагрів на плавлення стрічки в один пруток забезпечує нагрівальний блок запозичений з класичного екструдера 3D принтера. Нагрівання якого забезпечує нагрівальний елемент з напругою живлення 12 В та потужністю 60 Вт.



Рис. 3.3 Нагрівальний елемент 12 В.

Підключення нагрівального елемента відбувається двома провідниками. Один провідник підключений безпосередньо до позитивного полюсу джерела живлення. Другий провідник підключений до вбудованого електричного реле термостата W3230 (клема S0), яке перериває подачу напруги від негативного полюсу імпульсного блоку живлення.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32





Рис. 3.5 Термостат W3230.

Цей модуль є самостійним вузлом регулювання, який працює за принципом порогового порівняння: задається значення бажаної температури, після чого пристрій керує подачею напруги на нагрівач відповідно до фактичних вимірювань температури. Підтримує широкий діапазон контролю температури — від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$ , що дає змогу використовувати його у більшості побутових і технічних застосувань. Робоча напруга пристрою становить 12 В постійного струму. Максимальний струм комутації вихідного реле — 10 А, що дозволяє безпосередньо керувати потужними нагрівальними елементами.

Термостат оснащений цифровим дисплеєм та кнопками керування, що дають змогу зручно встановлювати граничні значення температури та гістерезису. У процесі роботи термостат постійно порівнює поточне значення температури з установленими межами й автоматично подає або припиняє напругу на нагрівальний елемент. Така схема дозволяє уникнути перегріву й забезпечити необхідний тепловий режим роботи пристрою

### Інструкція:

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34



та швидкодія термопари дозволяють швидко реагувати на зміну температури нагрівального елемента, що є важливим для підтримання стабільності процесу.



Рис. 3.6 Термопара К-типу.

Варто також зазначити, що використання окремого апаратного термостата спрощує структуру системи, підвищує її надійність.

### **Енкодер як елемент інтерфейсу користувача**

Для реалізації зручного способу введення параметрів та взаємодії з користувачем у пристрої застосовується модуль енкодера типу КУ-040. Даний енкодер виконує функцію поворотного імпульсного датчика та дозволяє змінювати значення змінних у програмі мікроконтролера без використання складних засобів введення. Зокрема, він забезпечує встановлення значень

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

швидкості оборотів крокового двигуна, зміни напрямку обертання за допомогою обертання ручки та відповідно натискання на вісь енкодера.

Модуль KY-040 складається з механічного обертового енкодера з двома цифровими виходами (А та В), які формують квадратурні імпульси, а також вбудованої кнопки, що активується натисканням на вал енкодера. Принцип роботи пристрою базується на виявленні черговості змін сигналів на каналах А та В, що дає змогу визначати як сам факт обертання, так і його напрямок.

Модуль працює в діапазоні живлення 3,3–5 В та має низьке енергоспоживання, що дозволяє підключати його безпосередньо до входів мікроконтролера Arduino Uno. Завдяки чіткому тактильному клацанню користувач може легко контролювати кількість обертів. Типова роздільна здатність становить 20 кроків на оберт, хоча програмно може бути реалізовано й більшу дискретність при необхідності.

Енкодер KY-040 є зручним і надійним елементом для організації ручного керування параметрами пристрою, особливо в умовах обмеженого простору або за відсутності дисплея з сенсорним керуванням. Його використання підвищує ергономіку конструкції та забезпечує інтуїтивно зрозумілий спосіб взаємодії з системою.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

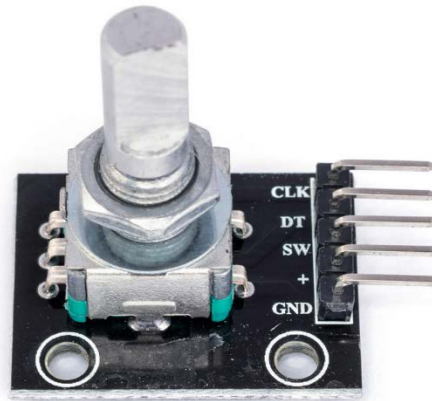


Рис. 3.7 Енкодер типу KY-040.

### Плата керування Arduino Uno

Елементом керування електричної частини пристрою є мікроконтролерна плата **Arduino Uno**, яка забезпечує обробку вхідних сигналів від енкодера, взаємодію з виконавчими елементами та реалізацію алгоритмів управління у відповідності до закладеної програми.

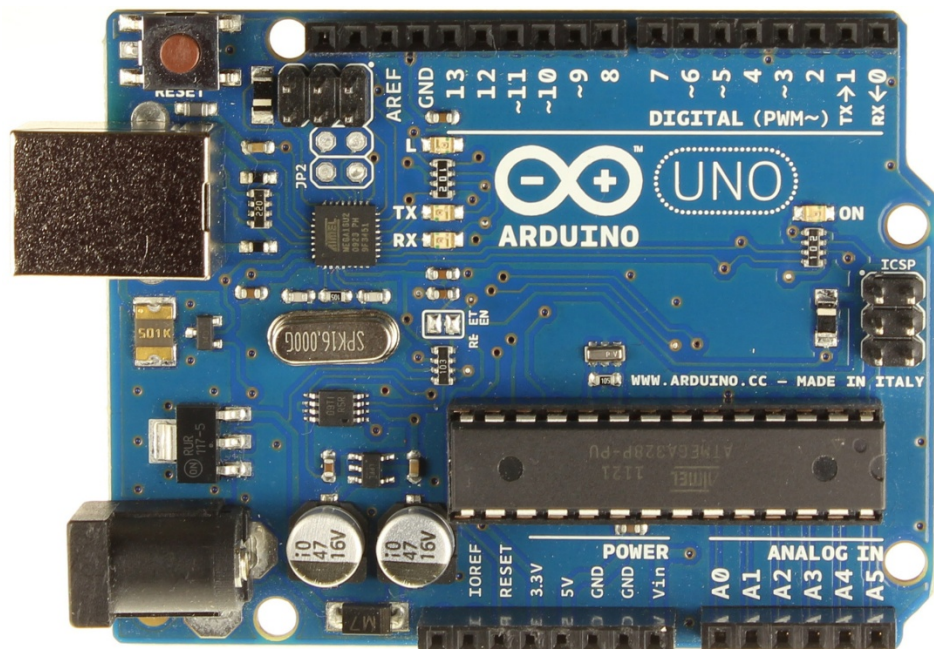


Рис. 3.8 Мікроконтролерна плата **Arduino Uno**.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

*БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ*

Арк.

38

Плата Arduino Uno побудована на основі 8-бітного мікроконтролера **ATmega328P** і характеризується високою надійністю, енергоефективністю та простотою у використанні. Arduino Uno має роз'єм USB типу B для програмування та живлення, а також роз'єм живлення постійного струму (DC power jack), що дозволяє підключати зовнішні джерела напругою 7–12 В. Вбудований стабілізатор дозволяє знизити напругу до робочого рівня 5 В.

До її основних характеристик належать:

- **Тактова частота** — 16 МГц;
- **Обсяг флеш-пам'яті** — 32 КБ (з яких 0,5 КБ зарезервовано для завантажувача);
- **Оперативна пам'ять (SRAM)** — 2 КБ;
- **Постійна пам'ять (EEPROM)** — 1 КБ;
- **Кількість цифрових входів/виходів** — 14, з яких 6 можуть використовуватись як ШІМ-виходи;
- **Аналогові входи** — 6 каналів (10-бітні АЦП);
- **Напруга живлення** — 5 В;
- **Робоча напруга логіки** — 5 В (сумісна з 3,3 В через резистивний подільник або логічні перетворювачі).

Перевагою використання Arduino Uno є її відкритість, підтримка численних бібліотек та активна спільнота розробників, що значно спрощує інтеграцію сторонніх компонентів, зокрема таких як термостати, енкодери, драйвери крокових двигунів, тощо. Програмування мікроконтролера здійснюється мовою, наближеною до C/C++, через середовище **Arduino IDE**, що забезпечує зручну платформу для розробки та налагодження програмного забезпечення пристрою.

У даному проекті Arduino Uno реалізує такі основні функції:

- 1) Прийом команд від енкодера та інтерпретація введених параметрів;
- 2) Формування сигналів керування драйвером ТВ6600 для задання кроків кроковому двигуну;

									Арк.
									39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ				

- 3) Забезпечення логіки керування нагрівальним елементом через реле або транзисторний ключ (опціонально);
- 4) Зберігання або обробка налаштувань у змінних програми.

### **Система приводу: драйвер ТВ6600 та кроковий двигун NEMA 17**

У конструкції пристрою для виконання обертальних рухів використовується кроковий електродвигун типу NEMA 17 у поєднанні з драйвером ТВ6600, що забезпечує високоточне керування рухом за допомогою мікроконтролера.

#### **Драйвер ТВ6600**

Драйвер ТВ6600 є високопродуктивним контролером для біполярних крокових двигунів, який підтримує як повнокроковий, так і мікрокроковий режими роботи. Він забезпечує перетворення логічних сигналів з мікроконтролера (Arduino Uno) у послідовність електричних імпульсів необхідної полярності та тривалості, що подаються безпосередньо на обмотки двигуна. Завдяки цьому досягається точне керування положенням та швидкістю виконавчого елемента.

Основні характеристики драйвера ТВ6600 включають підтримку струму до 4 А на фазу (регулюється перемикачами на корпусі), робочу напругу живлення у діапазоні 9–42 В постійного струму, та наявність оптоізоляції, що підвищує електробезпеку й завадостійкість системи. Пристрій також дозволяє встановлювати мікрокроковий режим до 1/32 від повного кроку, що суттєво підвищує плавність руху. Для теплового захисту та стабільної роботи драйвер оснащено радіатором охолодження, який ефективно відводить надлишкове тепло.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



Рис. 3.9 Драйвер крокового двигуна TB6600.

### Кроковий двигун NEMA 17

Кроковий двигун типу NEMA 17 є одним із найпоширеніших у сфері 3D-друку, ЧПК-технологій та робототехніки завдяки своїй компактності, достатній потужності та високій точності. Двигун цього стандарту має типову довжину корпусу близько 40–48 мм, а розмір монтажної фланцевої поверхні становить 1,7 дюйма (43,2 мм). Стандартна модель забезпечує 200 повних кроків на один оберт (тобто  $1,8^\circ$  на крок).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ

Арк.

41



Залежно від типу керування (повнокрокового чи мікрокрокового), можна досягти різного рівня плавності ходу. У мікрокроковому режимі на обмотки подається частково зміщений струм, що дозволяє реалізувати дроблення одного кроку на кілька проміжних позицій, підвищуючи роздільну здатність та зменшуючи вібрацію.

Застосування крокового двигуна в поєднанні з драйвером TB6600 забезпечує точне позиціонування та контроль динаміки руху, що є критично важливим у системах, де вимагається висока точність, наприклад, у робототехніці, координатному переміщенні виконавчих механізмів або подачі матеріалу.

### **Підсумки Електричної частини пристрою.**

У даному підрозділі було розглянуто склад, принцип дії та характеристики основних елементів електричної частини пристрою. Комплексне поєднання модулів — таких як плата керування Arduino Uno, термостат W3230 з термопарою типу К, енкодер KY-040, драйвер крокового двигуна TB6600 та сам кроковий двигун типу NEMA 17 — забезпечує надійне функціонування пристрою в умовах підвищених вимог до точності, стабільності та керованості.

Особливу увагу приділено питанню енергозабезпечення системи, що реалізовано за допомогою потужного імпульсного джерела живлення, здатного підтримувати одночасну роботу як виконавчих, так і керуючих компонентів. Кожен з обраних елементів має достатній технічний ресурс та функціональні можливості для ефективного виконання поставлених завдань, зокрема: стабілізації температури, зчитування та інтерпретації користувачького вводу, а також реалізації точного позиціонування рухомих частин.

Таким чином, електрична частина пристрою є інтегрованою системою, в якій забезпечено взаємодію апаратних модулів та програмної логіки. Така архітектура дозволяє досягти високої ефективності, функціональної гнучкості та потенціалу до подальшої модернізації чи масштабування.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

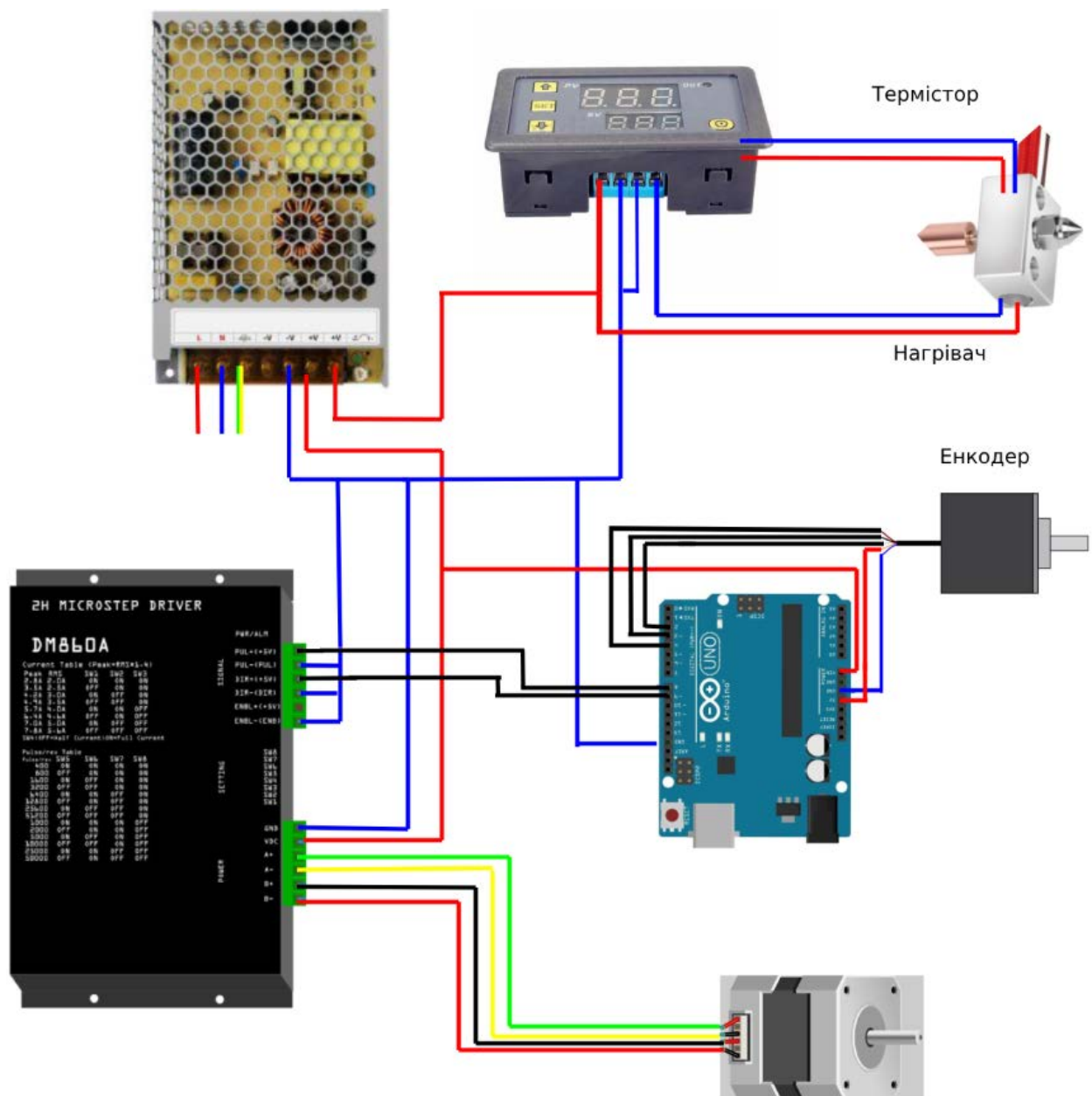


Рис. 3.12 Електрична схема

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ

Арк.

44

### 3.4 Опис конструкції та принципу роботи установки для виготовлення філаменту з PET-пляшок

У рамках дипломної роботи була створена функціонально завершена, технологічно адаптивна установка для перетворення полімерних стрічок, одержаних із використаних PET-пляшок, у філамент для 3D-друку. Основною перевагою цієї установки є її компактність, економічність, простота обслуговування та використання виключно доступних матеріалів. Всі функціональні вузли системи змонтовані на дерев'яній основі з розмірами 650×250×15 мм, що забезпечує жорсткість конструкції, термічну стабільність при роботі нагрівальних елементів і зручність у компонуванні всіх блоків.

Першим елементом системи є вузол подрібнення пластикової пляшки на стрічку заданої ширини. Його конструкція побудована з урахуванням принципів доступного інжинірингу: ріжучими елементами є сточені по торцях зовнішні обойми підшипників серії 608zz, які обертаються навколо вертикальних осей. Їх торцеві поверхні сточено таким чином, щоб забезпечити функцію різальних кромок.

Ключовою інновацією розробленої установки є модуль термічного з'єднання країв стрічок. Це дозволяє забезпечити безперервність виробництва нитки-філаменту, що особливо важливо під час виготовлення об'ємних моделей у 3D-друці. Конструкція блоку передбачає нагрівання паяльника до 260 °C і стискання накладених кінців стрічок на кілька секунд, після чого утворюється однорідне з'єднання без механічних слабких зон.

Наступним критичним етапом є перетворення стрічки у філамент. Цей процес реалізується у формувальному блоці, оснащеному соплом діаметром 1,75 мм із вбудованим нагрівачем і конічною вхідною частиною. Скручування стрічки перед екструзією відбувається пасивно внаслідок геометрії входу, після чого матеріал рівномірно розплавляється при температурі близько 210 °C. Регулювання температури здійснюється на основі зчитування даних з термодатчика й контролюється платою Arduino.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



Рис. 3.13 Екструдер

Сформована нитка подається до блоку приймання, де реалізовано охолодження, вирівнювання та змотування філаменту. Вузол змотування включає котушку, встановлену на вал редуктора, який знижує частоту обертання від привідного крокового двигуна до робочого рівня 17–25 об/хв. Конструкція редуктора побудована на базі трирівневої зубчастої передачі з шевронними зубами, які гарантують плавність ходу та зменшення вібрацій.

Співвідношення зубів 8:32, 12:36, 11:55 забезпечує передавальне число 1:60, що дозволяє досягти високої точності подачі та намотування без пропусків і натягів нитки.

Частини редуктора, корпусу, кріплень були надруковані з PLA-філаменту на 3D-принтері в Центрі інноваційного розвитку ІФНТУНГ, що свідчить про потенціал використання 3D-друку для створення інженерних рішень для повторного використання полімерних ресурсів.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



Подальше вдосконалення можливе у напрямі автоматизації процесів калібрування, а також розробки закритої системи охолодження з регульованим повітряним потоком.

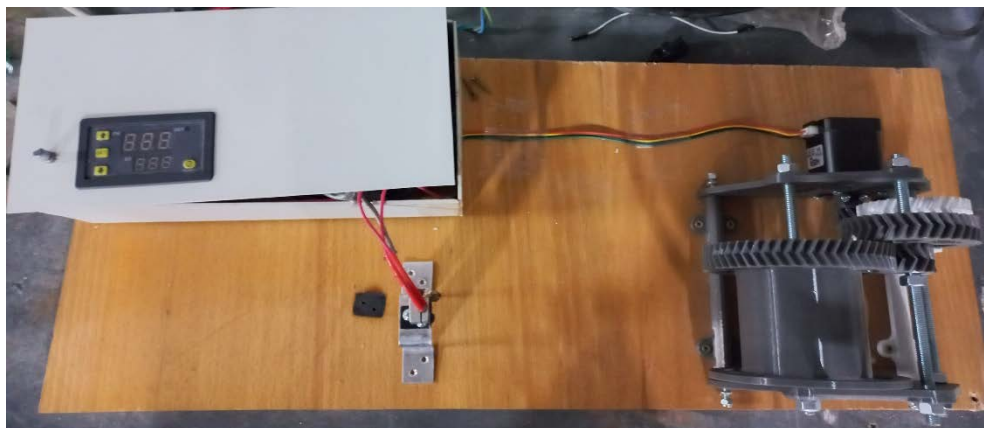


Рис.3.15 РЕТamentor

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		48

## Висновки

У бакалаврській роботі проведено детальний аналіз можливостей переробки поліетилентерефталату (ПЕТ) у філамент для 3D-друку. Досліджено особливості властивостей ПЕТ як полімеру, вивчено основні методи його вторинної переробки та специфіку використання у форматі філаменту. Доведено, що повторне використання пластикових пляшок знижує екологічне навантаження, одночасно створюючи доступний ресурс для адитивного виробництва.

Розглянуто сучасні технології 3D-друку, зокрема технологію FDM, яка є найпоширенішою для роботи з термопластичними матеріалами. Виконано порівняння різних типів філаментів і визначено переваги та виклики використання переробленого ПЕТ у порівнянні з фабричним PETG.

На основі отриманих даних розроблено технічне завдання для проектування установки, здатної перетворювати ПЕТ на філамент. Окреслено ключові функціональні, експлуатаційні та екологічні вимоги до такої установки.

Система автоматичного керування установки складається з таких основних елементів: плата Arduino, термодатчик, нагрівач, контролер двигуна, кроковий двигун та програмне забезпечення (скетч), написане в середовищі Arduino IDE.

Таким чином, дослідження підтверджує актуальність створення компактного та енергоефективного обладнання для локальної переробки пластикових відходів у філамент, що може бути корисним для освітніх закладів, наукових лабораторій і невеликих виробничих підприємств. Виконана робота відкриває перспективи для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію процесу екструзії і вдосконалення якості вторинного філаменту.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

## Список використаних джерел

1. Arduino. URL: <https://www.arduino.cc/>.
2. Електронний ресурс: <https://petamentor2.com/>.
3. A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication. - URL: <https://www.mdpi.com/2504-4494/5/3/69>.
4. Електронний ресурс: <https://www.theguardian.com/environment/2017/jun/28/a-million-a-minute-worlds-plastic-bottle-binge-as-dangerous-as-climate-change>.
5. Стереолітографія. URL: <https://www.3dprinter.ua/stereolitografiya-shho-potribno-znaty-pro-tehnologiyu/>.

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

# ДОДАТКИ

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Назва	К-сть.	Прим.
				<u>Документація</u>		
			БП.ПМ-33.00.000.ПЗ	Пояснювальна записка	1	
A1			БП.ПМ-33.01.000.СБ	Складальний кресленик редуктора	1	
A1			БП.ПМ-33.02.000.СБ	Складальний кресленик	1	
A1			БП.ПМ-33.03.000	Електрична схема	1	
				<u>Деталі</u>		
A3	1		БР.ПМ-33.00.001	Блок шестерень 32/12	1	
A3	2		БР.ПМ-33.00.002	Блок шестерень 36/11	1	
A3	3		БР.ПМ-33.00.003	Шестерня 55	1	
A3	4		БР.ПМ-33.00.004	Рама	2	Дзеркальні
A3	5		БР.ПМ-33.00.005	Шестерня	1	
A3	6		БР.ПМ-33.00.006	Частина котушки	1	
A4	7		БР.ПМ-33.00.007	Реборда котушки	1	
A4	8		БР.ПМ-33.00.008	Кріплення рамок	2	
				<u>Стандартні вироби</u>		
				Гвинт:		
				M8	3	
				M5	2	
				Гайка:		
				M8	6	
				M5	4	
				Підшипник 8x16x5	6	
				Кроковий двигун NEMA17	1	
<b>БП.ПМ-33.00.000</b>						
Зм.	Арк.	Нодокум.	Підп.	Дата		
Розроб.		Матейчук Д.О.			Літ.	Арк.
Перев.		Врюкало В.В.				Аркушів
Н.контр.					<b>ІФНТУНГ</b>	
Утв.					<b>ПМ-21-1</b>	
<b>Загальний вигляд редуктора</b>						
<b>Специфікація</b>						

```

#define CLK 2 // Пін CLK енкодера
#define DT 3 // Пін DT енкодера
#define STEP_PIN 53 // Пін STEP для драйвера двигуна
#define DIR_PIN 52 // Пін DIR для драйвера двигуна

volatile int encoderValue = 0; // Значення енкодера
int lastStateCLK;
int speedDelay = 500; // Початкове значення затримки для швидкості

void setup() {
    pinMode(CLK, INPUT);
    pinMode(DT, INPUT);
    pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
    pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);

    // Встановлюємо напрямок обертання в одну сторону
    digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);

    // Зчитування початкового стану CLK
    lastStateCLK = digitalRead(CLK);

    // Встановлення серійного зв'язку для моніторингу
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    // Зчитуємо поточний стан CLK
    int currentStateCLK = digitalRead(CLK);

```

```

// Якщо стан CLK змінився, перевіряємо напрямок
if (currentStateCLK != lastStateCLK) {
    if (digitalRead(DT) != currentStateCLK) {
        encoderValue++;
    } else {
        encoderValue--;
    }
}

// Регулювання швидкості на основі значення енкодера
speedDelay = constrain(500 - encoderValue * 10, 100, 1000); // Межі швидкості

// Вивід значення енкодера та швидкості в серійний монітор
Serial.print("Encoder Value: ");
Serial.print(encoderValue);
Serial.print(" | Speed Delay: ");
Serial.println(speedDelay);
}

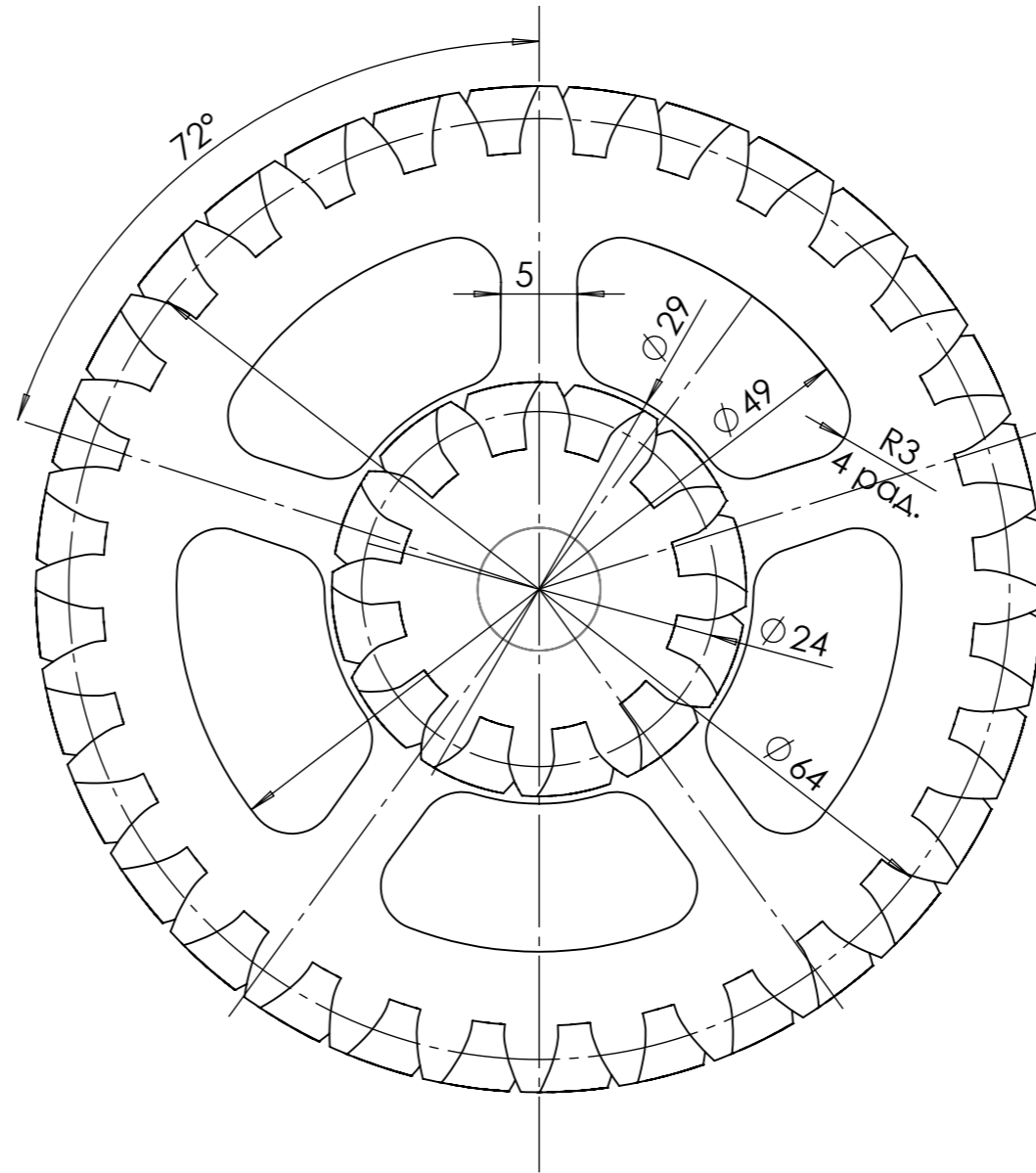
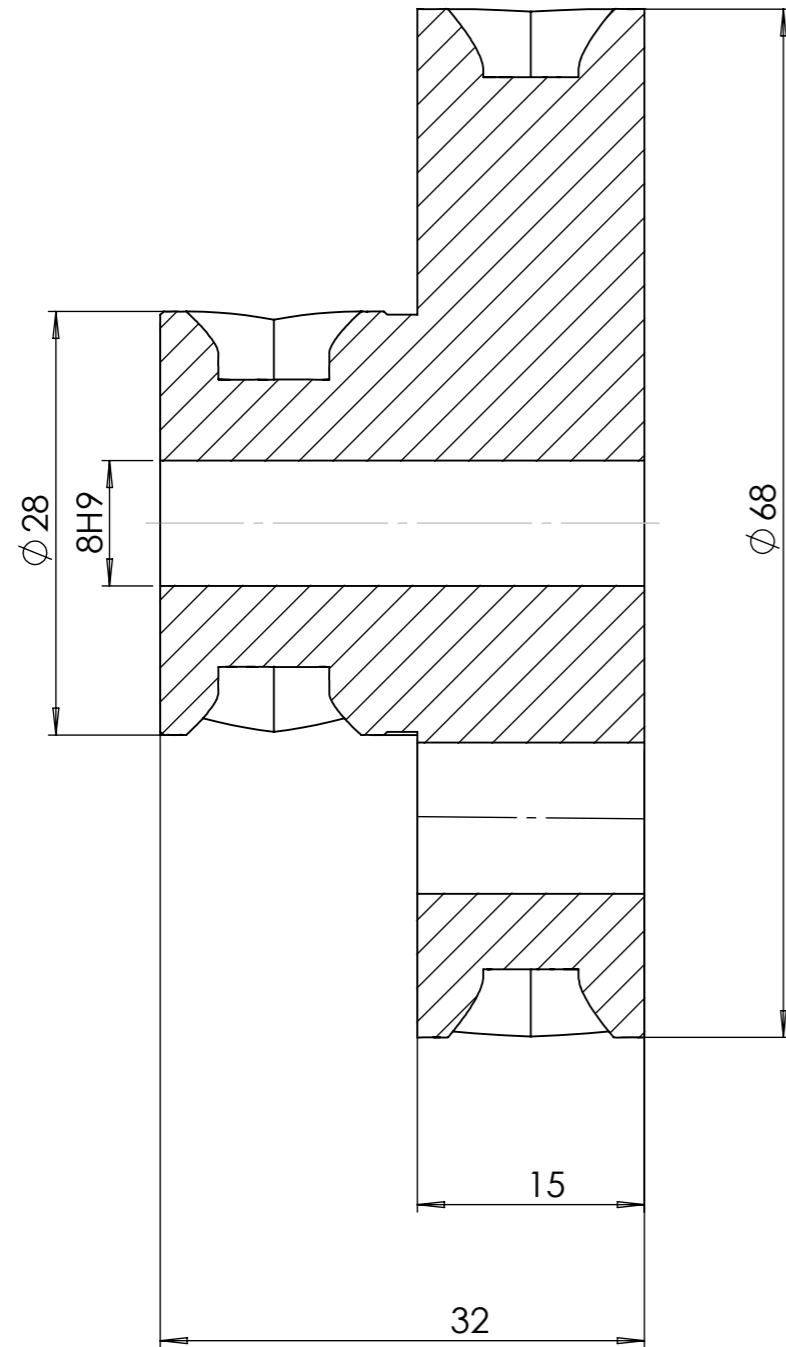
lastStateCLK = currentStateCLK;

// Генерація імпульсів для управління двигуном
digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
delayMicroseconds(speedDelay);
digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
delayMicroseconds(speedDelay);
}

```

					<i>БР.ПМ-33.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

БР-ПМ-33.00.001



√ Ra 12,5(√)

1		
Діаметр кола вершин зубів, мм	da	28
модуль	m	2
число зубів	z	12
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр, мм	d	24
кут нахилу зуба		24° 27'
2		
Діаметр кола вершин зубів, мм	da	68
модуль	m	2
число зубів	z	32
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр, мм	d	64
кут нахилу зуба		28°

1. H14, h14, ±it14/2
2. Невказані радіуси скруглень 0,2мм

Перв. застосує. Довід. № Підп. та Дата. Взам. інв. №. Інв. № дубл. Підп. та дата. Інв. № підп.

					<b>БР-ПМ-33.00.001</b>		
					<b>Блок шестерень 32/12</b>		
					PLA ISO 5425:2023		
					ІФНТУНГ ПМ-21-1		
					Формат А3		

Літ.	Маса	Масштаб
		2:1
Аркуш 1		Аркушів 8

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Матейчук Д.О.		
Перев.		Врюкало В.В.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

БР.ПМ-33.00.002

Перв. застосув.

Довід. №

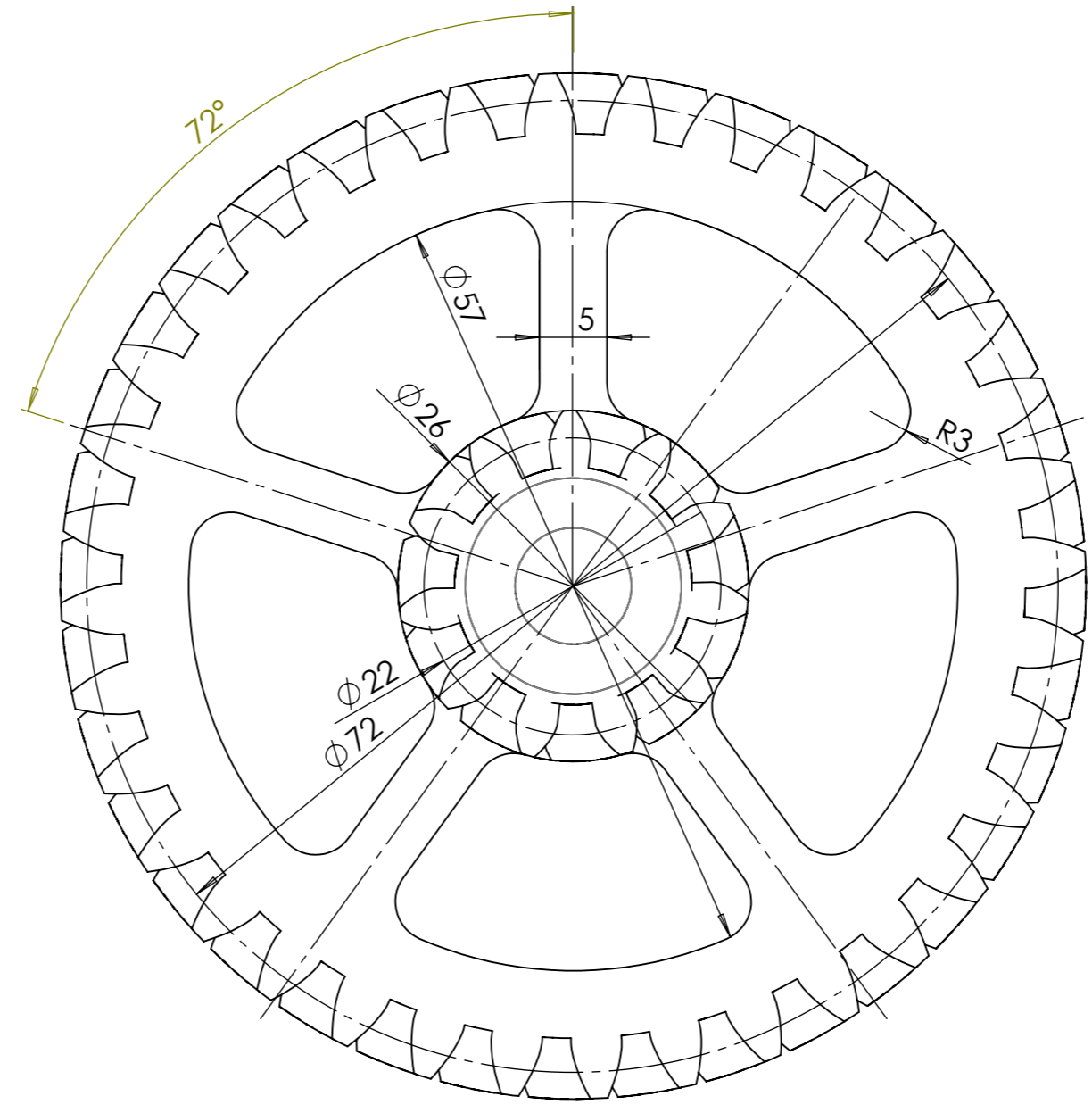
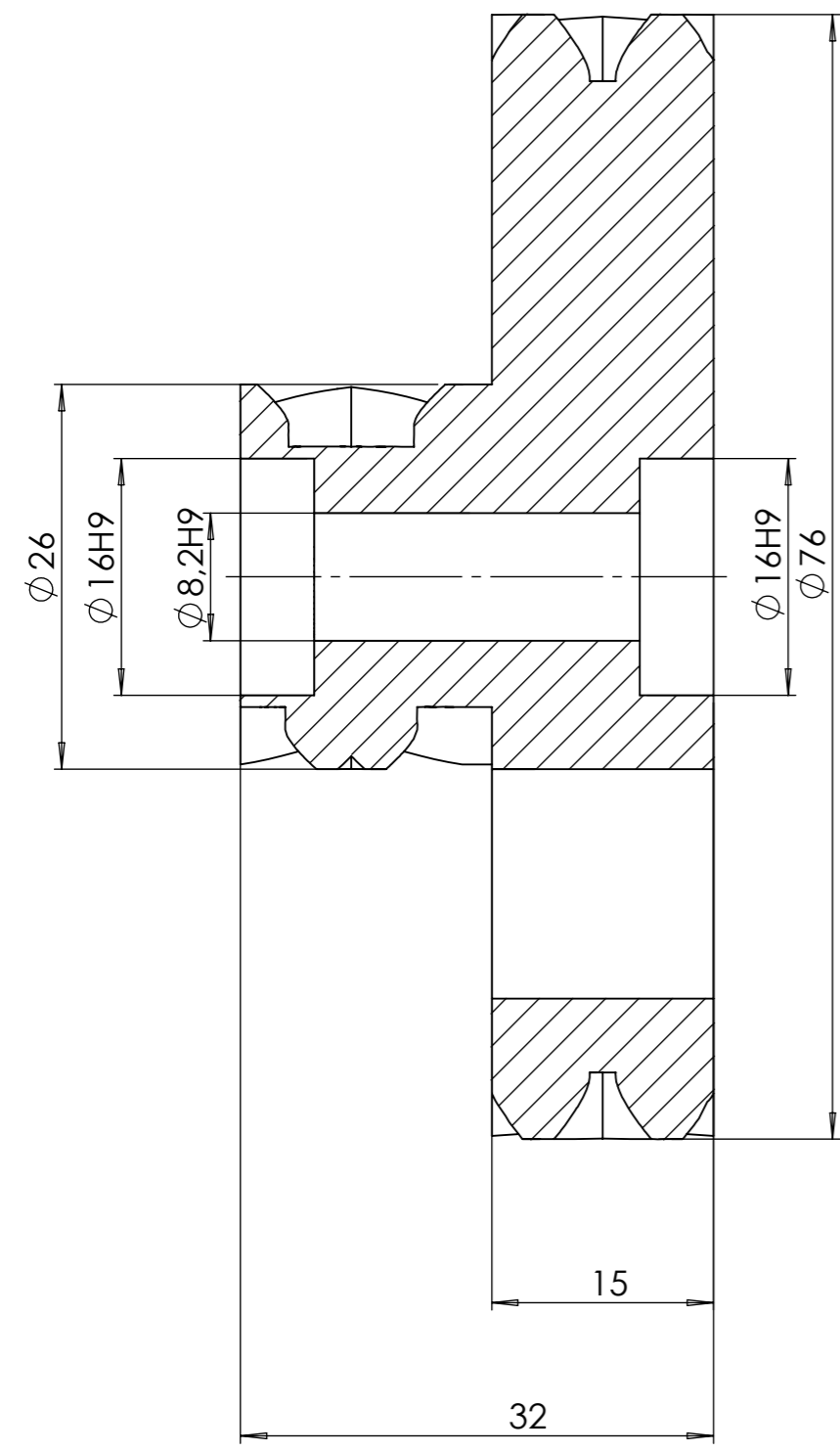
Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № підп.



$\sqrt{Ra 12.5}$

1		
Діаметр кола вершин зубів	da	26
модуль	m	2
число зубів	z	11
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр	d	22
кут нахилу зуба		24° 39'
2		
Діаметр кола вершин зубів	da	76
модуль	m	2
число зубів	z	36
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр	d	72
кут нахилу зуба		24° 27'

1. H14, h14, ±it14/2
2. Невказані радіуси скруглень 0,2мм

					<b>БР.ПМ-33.00.002</b>		
					<b>Блок шестерень 36/11</b>		
					Літ.	Маса	Масштаб
							2:1
					Аркуш 2		Аркушів 8
					ІФНТУНГ ПМ-21-1		
					PLA ISO 5425:2023		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.		Матейчук Д.О.					
Перев.		Врюкало В.В.					
Т. контр.							
Н. контр.							
Утв.							

БР.ПМ-33.00.003

✓ Ra12.5(✓)

Перв. застосув.

Довід. №

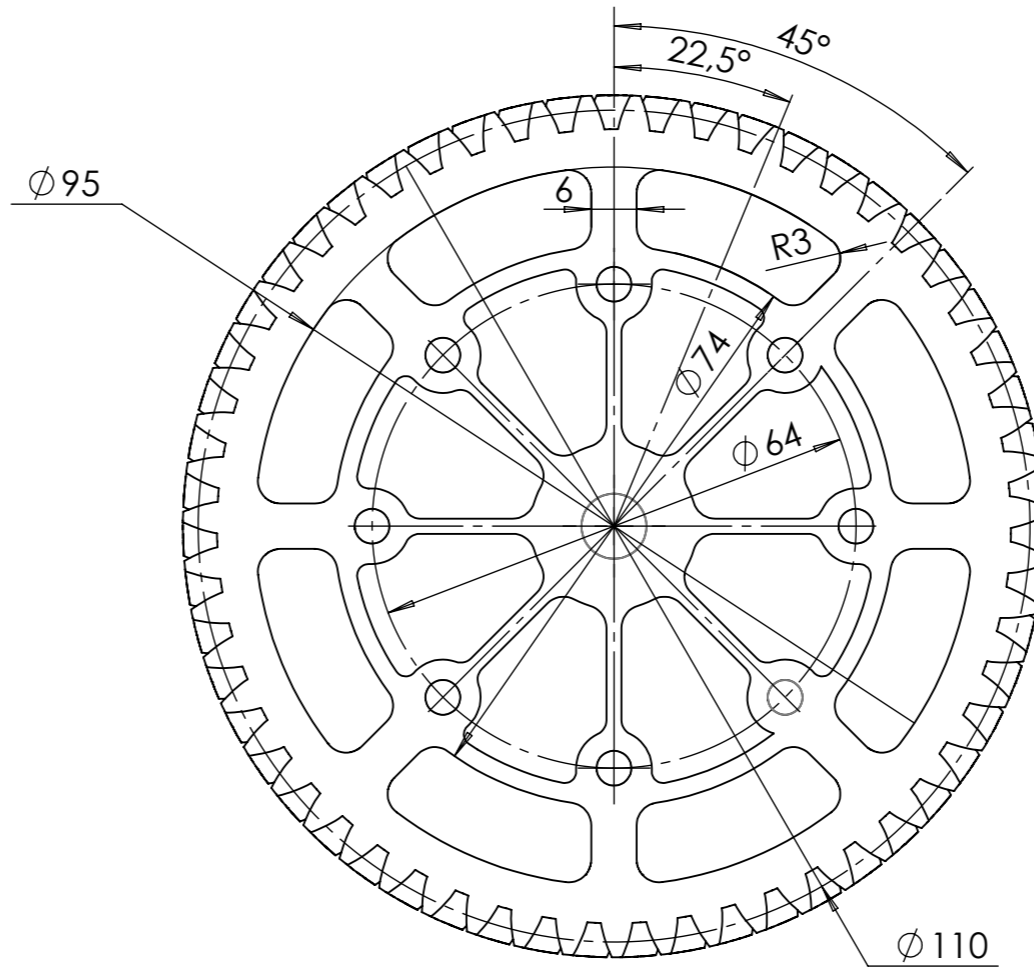
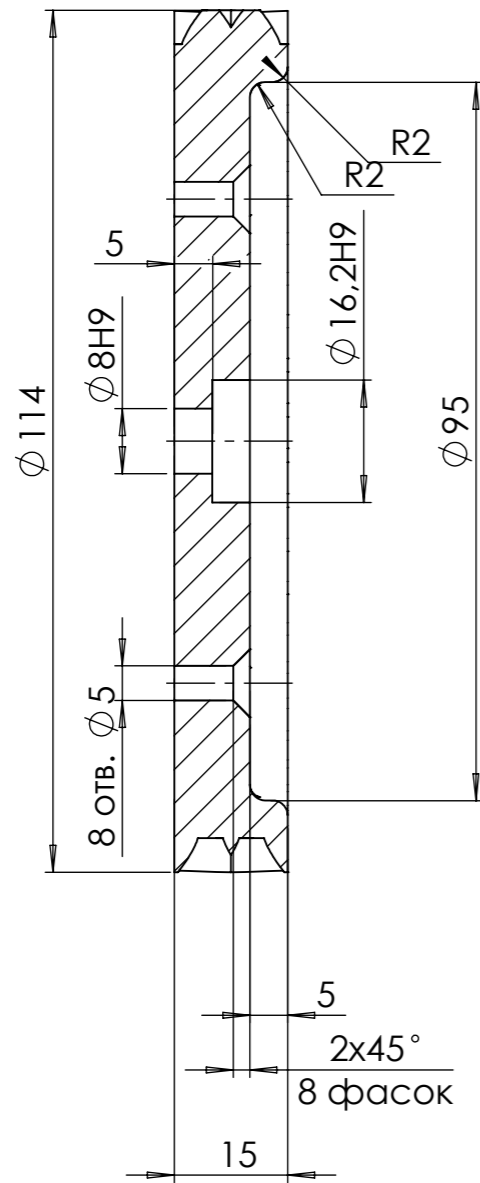
Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № підп.



Діаметр кола вершин зубів	da	114
модуль	m	2
число зубів	z	55
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр	d	110
кут нахилу зуба		24° 39'

1. H14, h14, ±it14/2
2. Невказані радіуси скруглень 0,2мм

					<b>БР.ПМ-33.00.003</b>			
					<b>Шестерня 55</b>			
					Літ.		Маса	Масштаб
								1:1
					Аркуш 3		Аркушів 8	
					ІФНТУНГ ПМ-21-1			
					PLA ISO 5425:2023			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
Розроб.		Матейчук Д.О.						
Перев.		Врюкало В.В.						
Т. контр.								
Н. контр.								
Утв.								

БР.ПМ-33.00.004

Перв. застосує.

Довід. №

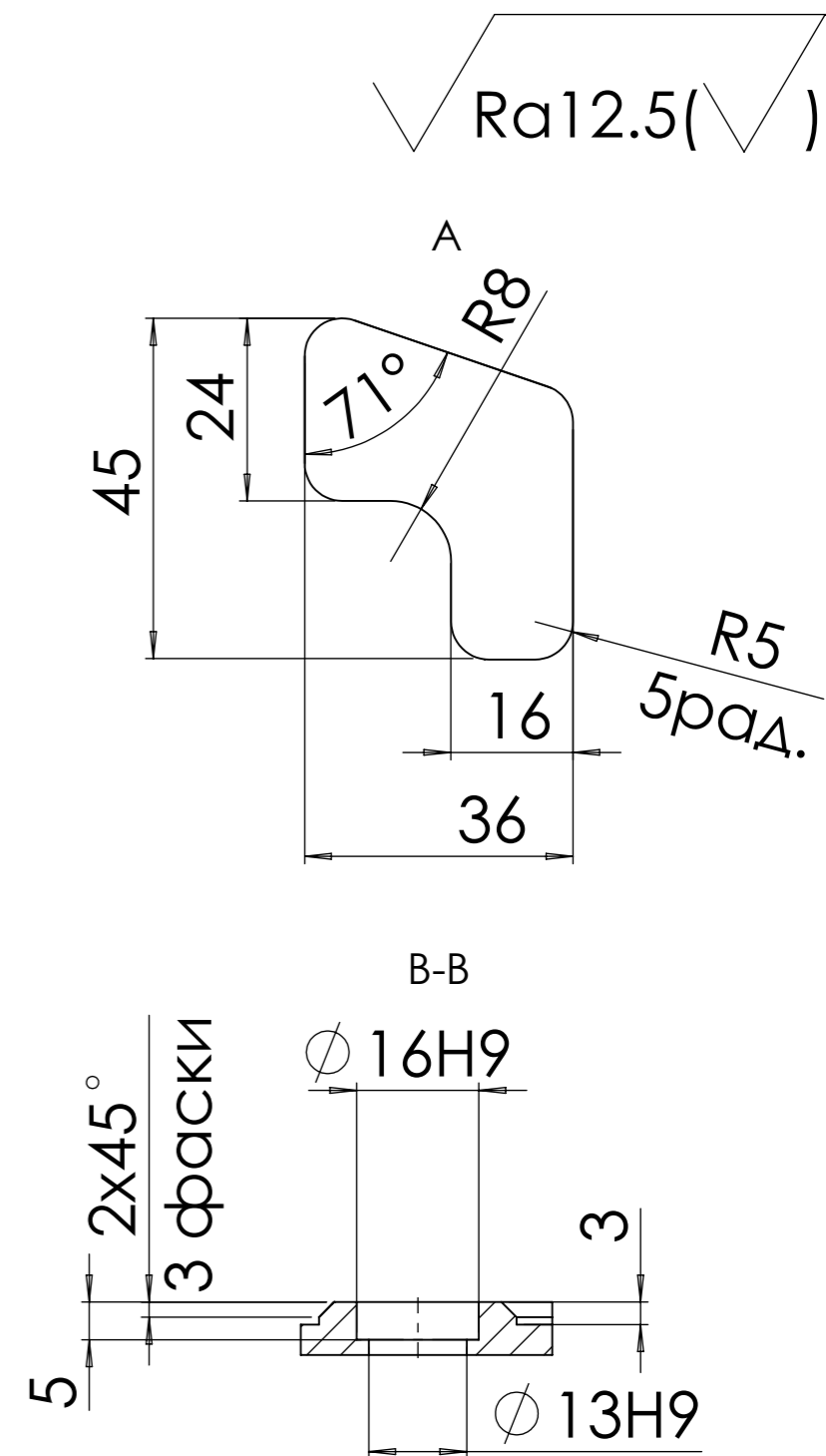
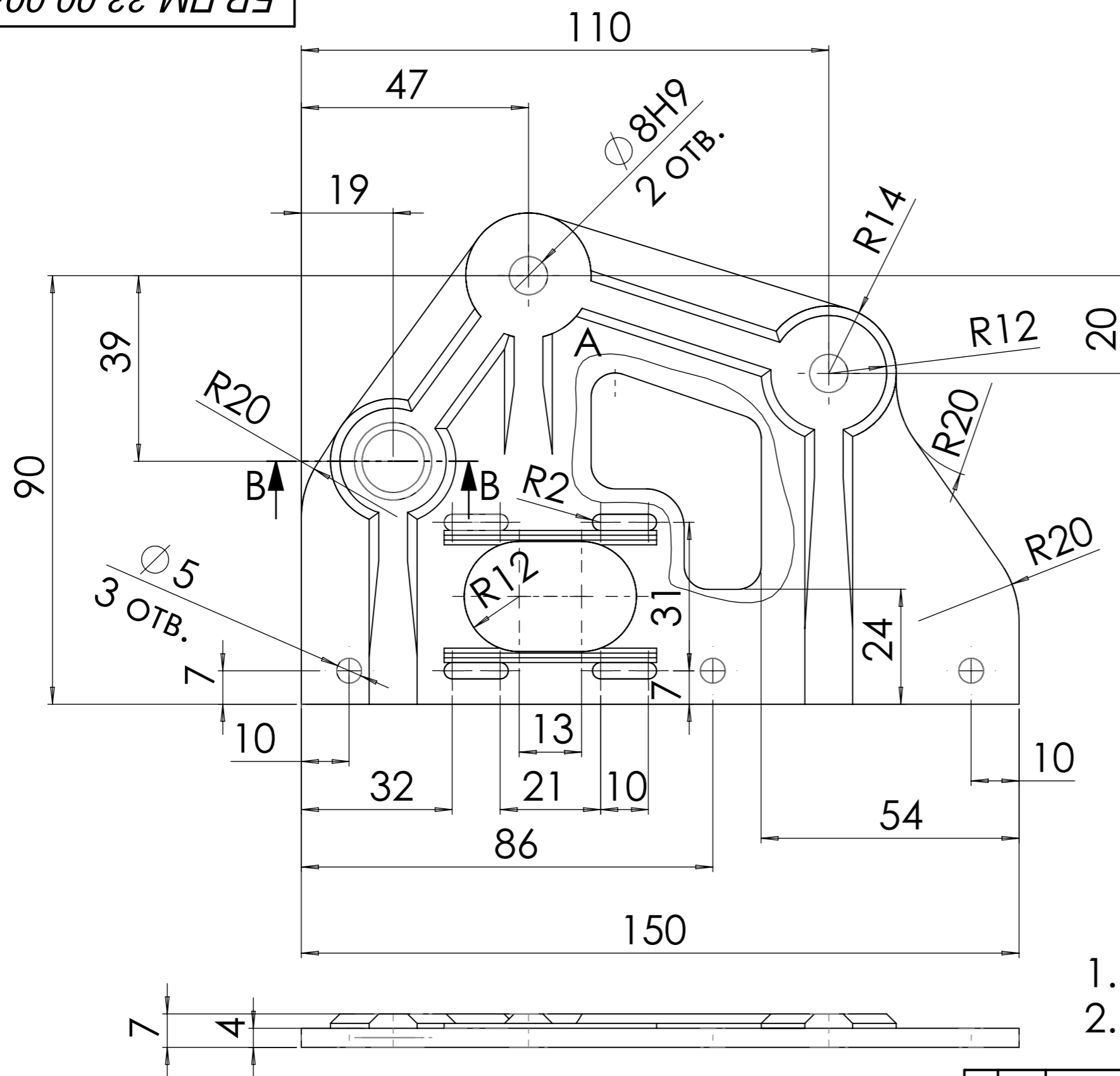
Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

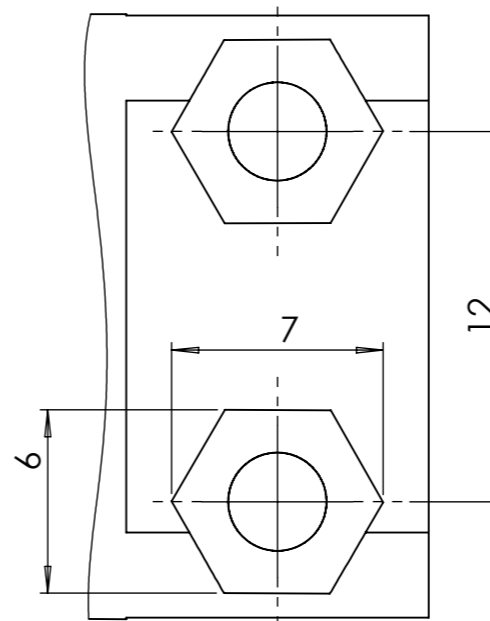
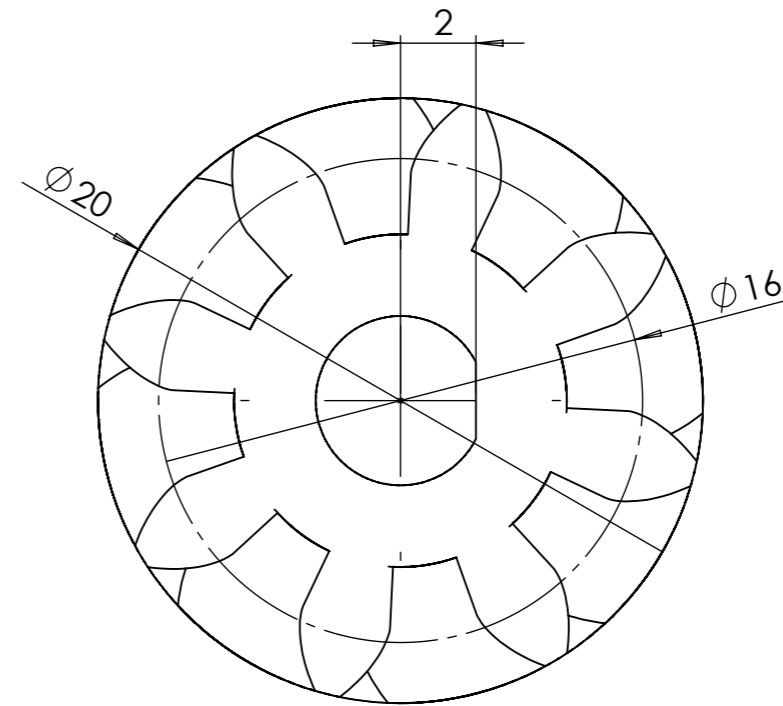
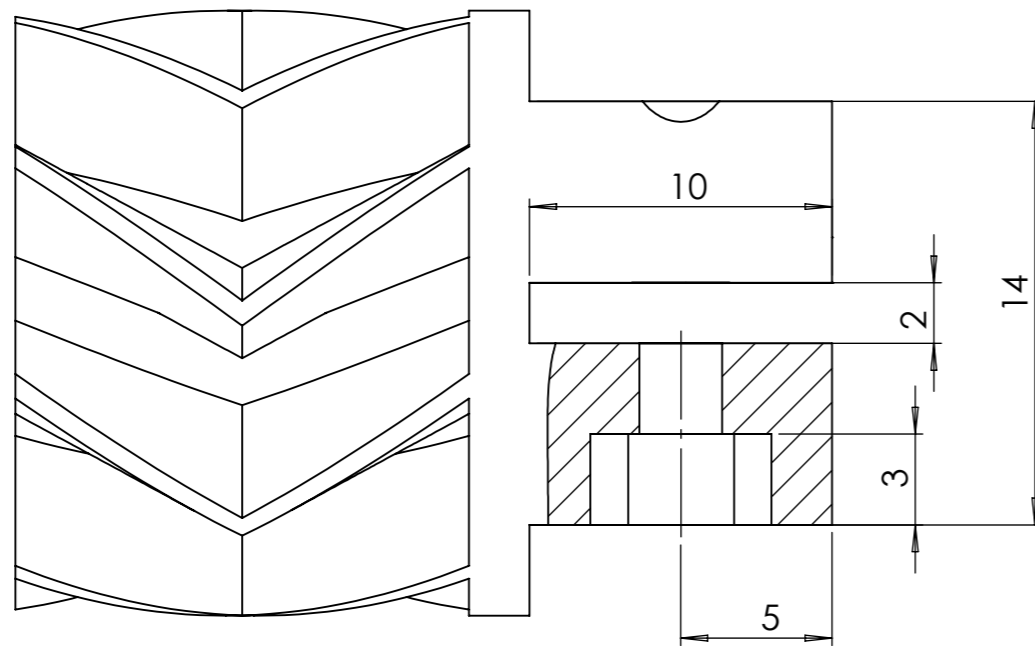
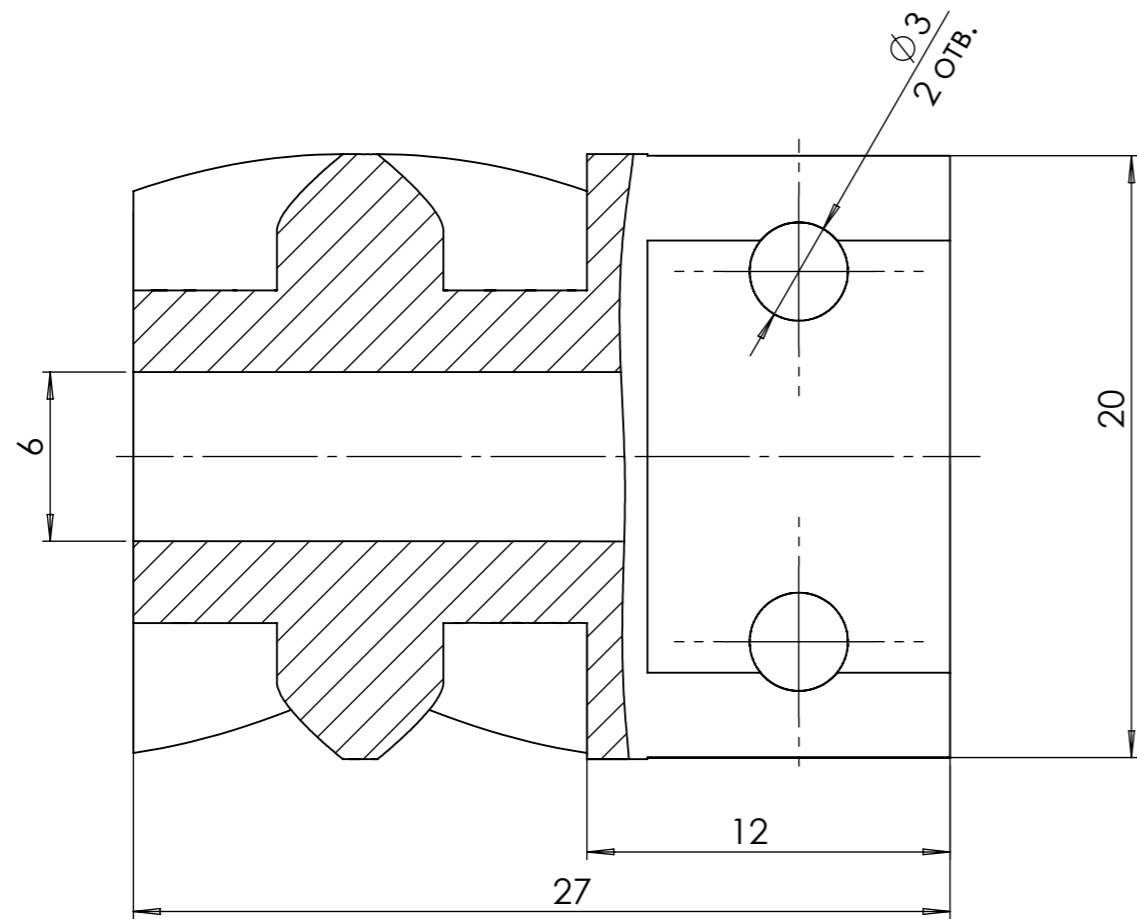
Інв. № підп.



1. H14, h14,  $\pm it/2$
2. Невказані розміри радіусів 0,5мм

					<b>БР.ПМ-33.00.004</b>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	<b>Рама 1 частина</b>	Літ.	Маса	Масштаб
								1:1
Розроб.		Матейчук Д.О.				Аркуш 4	Аркушів 8	
Перев.		Врюкало В.В.						
Т. контр.								
Н. контр.					PLA ISO 5425:2023			
Утв.								

БР.ПМ-33.00.005



✓ Ra12.5 ( ✓ )

Діаметр кола вершин зубів	da	20
модуль	m	2
число зубів	z	8
тип шестерні		шевронна
Ділильний діаметр	d	16
кут нахилу зуба		28°

- H14, h14, ±it14/2
- Невказані розміри скруглень 0,2мм

БР.ПМ-33.00.005

Шестерня

PLA ISO 5425:2023

Літ. Маса Масштаб

4:1

Аркуш 5 Аркушів 9

ІНФТУНГ  
ПМ-21-1

Перв. застосує.

Довід. №

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № підп.

БР.ПМ-33.00.006

Перв. застосув.

Довід. №

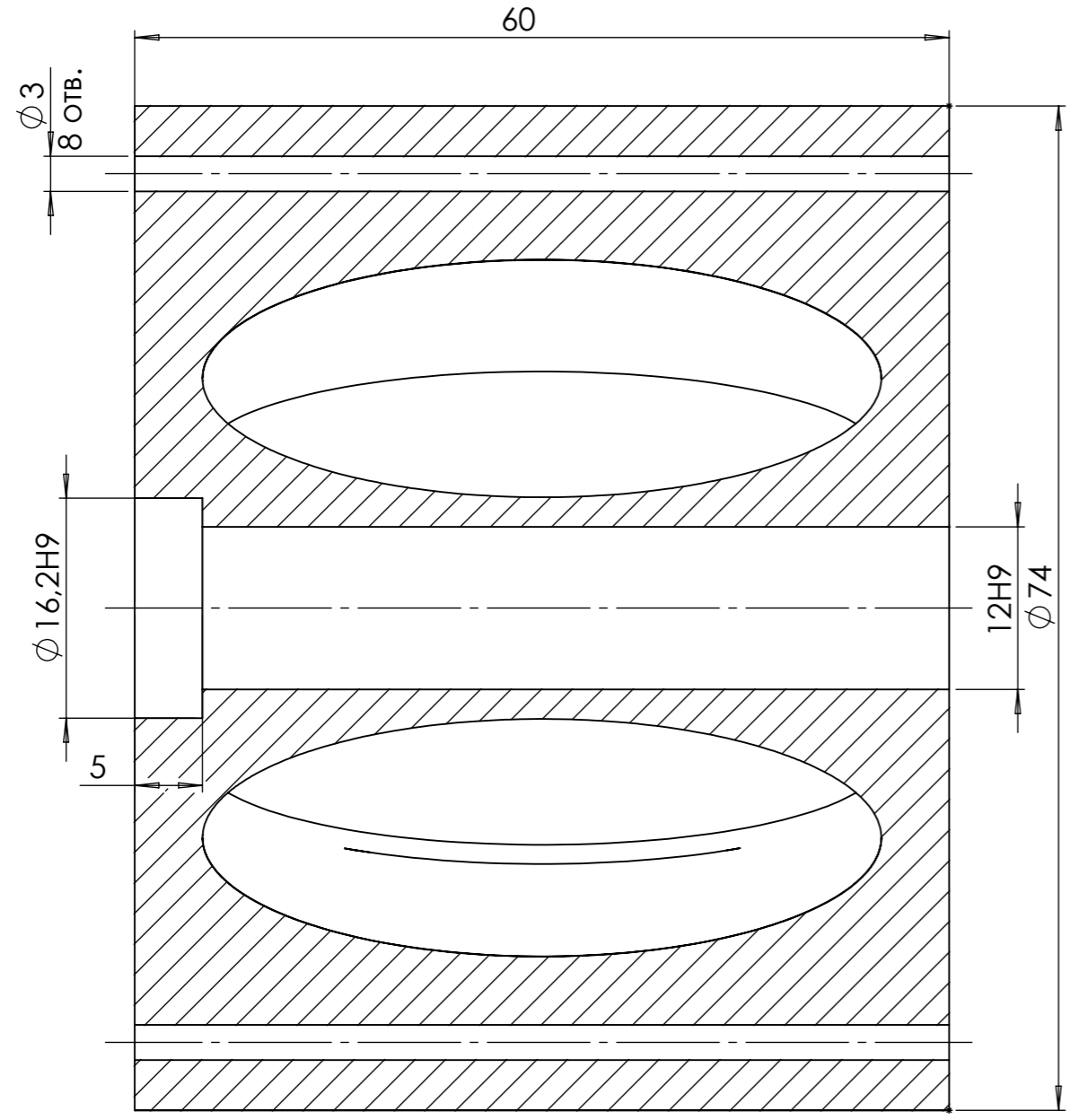
Підп. та Дата

Інв. № дубл.

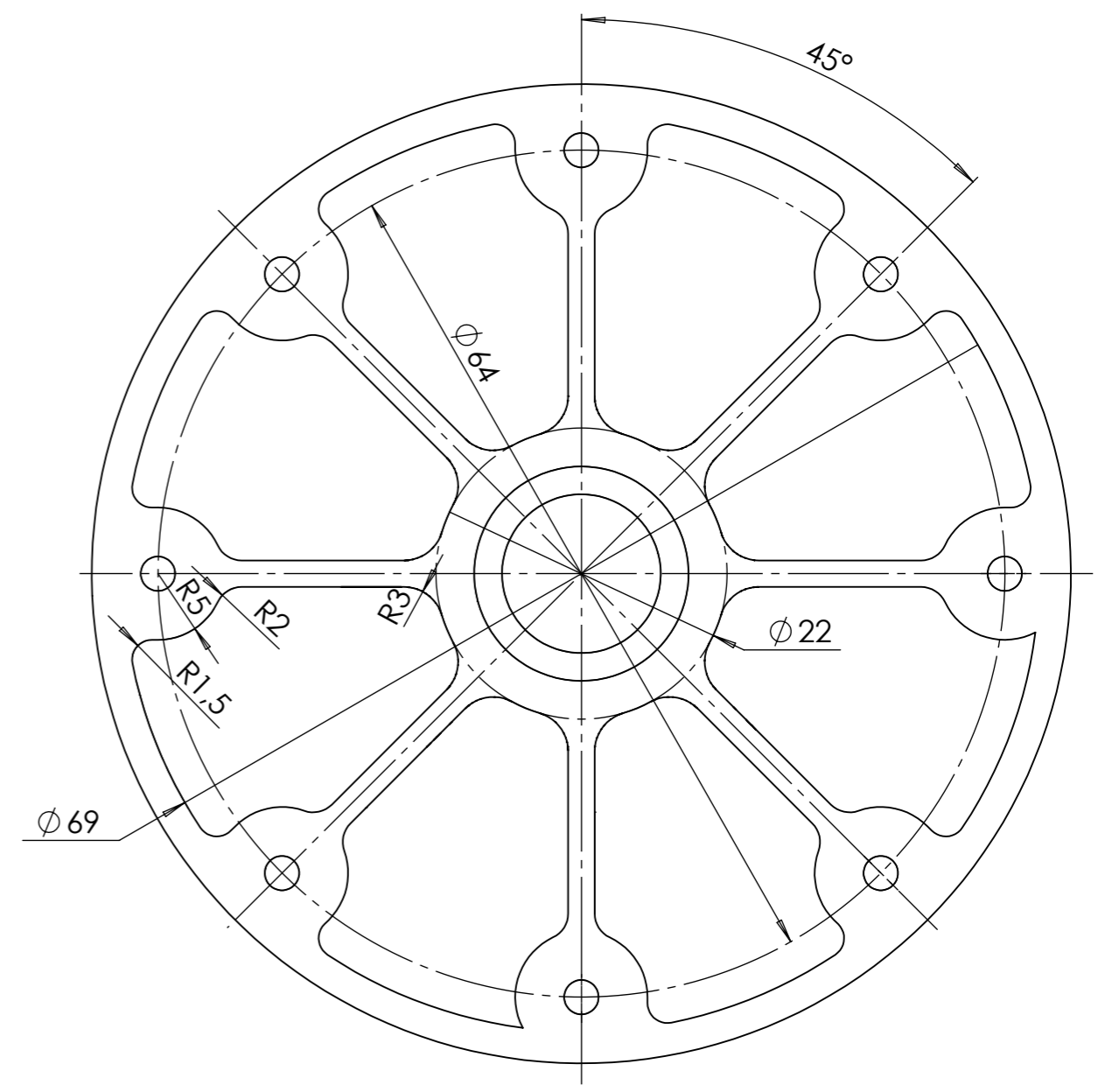
Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № підп.



Ra12.5( √ )



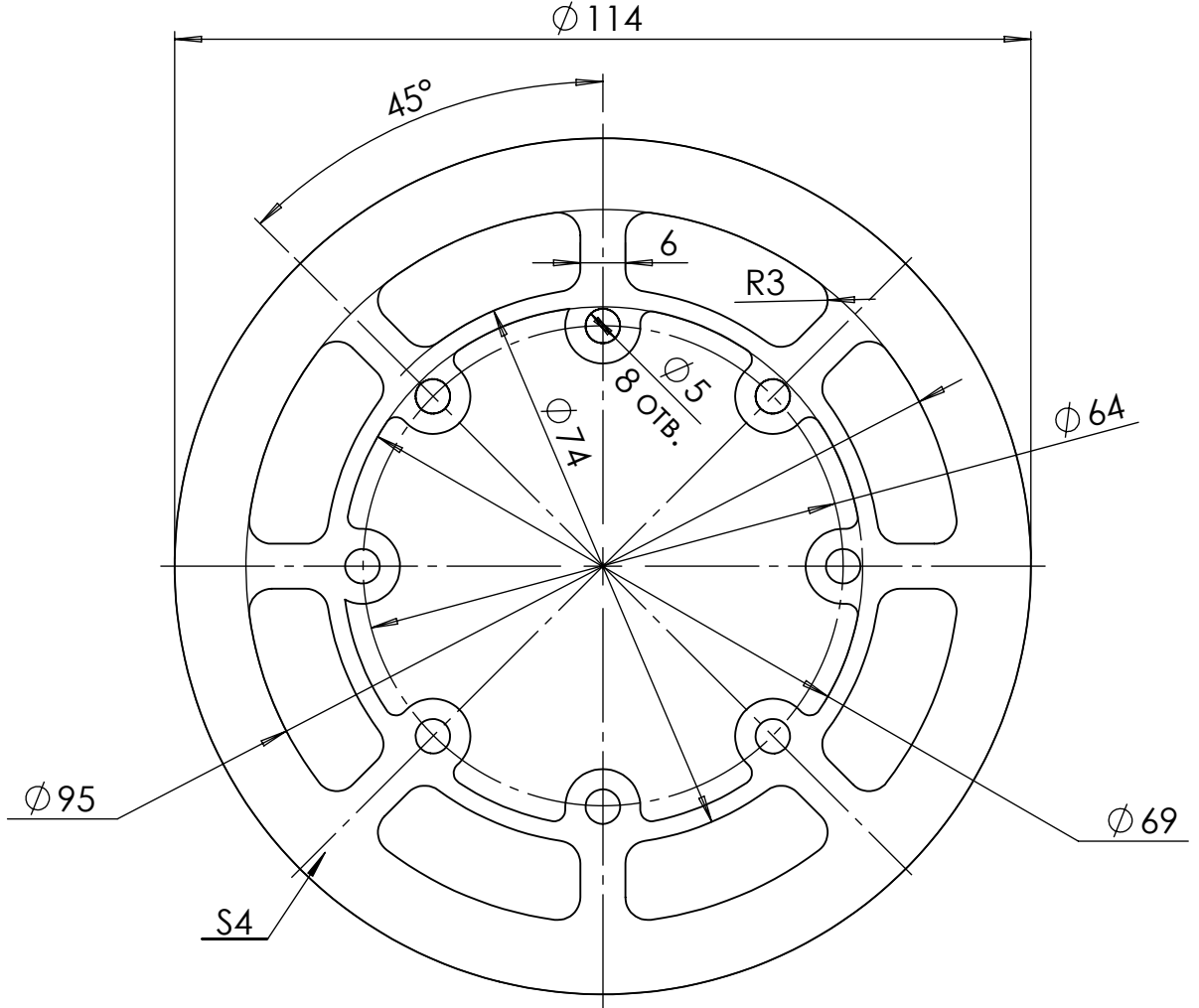
1. H14, h14, ±it14/2
2. неказані розміри скруглень 0,2 мм

БР.ПМ-33.00.006

					<b>БР.ПМ-33.00.006</b>		
					<b>частина котушки</b>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.		Матейчук Д.О.					2:1
Перев.		Врюкало В.В.					
Т. контр.					Аркуш 6	Аркушів 8	
Н. контр.					PLA ISO 5425:2023		
Утв.					ІФНТУНГ ПМ-21-1		

БР.ПМ-33.00.007

$\sqrt{Ra12.5(\sqrt{\quad})}$



1. H14, h14,  $\pm it14/2$
2. Невказані радіуси скруглень 0,2мм

**БР.ПМ-33.00.007**

**Реборда катушки**

Літ.	Маса	Масштаб
		1:1
Аркуш 7		Аркушів 8

PLA ISO 5425:2023

**ІФНТУНГ  
ПМ-21-1**

Перв. застосуєв.

Довід. №

Підп. и дата

Інв. № дубл.

Взам. інв. №

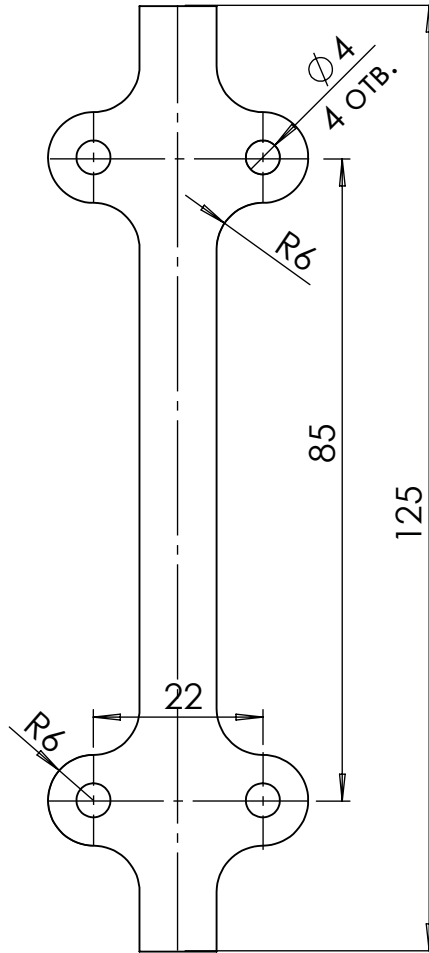
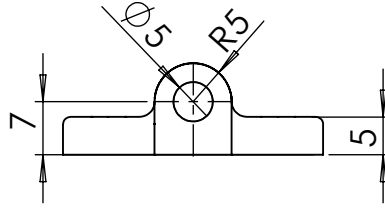
Підп. та дата

Інв. № підл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Матейчук Д.О.		
Перев.		Врюкало В.В.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

БР.ПМ-33.00.008

Ra12.5( √ )



1. H14, h14, ±it14/2
2. невказані розміри скруглень 0,2 мм

БР.ПМ-33.00.008

Кріплення рамок

Літ. Маса Масштаб

1:1

Аркуш 8 Аркушів 8

PLA ISO 5425:2023

ІФНТУНГ  
ПМ-21-1

Формат А4

Перв. застосує.

Довід. №

Підп. и дата

Інв. № дубл.

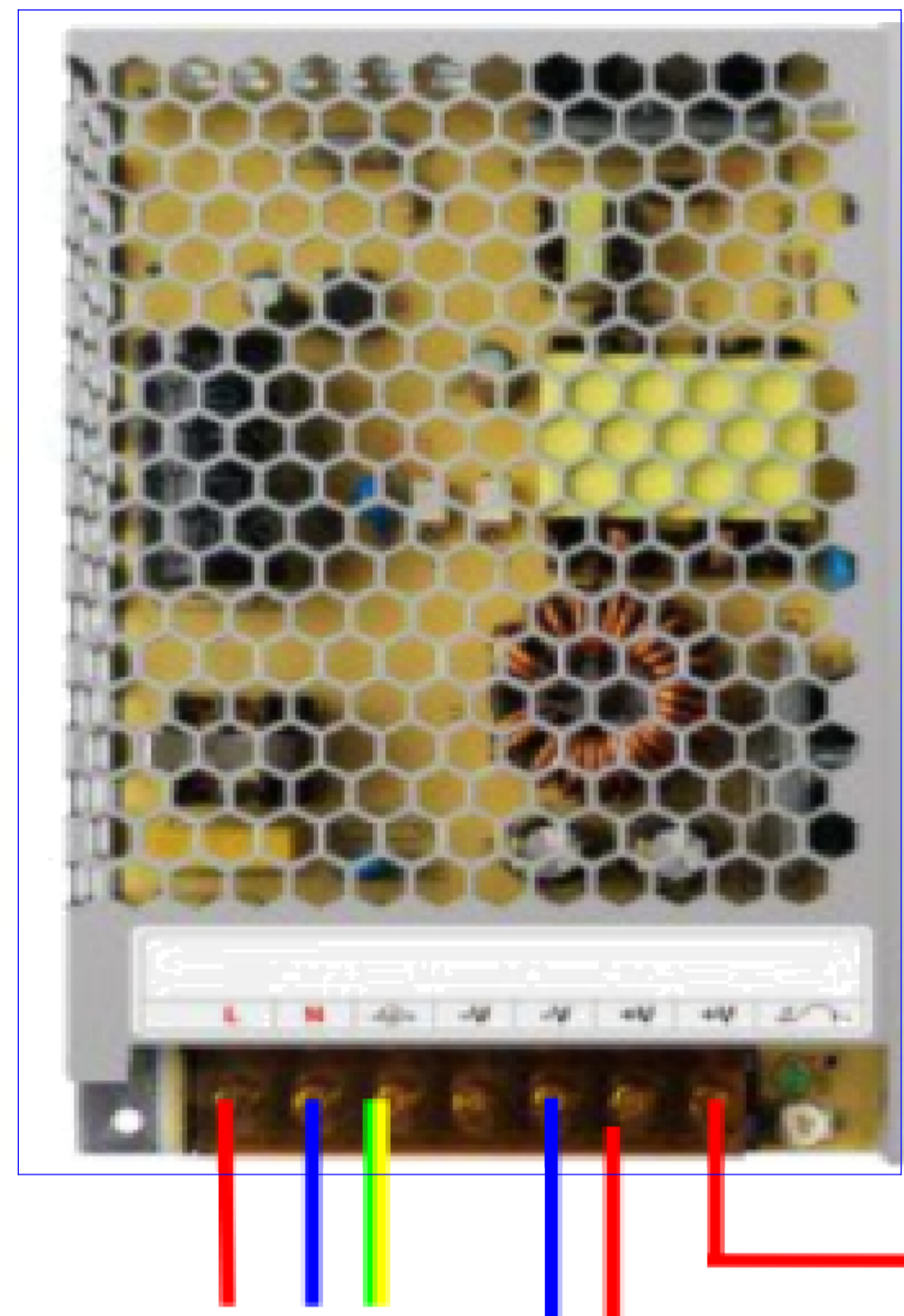
Взам. інв. №

Підп. та дата

Інв. № підл.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Матейчук Д.О.		
Перев.		Врюкало В.В.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

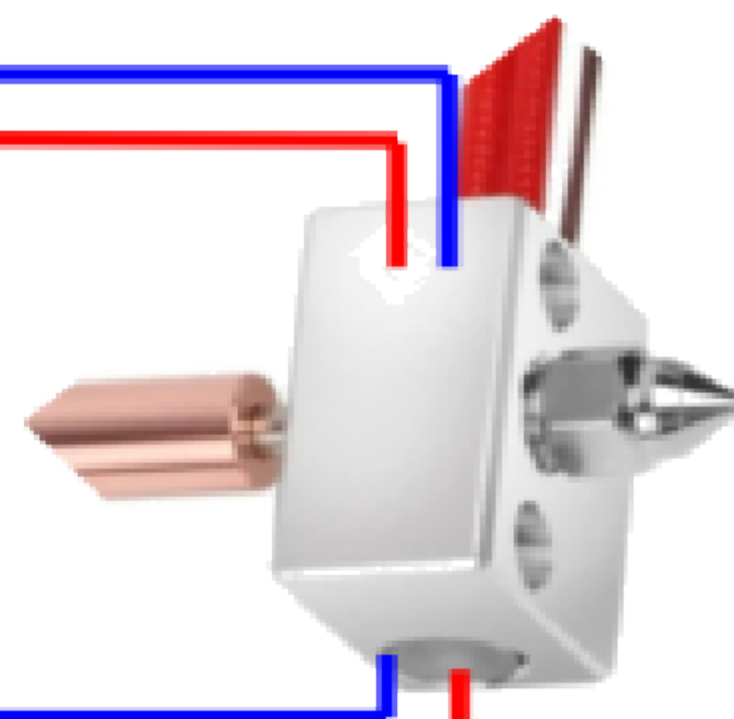
Блок живлення



Термостат

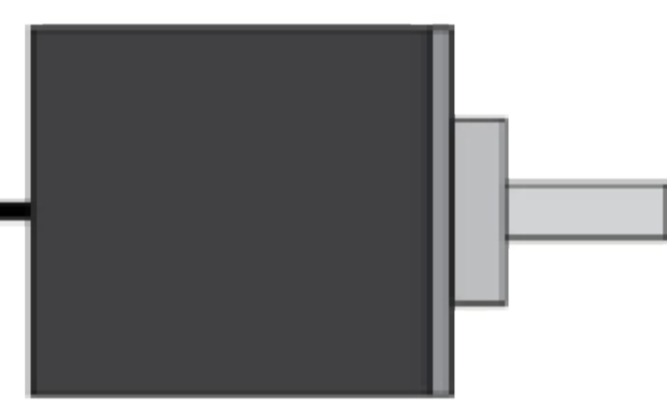


Термістор

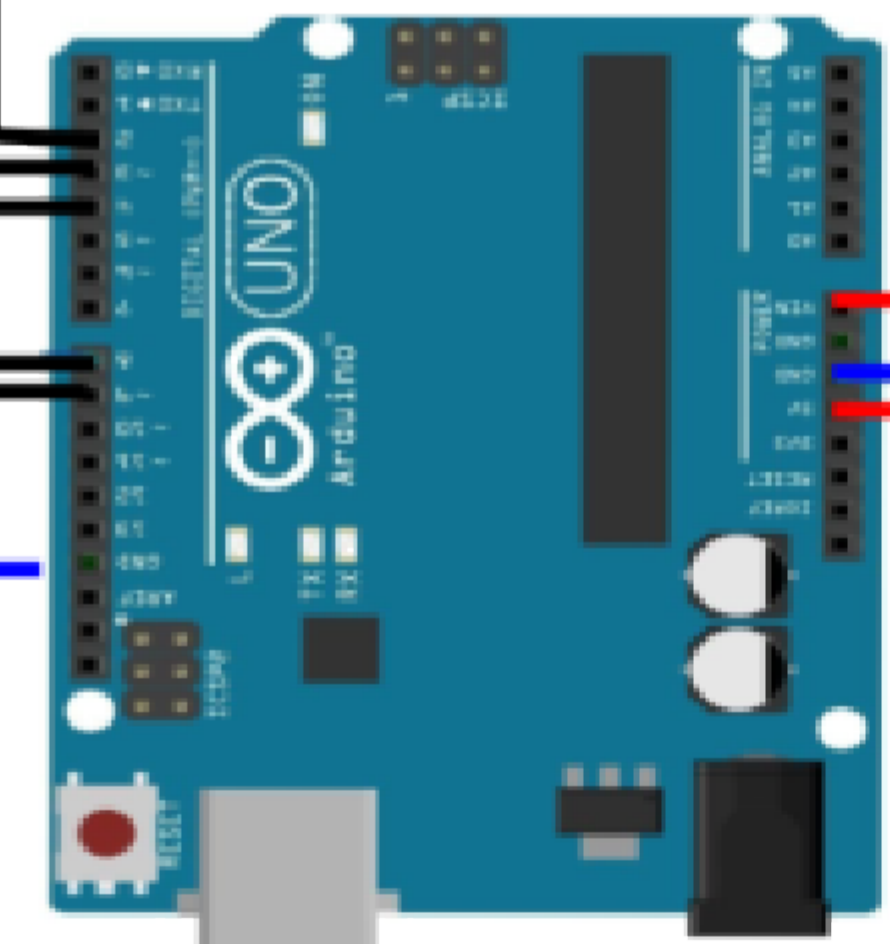


Нагрівач

Енкодер

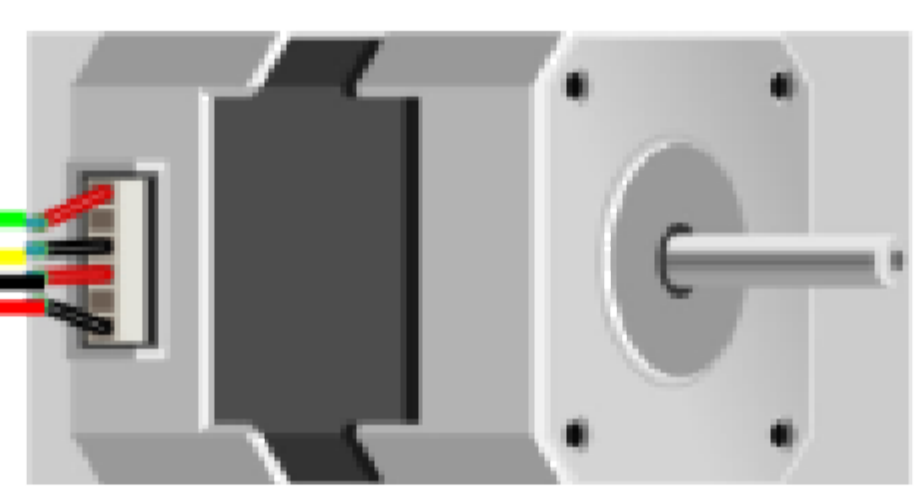


Драйвер крокового двигуна



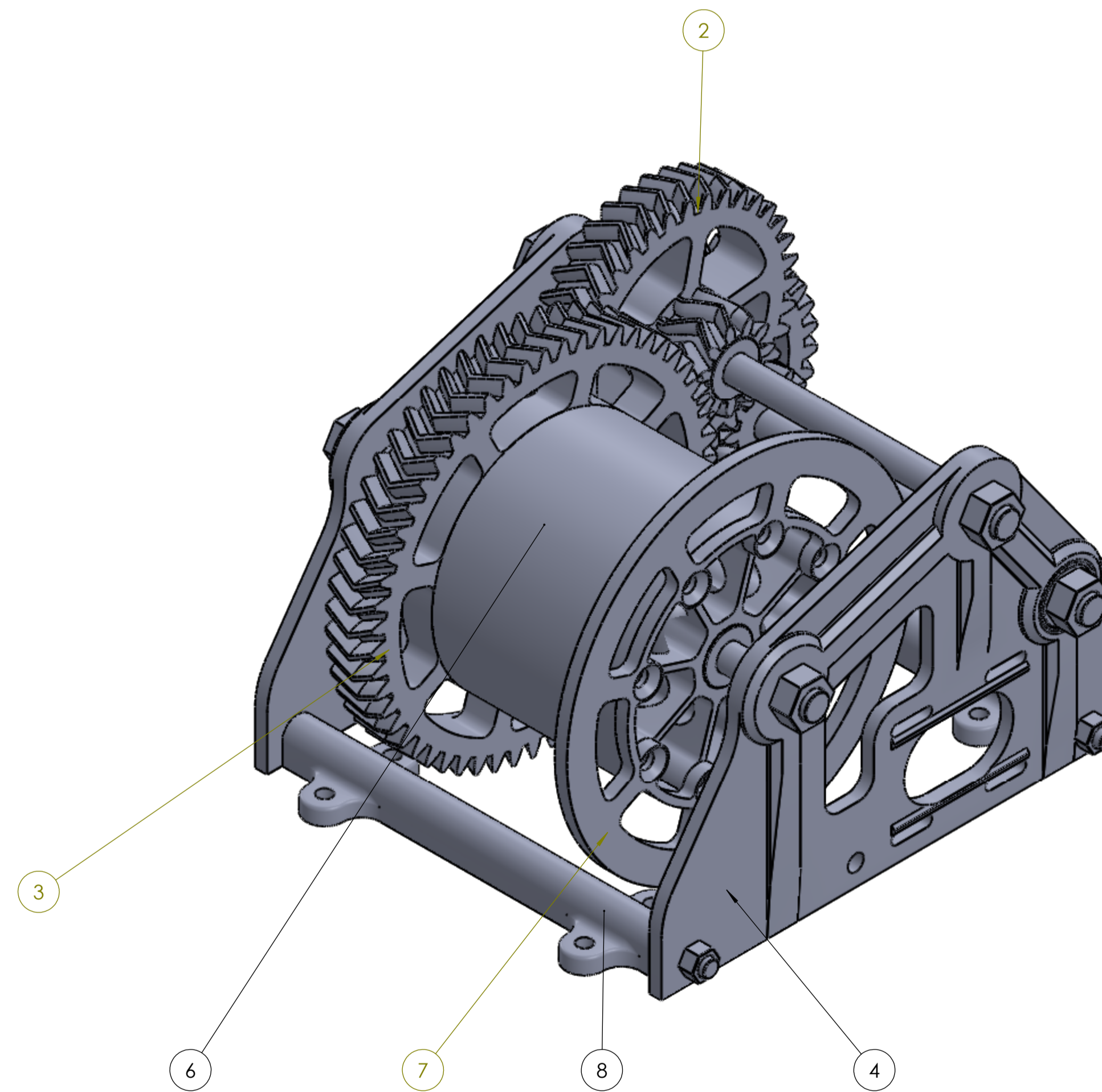
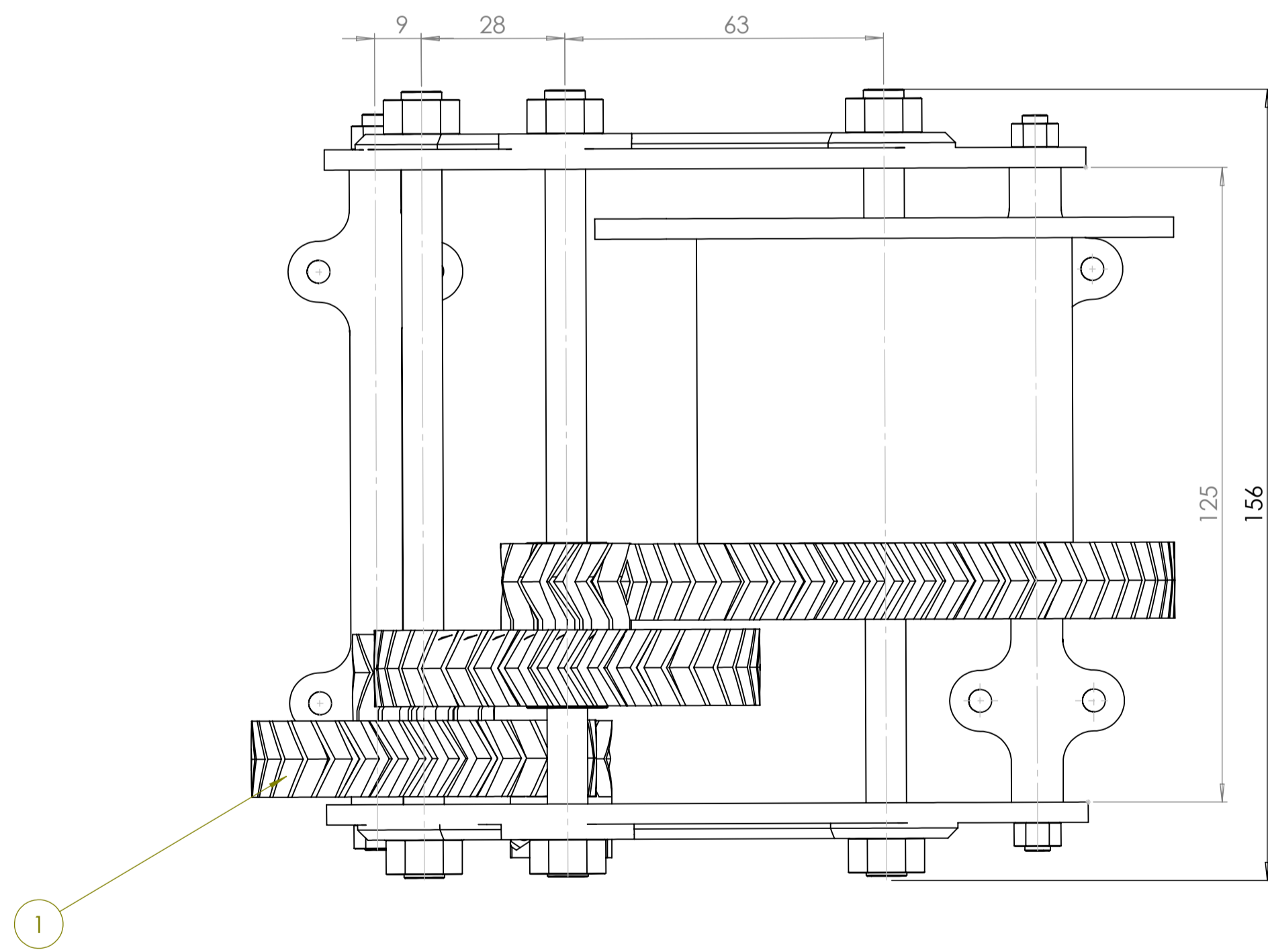
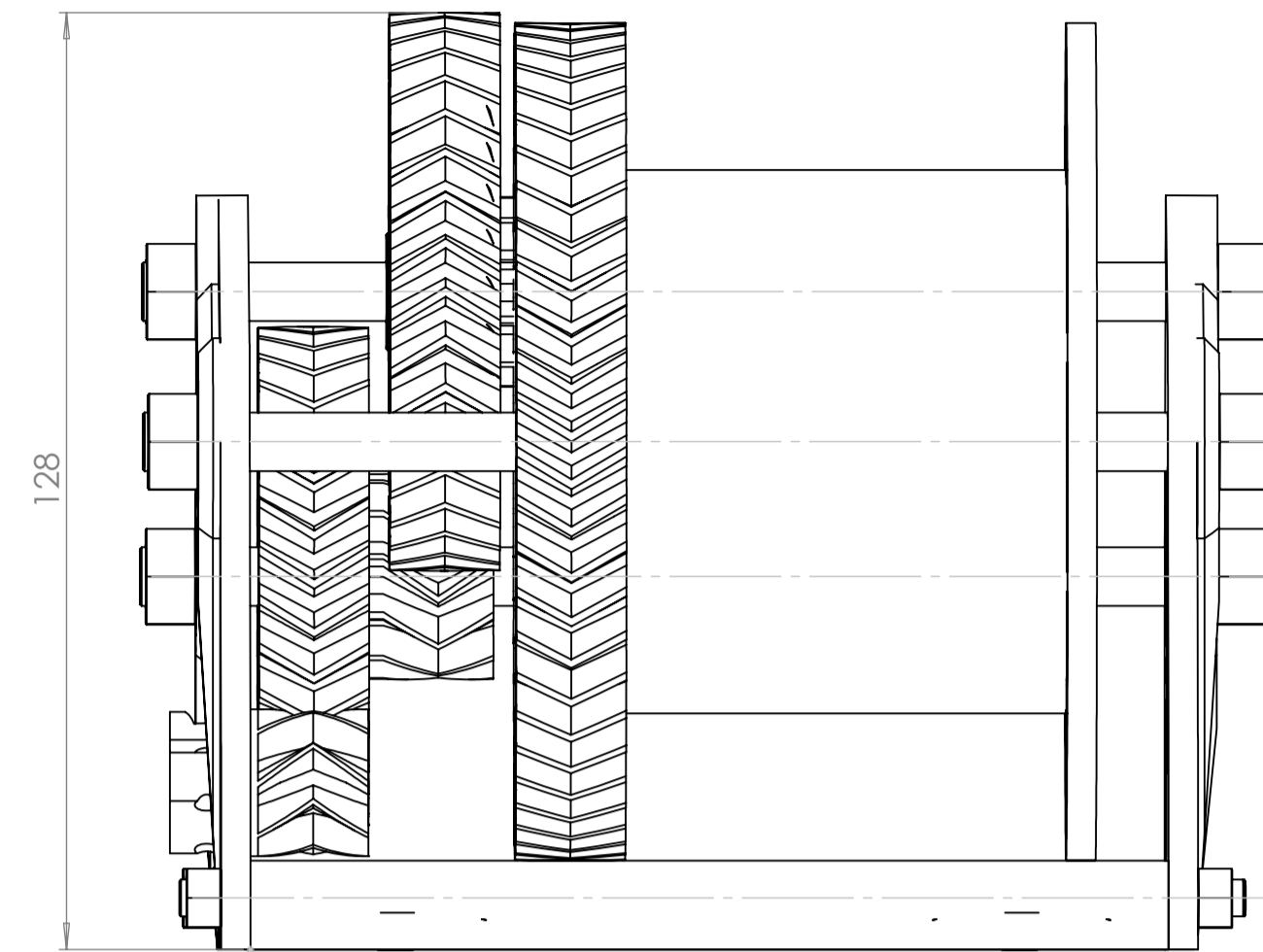
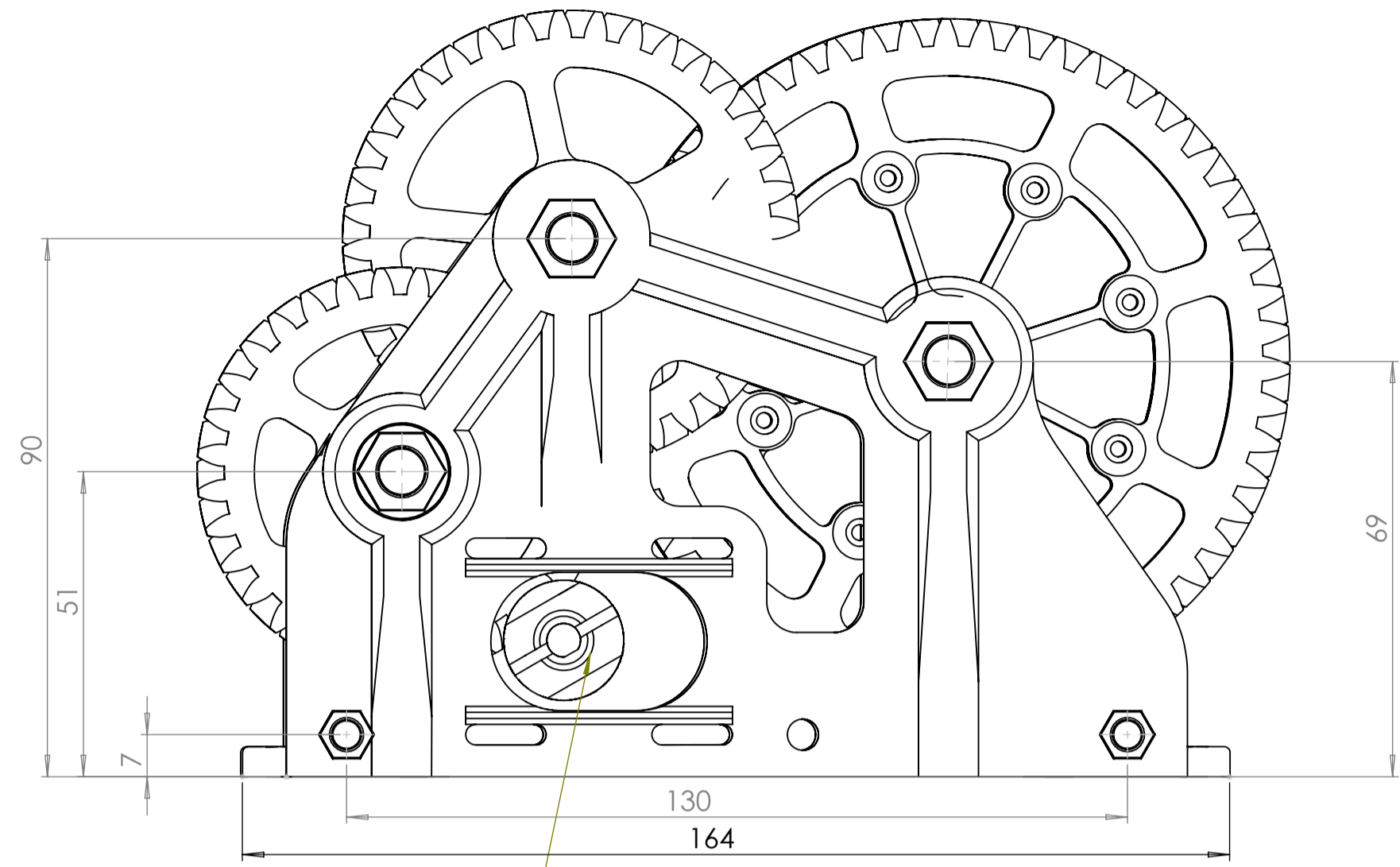
Arduino Uno

Кроковий двигун



				<b>БП.ПМ-33.03.000.СБ</b>		
				<b>Електрична схема</b>		
				<b>РЕTamentor</b>		
Зм.	Арх.	№ док.	Підп.	Дата	Літ.	Маса
Розроб.	Матейчук Д.О.					1:1
Перев.	Врюкало В.В.					
Т. контр.						
Н. контр.						
Утв.						

Перв. засвоєн. Довід. № Взам. інв. № Інв. № дубл. Підп. та дата Інв. № орг.



Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Матейчук Д.О.			
Перев.	Врюкало В.В.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

БП.ПМ-33.01.000.СБ

Загальний вид редуктора

Літ. Маса Масштаб

Аркуш Аркушів

1:1

ІФНТУНГ ПМ-21-1

Формат А1

Перев. засвоєно.

Довід. №

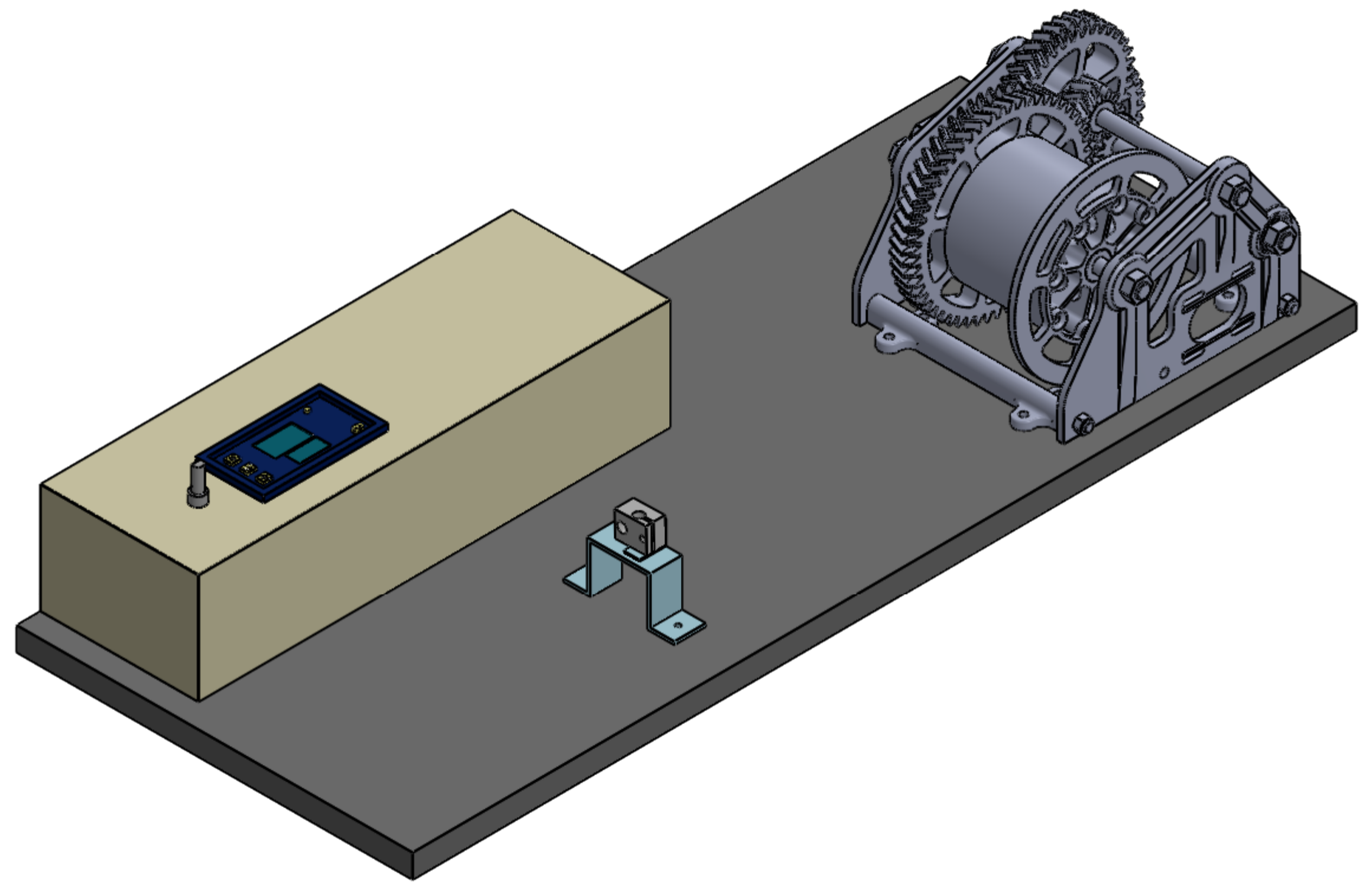
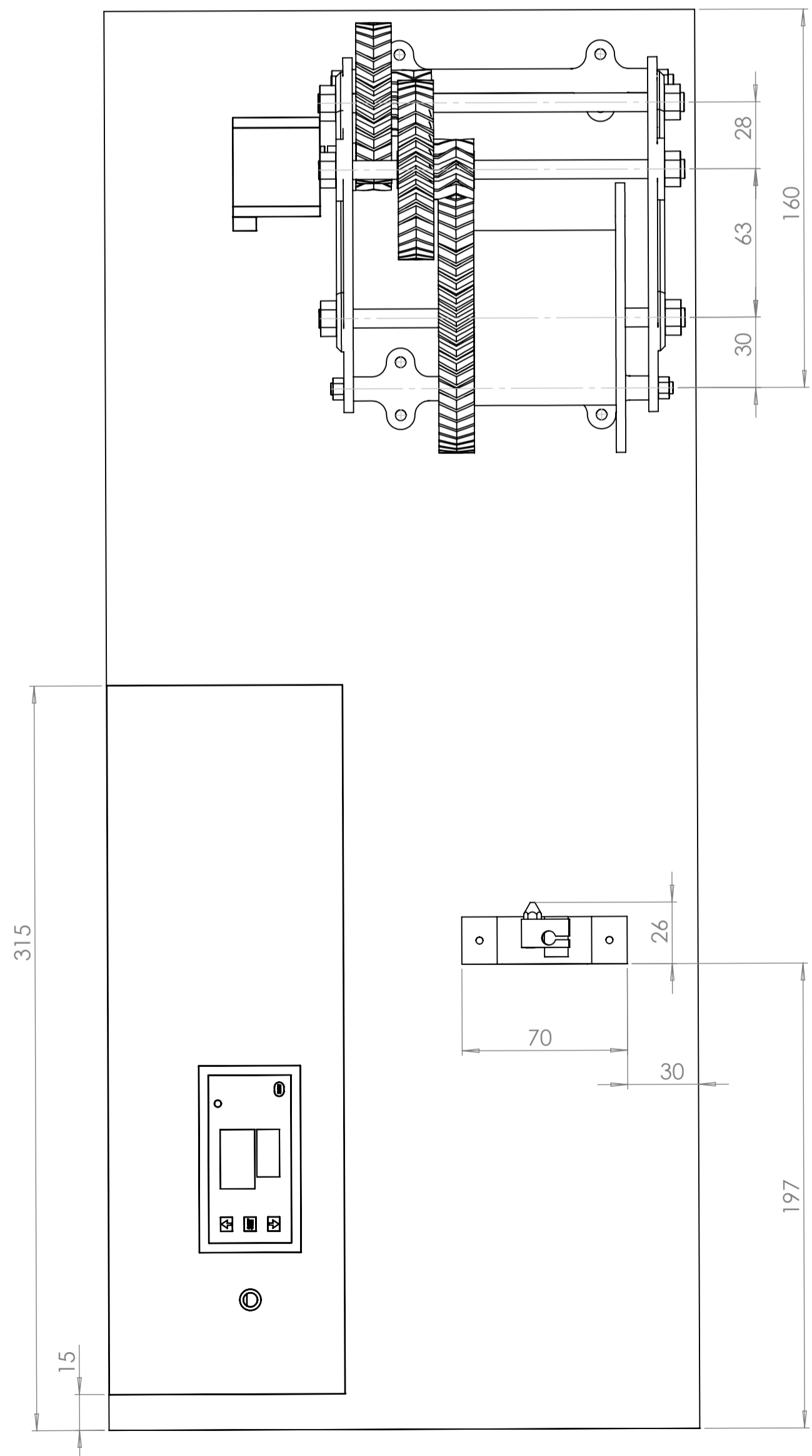
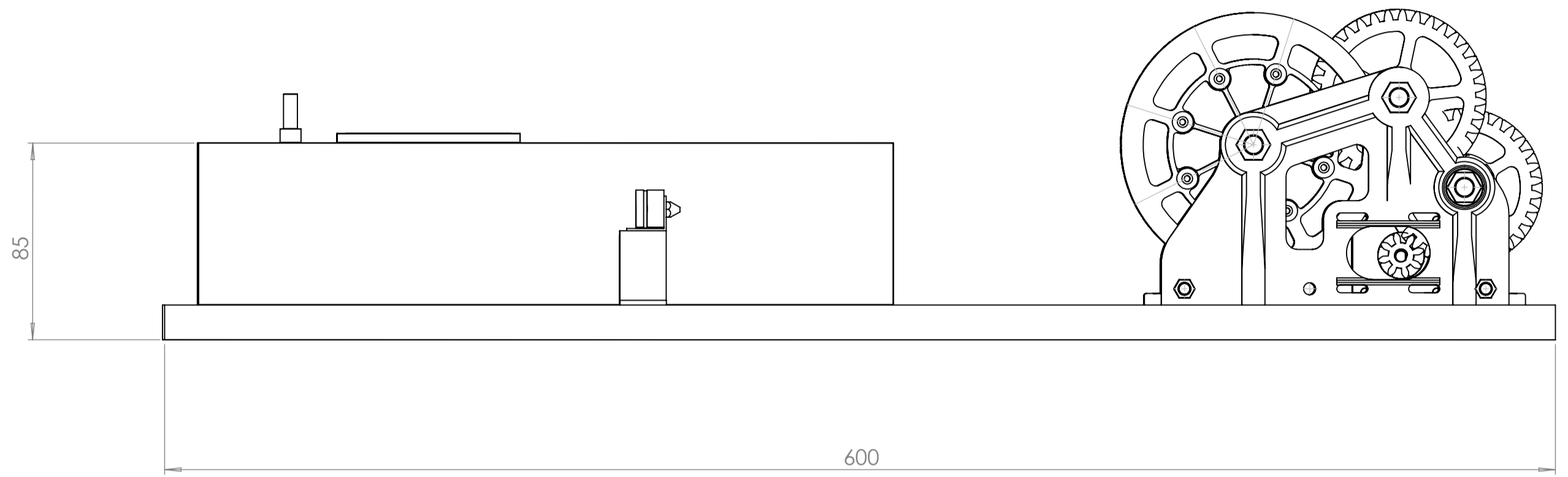
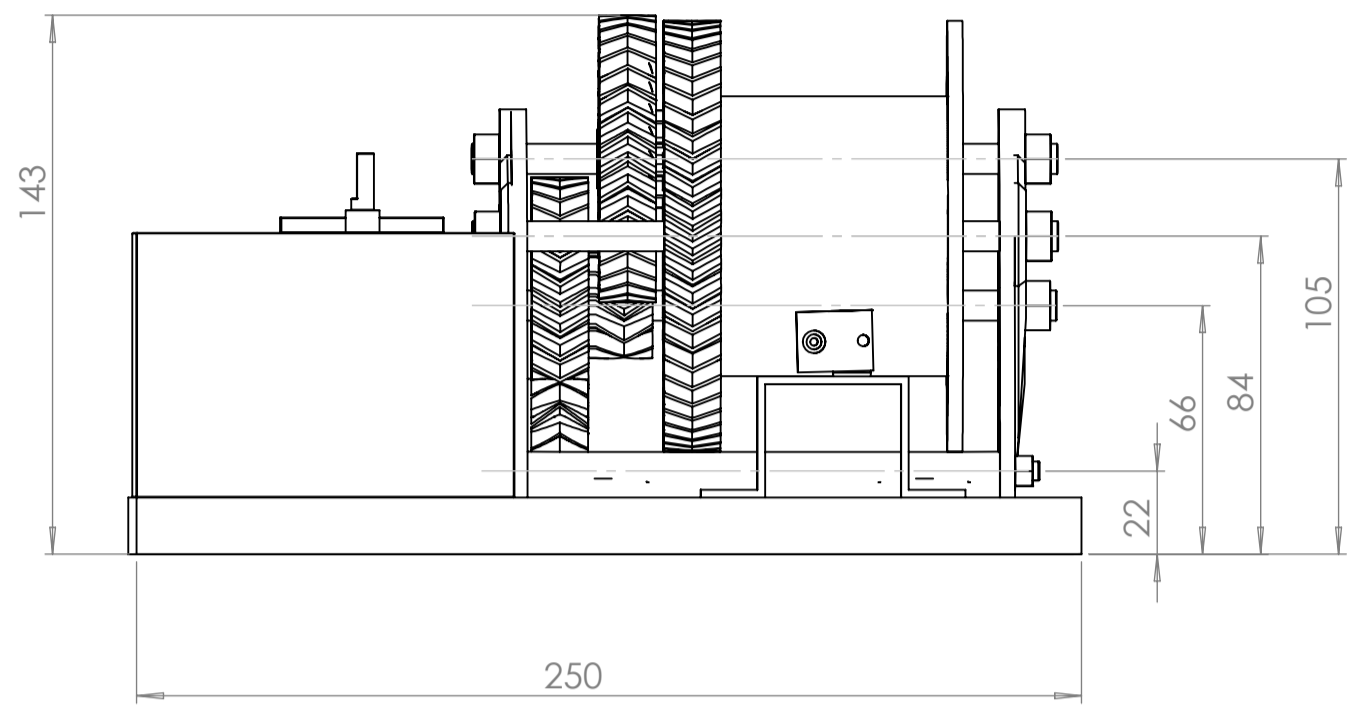
Підп. та дата

Інв. № дубл.

Інв. №

Інв. №

Інв. № орг.



БП.ПМ-33.00.000.СБ

Перев. заспоку.

Довід. №

Підп. та дата

Інв. № дубл.

Інв. №

Інв. №

Інв. №

Інв. №

					<b>БП.ПМ-33.02.000.СБ</b>		
					<b>Загальний вид РЕTamentor</b>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Літ.	Маса	Масштаб
Розроб.	Матейчук Д.О.						1:1
Перев.	Врюкало В.В.						
Т. контр.					Аркуш	Аркушів	
Н. контр.					ІФНТУНГ ПМ-21-1		
Утв.					Формат А1		