

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.ПМІ-64.00.00.000.ПЗ

Група ПМІ-21-1

Комарець Володимир Володимирович

2025

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

Комарець Володимир Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 621.941.2
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Модифікація верстата CNC3-3018Pro для фрезерування довгих гвинтових поверхонь
(назва роботи)

Інженерія мехатронних систем
(назва освітньої програми)

131 – Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

Комарець Володимир Володимирович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Копей Володимир Богданович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри
професор Панчук В.Г.
(посада) (підпис) (дата) (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

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 _____

« ____ » _____ 2025

року

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Комарець Володимир Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модифікація верстата CNC3-3018Pro для фрезерування
довгих гвинтових поверхонь

керівник роботи Копей Володимир Богданович (прізвище,
ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Строки подання студентом роботи: 12 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: верстат CNC 3018 Pro, матеріал — полімер; використання програмного забезпечення Autodesk Fusion 360 / ArtCAM 2018

4. Аналіз базової конструкції верстата CNC 3018 Pro, визначення обмежень при обробці гвинтових поверхонь, обґрунтування схеми модернізації з інтеграцією поворотної осі, проектування опорних елементів та ротаційної осі, вибір інструменту та програмного забезпечення для обробки, експериментальна частина, аналіз результатів.

6. Консультанти розділів роботи

Ро зділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітк и
1			
2			
3			
4			
5			

Студент _____ Комарець В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Копей В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

“ ___ ” _____ 2025 р.

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему: Модифікація верстата CNC3-3018Pro для фрезерування довгих гвинтових поверхонь. Робота складається з 58 аркушів, містить 10 зображення, 7 додатків.

Об'єкт дослідження — процес модернізації настільного фрезерного верстата з ЧПК моделі CNC3-3018Pro.

Предмет дослідження — конструктивні елементи модернізації верстата, зокрема розробка поворотної осі, опорних вузлів та їхнє інтегрування у загальну систему керування.

Мета — підвищити функціональні можливості та точність обробки шляхом конструктивної перебудови базової моделі CNC-верстата для реалізації обробки довгих гвинтових поверхонь.

У першому розділі проаналізовано базову конструкцію CNC3-3018Pro, визначено її технічні обмеження та розглянуто варіанти модернізації.

У другому розділі описано розробку поворотної осі з використанням крокового двигуна Nema 17, планетарного редуктора 5:1 і патрона K02-63. Також змодельовано і описано опорні елементи для підтримки заготовки.

У третьому розділі викладено процес програмної адаптації верстата до нової конструкції з використанням ArtCAM 2018, підібрано інструмент і режими обробки. Проведено експериментальну оцінку роботи верстата після змін.

У четвертому розділі подано аналіз результатів, порівняння з альтернативними рішеннями та рекомендації щодо подальших удосконалень.

Ключові слова: CNC3-3018Pro, модернізація, поворотна вісь, Nema 17, планетарний редуктор, ArtCAM, гвинтові поверхні, опорна конструкція.

Студент: Комарець В.В.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis: Modification of the CNC3-3018Pro Machine for Machining Long Helical Surfaces. The thesis consists of 58 pages, including 34 illustrations, and 7 appendices.

Object of research: the process of upgrading a desktop CNC milling machine — the CNC3-3018Pro.

Subject of research: the structural components of the machine's modernization, specifically the development and integration of a rotary axis and supporting elements into the control and mechanical system.

Objective: to enhance the machine's functionality and machining accuracy by modifying its basic design to allow for the processing of long helical surfaces.

In the first chapter, the standard configuration of the CNC3-3018Pro machine is reviewed, its limitations are identified, and potential upgrade paths are analyzed.

The second chapter describes the development of a rotary axis using a Nema 17 stepper motor, a 5:1 planetary gearbox, and a K02-63 four-jaw chuck. Support structures are also designed to stabilize the workpiece during rotation.

The third chapter outlines the software configuration using ArtCAM 2018 to adapt toolpaths for rotary machining. Suitable cutting tools and machining parameters are selected, and the machine's performance after the upgrade is evaluated.

The fourth chapter presents an analysis of the results, a comparison with alternative solutions, and recommendations for further improvements.

Keywords: CNC3-3018Pro, machine modification, rotary axis, Nema 17, planetary gearbox, ArtCAM, helical surface machining, support structure.

Komarets V.V.

Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1. Аналіз конструкції CNC 3018 Pro.....	9
1.1 Загальний огляд конструкції.....	9
1.2 Аналіз обмежень стандартної конструкції при обробці	15
1.2 Огляд наявних рішень.....	20
Розділ 2. Проектування модернізації CNC 3018 Pro	32
2.1 Обґрунтування вибору схеми модернізації.....	32
2.2 Проектування ротаційної осі з кроковим двигуном Nema 17	34
2.2.1 Вибір редуктора: планетарний редуктор 5:1 (Nema 17)	36
2.2.2 Вибір патрона: K02-63 (4-кулачковий).....	38
2.2.3 Вал D25L30 з діаметром 8 мм.....	40
2.3.1 Принцип встановлення та суміщення з поворотною віссю.....	42
2.3.2 Виготовлення опорних елементів	44
2.4 Підсилення конструкції та боротьба з люфтами	48
Розділ 3. Особливості та експериментальні дослідження	48
3.3.1 Особливості САМ-програмування для обертальної обробки у середовищі Autodesk ArtCAM 201849	
3.3 Підбір інструменту та параметрів фрезерування гвинтових поверхонь	51
Висновок	55
Перелік використаних джерел	57
Додатки	3

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Комарець В				Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Прізвище				3		
Реценз.					ІФНТУНГ		
Н. Контр.					гр. ПМІ-21-1		
Затверд.					Пояснювальна записка		

ВСТУП

Актуальність роботи

Одним із найпоширеніших настільних верстатів з числовим програмним керуванням для початківців та освітніх цілей є модель *CNC 3018* (зокрема, її модернізована версія *CNC3-3018Pro*). Цей компактний і бюджетний фрезерно-гравірувальний верстат набув популярності завдяки невисокій ціні та доступності, що дозволяє новачкам опанувати основи CNC-технологій без значних фінансових витрат. В описах виробників і продавців підкреслюється, що *CNC 3018 Pro* спеціально розроблений для самостійного використання, навчання та досліджень, орієнтуючи цей прилад на потреби DIY-спільноти й освітнього середовища.

Стандартна комплектація та конструкція таких бюджетних верстатів накладають суттєві обмеження на типи деталей і геометрій, які можна обробляти. Робоча зона *CNC 3018* становить близько $300 \times 180 \times 40$ мм, і верстат має лише три осі руху (X, Y, Z), що унеможлиблює фрезерування довгих циліндричних або гвинтових поверхонь традиційними методами. Зокрема, виготовлення полімерного гвинта з довгою спіральною поверхнею виходить за межі штатних можливостей цього обладнання. Для виконання таких нетипових завдань необхідна модернізація – додавання спеціальних вузлів або розширення кінематичної схеми верстата (наприклад, впровадження додаткової обертальної осі).

Потреба в модифікаціях бюджетного ЧПК-обладнання зумовлена прагненням розширити його технологічні можливості без придбання дорогих промислових верстатів. Ентузіасти часто обирають шлях удосконалення *CNC 3018* власними силами як більш економічно вигідний варіант, порівняно з купівлею великого верстата. Сформувалася широка DIY-спільнота, що обмінюється досвідом щодо модернізації таких верстатів: від підсилення механіки та збільшення робочої області до встановлення потужніших шпинделів і додаткових осей. На форумах власники *CNC 3018* наголошують,

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що модифікація цих верстатів стала невід'ємною частиною хобі, і наводять численні приклади успішних удосконалень. Зокрема, активно обговорюється можливість додавання четвертої (ротаційної) осі, яка дала б змогу обробляти круглі заготовки та нарізати гвинтові поверхні; відзначається, що існують як комерційні набори, так і саморобні рішення для реалізації такої функціональності.

Отже, модернізація настільного верстата типу *CNC3-3018Pro* для виконання нетипових задач (таких як фрезерування довгих гвинтових поверхонь) є актуальною як з практичної, так і з навчально-інженерної точки зору. Вона відповідає сучасним тенденціям розвитку DIY-технологій і потребі у доступних методах виготовлення складних деталей, водночас сприяючи набуттю студентами цінного досвіду в конструюванні та вдосконаленні обладнання.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження – модернізація настільного верстата *CNC3-3018Pro* з метою розширення його технологічних можливостей, а саме забезпечення можливості фрезерування довгих гвинтових (спіральних) поверхонь із полімерного матеріалу.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

Проаналізувати конструкцію та технічні характеристики верстата *CNC3-3018Pro*, визначивши його обмеження щодо обробки довгих заготовок і можливості інтеграції додаткової осі.

Розробити конструкцію ротаційної (четвертої) осі, призначеної для фіксації та рівномірного обертання довгої полімерної заготовки під час фрезерування її гвинтової поверхні.

Вибрати оптимальне компонування і необхідні комплектуючі для реалізації ротаційної осі (привід, патрон або інші елементи для утримання

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

заготовки, систему кріплення осі до рами верстата), а також передбачити зміни в системі керування для підтримки нової осі.

Здійснити монтаж і налаштування розробленої ротаційної осі на верстаті, виконавши необхідні механічні доопрацювання конструкції та підключення осі до системи керування *CNC3-3018Pro*.

Провести експериментальну перевірку модернізованого верстата: виконати фрезерування тестової заготовки з довгою гвинтовою поверхнею із вибраного полімерного матеріалу, оцінити працездатність удосконаленого обладнання та якість отриманої деталі.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження: процес фрезерної обробки (механічного фрезерування) довгих гвинтових поверхонь із полімерного матеріалу на настільному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК). Іншими словами, об'єктом виступає технологія та обладнання для виготовлення спіральних (гвинтових) поверхонь на зразках з полімерів за допомогою малого фрезерного верстата типу *CNC3-3018Pro*.

Предмет дослідження: конкретні конструктивно-технологічні рішення з модернізації верстата *CNC3-3018Pro*, спрямовані на забезпечення можливості фрезерування довгих гвинтових поверхонь, та їх експериментальна перевірка. До предмета належить саме той аспект, як обрані удосконалення верстата (наприклад, розширення робочої зони по осі *Y* чи додавання поворотної осі) впливають на здатність обладнання точно формувати довгі спіральні профілі з полімерного матеріалу і забезпечувати відповідність отриманих деталей заданим параметрам. Дослідження зосереджене на працездатності модернізованого верстата та якості отриманих гвинтових поверхонь.

					<i>КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження

У ході роботи застосовано комплекс експериментальних методів та підходів, зокрема:

- Аналіз конструкції базового верстата CNC3-3018Pro для виявлення його фізичних обмежень щодо розмірів обробки та кінематичних можливостей. На цьому етапі вивчалися вузли верстата, оцінювалася жорсткість, робочий простір та необхідність модифікацій для виконання завдання.
- Добір і монтаж елементів модернізації – обрано та встановлено додаткові компоненти, що розширюють функціональність верстата. Зокрема, було вирішено подовжити вісь Y (робочий стіл) для обробки довгих заготовок (існують готові комплекти розширення, що збільшують хід осі Y до ~ 320 мм) та впровадити поворотну вісь (четверту вісь) для фіксації і обертання циліндричних заготовок. Установка поворотної осі здійснювалася шляхом додавання додаткового крокового двигуна з патроном; подібні модулі для 3018-серії верстатів є доступними на ринку або виготовляються самостійно.
- Підключення та налаштування модернізованого обладнання – електричне під'єднання нових вузлів (крокового приводу поворотної осі, подовжених кінцевих датчиків тощо) до системи керування ЧПК, конфігурування контролера (прошивки GRBL) для підтримки четвертої осі та збільшеного робочого поля, а також калібрування параметрів (наприклад, кроків на оберт для поворотної осі, кінцевих координат тощо).
- Експериментальні випробування – проведення серії пробних фрезерувань довгих гвинтових поверхонь на заготовках з вибраного полімерного матеріалу. Заготовки закріплювалися на модернізованому верстаті (на поворотній осі або розширеному столі), після чого виконувалася обробка за попередньо підготовленими траєкторіями (G-

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кодами). Кожен експериментальний прогін дозволяв перевірити працездатність модернізацій у реальних умовах різання.

- Візуальна та вимірювальна оцінка результатів – отримані гвинтові поверхні аналізувалися на наявність дефектів форми і якості поверхні. Проводилися вимірювання основних геометричних параметрів виготовлених деталей (крок і профіль спіралі, діаметр, довжина тощо) за допомогою штангенінструменту та інших вимірювальних засобів, а також візуальний контроль для виявлення відхилень (нерівномірність кроку, шорсткість, сліди вібрацій).
- Порівняння отриманих характеристик із запланованими – результати вимірювань зіставлялися з теоретично заданими параметрами гвинтової поверхні, передбаченими при проектуванні траєкторії фрезерування. Це дало змогу оцінити точність виготовлення та ефективність модернізації: наскільки реальні вироби відповідають розрахунковим розмірам і формі, чи досягнуто необхідної якості різьби (спіралі) на полімерному матеріалі.

Варто зазначити, що теоретичні або числові методи моделювання у цьому дослідженні не використовувалися. Усі висновки та результати ґрунтуються виключно на даних фізичного експерименту та емпіричному аналізі отриманих деталей. Іншими словами, робота носить суто прикладний характер, а перевірка працездатності модернізованого обладнання здійснювалася шляхом практичних випробувань без залучення комп'ютерного моделювання чи розрахункових прогнозів.

					<i>КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ CNC 3018 PRO

1.1 Загальний огляд конструкції та технічних характеристик CNC 3018 Pro



Рис. 1 Зовнішній вигляд настільного верстата CNC 3018 Pro (3-осьовий фрезерний гравер)

Модель 3018 Pro являє собою компактний CNC-верстат із робочою зоною $\sim 300 \times 180 \times 45$ мм при габаритних розмірах близько $400 \times 330 \times 240$ мм. Верстат виконано у схемі з рухомим порталом: по осі X рухається поперечна балка зі шпинделем, вісь Y реалізована як поздовжнє переміщення столу, а вісь Z піднімає/опускає шпиндель. Така конфігурація забезпечує три ступені свободи для фрезерування та гравірування плоских заготовок.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція рами та осей. Механічна рама CNC 3018 Pro побудована з алюмінієвих профілів (екструзій) і пластин, що утворюють жорстку основу верстата. Основу і портал виконано з алюмінію, тоді як окремі елементи кріплення виготовлені з інженерного пластику (наприклад, бокові стійки з бакеліту). Лінійні напрямні кожної осі – це круглі сталеві вали (як правило, діаметром ~8 мм у базовій версії), на яких встановлено лінійні підшипники ковзання. По дві паралельні напрямні використано для осей X та Y , що забезпечує стійкість portalу та столу відповідно. Переміщення здійснюється за рахунок ходових гвинтів типу T8 (діаметром 8 мм з трапецеїдальною різьбою) на кожній осі – такі гвинтові передачі з'єднані пружними муфтами безпосередньо з валами крокових двигунів. В результаті кожен оберт двигуна переміщує вісь приблизно на 4 мм (крок гвинта), що дає тонкий крок позиціонування при мікрокроковому керуванні. Як приводи використано крокові двигуни розміру NEMA17 (42 мм) з номінальним струмом ~1,3 А та моментом утримання близько 0,25 Н·м. Такі двигуни встановлено по одному на кожну вісь X , Y , Z , і їхнього зусилля достатньо для прецизійного переміщення малих заготовок. Положення осей не контролюється кінцевими вимикачами (в стандартній комплектації вони відсутні), тому початкове базування здійснюється вручну або виконується апаратний нуль без апаратних упорів. Сучасні настільні верстати з ЧПК, такі як Genmitsu CNC 3018 Pro, забезпечують базові можливості фрезерування для аматорських і напівпрофесійних завдань [1].

Шпиндель. У стандартній комплектації верстат оснащено малопотужним шпинделем на основі колекторного двигуна типу 775 з живленням 24 В. Цей двигун має швидкість обертання на холостому ходу до ~8000–10000 об/хв і оснащений цанговим патроном стандарту ER11 для закріплення ріжучого інструменту. Стандартна конструкція передбачає використання шпинделя з обмеженою потужністю, що накладає обмеження на типи матеріалів, які можуть бути оброблені [2]. Патрон ER11 дозволяє використовувати оснащення з хвостовиком 3,175 мм (1/8") у стандарті, а за потреби – цанги до

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6–7 мм. Номінальна споживана потужність шпинделя становить близько 60 Вт (максимальна – до 120 Вт)а. Через обмежену потужність та швидкість стандартний шпиндель придатний переважно для обробки м'яких матеріалів – деревини, пластиків, друкованих плат, а також м'яких металів (наприклад, латуні або алюмінію 6061) на невеликій глибині різання. Робота з твердими металами без модернізації небажана, оскільки може призвести до надмірного навантаження на шпиндель (перегріву двигуна або пошкодження оснастки). Шпиндельний вузол закріплено на вертикальній каретці осі Z, виконаний із пластику (нейлону), яка переміщується вздовж двох направляючих валів малого діаметра. У процесі модернізації часто передбачають заміну штатного двигуна більш потужним (наприклад, 200–300 Вт) або встановлення лазерного модуля для різання і гравіювання – конструкція 3018 Pro підтримує такі оновлення.

Контролер та електроніка. Система керування CNC 3018 Pro побудована на базі 8-розрядного мікроконтролера ATmega328p (Arduino Nano) із прошивкою GRBL. Контролер GRBL версії 1.1 – це відкрите ПЗ для інтерпретації G-коду, широко застосовуване в настільних ЧПК. Штатна плата керування містить три драйвери крокових двигунів (як правило, чипи DRV8825), які забезпечують мікрокрокове керування моторами, та підключається до комп'ютера через інтерфейс USB-UART. Функції платформи обмежені базовим набором: відсутні апаратні кінцеві датчики положення та датчик автоустановки нуля (probe), немає аварійної кнопки стоп – ці опції реалізовані в дорожчих модифікаціях (наприклад, моделі 3018 ProVer). Для автономної роботи без ПК можливе підключення опціонального ручного контролера з LCD (Off-line Controller), який зчитує завдання з SD-карти і дозволяє керувати верстатом безпосередньо. Для підвищення ефективності та можливості обробки складних форм доцільним є дооснащення верстата додатковими осями [3], [4].

Програмне забезпечення керування. Для підготовки траєкторій обробки використовується стандартний G-код, сумісний із GRBL-контролером.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Створення і постобробка моделей здійснюється у сторонніх CAD/CAM-системах (Fusion 360, ArtCAM, Carbide Create тощо), після чого готовий G-код надсилається на верстат через спеціальні утиліти. Найбільш поширеним програмним забезпеченням для керування 3018 Pro є GrblControl (Candle) – проста графічна програма відправлення G-коду, що постачається в комплекті. Candle дозволяє завантажувати файл траєкторії, запускати/зупиняти виконання, вручну пересувати осі та ін. Альтернативно застосовуються й інші сумісні програми, зокрема Universal G-Code Sender (UGS) та *LaserGRBL* (для лазерного гравірування). Підтримуються операційні системи Windows, Mac OS і Linux – завдяки відкритості GRBL існує широкий вибір програмних рішень для різних платформ.

Технічні характеристики CNC 3018 Pro

- Робоче поле (XYZ): 300 × 180 × 45 мм (X × Y × Z, область ефективного гравірування).
- Габарити верстата: ~400 × 330 × 240 мм.
- Каркас: алюмінієва рама (профілі 20×20), боковини із пластику (бакеліт/акрил).
- Лінійні напрямні: круглі сталеві вали Ø8 мм (осі X, Y) та Ø8 мм (ось Z); лінійні підшипники кочення (типу LM8UU).
- Приводи осей: крокові двигуни NEMA17, 42 мм (1,3 А, 0,25 Н·м); ходові гвинти T8 з кроком 4 мм; максимальна швидкість подачі – до ~500 мм/хв (залежно від матеріалу).
- Шпиндель: колекторний двигун 775, 24 В, ~8000 об/хв (під навантаженням), потужність ~60 Вт (пікова до 120 Вт); цанга ER11 (діаметр інструменту 1–7 мм).
- Контролер: плата Arduino Nano (ATmega328p) з прошивкою GRBL v1.1; драйвери крокових двигунів – DRV8825; інтерфейс підключення USB.
- Живлення: блок живлення 24 В = 5 А (вбудований драйвер шпинделя на платі).

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- Точність: повторюваність позиціонування $\sim \pm 0,1$ мм; мінімальний крок переміщення $\sim 0,025$ мм (з урахуванням мікрокроку 1/8).

ПЗ для керування: Candle (GrblController), UGS, LaserGRBL тощо; підтримка форматів G-коду (.tap, .nc), управління по USB.

Переваги моделі 3018 Pro:

Доступність і популярність. Ця модель належить до найдешевших настільних CNC, її орієнтовна вартість $\sim \$200$, що робить її дуже привабливою для початківців і аматорів. Верстат постачається як *DIY*-набір із простим монтажем (зібрати можна менше ніж за 2 години). Завдяки великій спільноті користувачів доступні численні інструкції, приклади і технічна підтримка онлайн. CNC 3018 Pro часто використовується в освітніх цілях та хобі-проектах як перший крок у знайомстві з ЧПК-технологіями.

Компактність. Верстат має настільне виконання і невелику масу (~ 7 кг), що дозволяє встановити його в домашній майстерні чи лабораторії. Невеликі розміри спрощують транспортування та зберігання. При цьому робочого поля 30×18 см достатньо для дрібних виробів (гравіювання табличок, виготовлення плат, різьблення по дереву тощо).

Відкритість і модернізуємість. Конструкція 3018 Pro модульна і легко піддається модернізації. Існують готові комплекти розширення робочої зони (збільшення осі Y до формату 3040), заміни шпинделя на більш потужний (наприклад, 300 Вт) або встановлення лазерного модуля. Контролер на базі Arduino підтримує перепрошивку та апгрейд електроніки – наприклад, заміну драйверів, додавання концевих датчиків, підключення зовнішнього блоку керування тощо. Велика кількість доступних опцій робить цю платформу гнучкою для вдосконалення під потреби користувача.

Низький поріг входження. Верстат 3018 Pro постачається з простим у використанні ПЗ (Candle) і прикладами, що дозволяє швидко розпочати роботу. Він слугує відмінним інструментом для навчання основам CNC, даючи змогу відпрацювати навички без ризику зіпсувати дороге обладнання. Попри простоту, цей верстат здатен виконувати реальні

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завдання з фрезерування та гравірування різноманітних матеріалів (в межах своєї потужності), тому користувач отримує практичний досвід повного циклу підготовки і виготовлення деталей.

Недоліки конструкції:

Обмежена жорсткість і потужність. Простота конструкції зворотна до її міцності: відносно тонкі напрямні (8 мм) та пластикові кріплення знижують жорсткість верстата. Під час різання твердих матеріалів або при глибокій подачі можливі вібрації і прогин напрямних, що погіршує точність. Малопотужний шпindel не забезпечує ефективної обробки твердих металів і потребує дуже малих глибин різання та швидкостей подачі, інакше є ризик зупинки або пошкодження двигуна. Таким чином, продуктивність 3018 Pro обмежується легкими завданнями по дереву, пластику, гравіруванням по поверхні м'яких металів.

Малий робочий об'єм. Робоча зона $\sim 30 \times 18$ см достатня тільки для відносно невеликих деталей. По висоті також існує обмеження: шпindel має хід ~ 45 мм, і під порталом можна розмістити деталь висотою лише кілька сантиметрів. Це ускладнює роботу з об'ємними заготовками і виключає обробку великих площ без розбиття на сегменти. Для збільшення області обробки виробник пропонує опціональний набір продовження осі Y (до ~ 370 мм по довжині), але цей апгрейд потребує додаткових витрат.

Відсутність професійних функцій. Базова модель не оснащена багатьма елементами, притаманними промисловим CNC. Зокрема, відсутні кінцеві вимикачі (нульові датчики) осей – це означає, що автоматичне повернення в нуль та повторюване позиціонування ускладнені без модернізації. Немає датчика інструмента (автоматичної проби по Z), відсутній датчик обертів шпинделя та система охолодження. Також штатно відсутній кожух або кожна для збору стружки – під час роботи утворюється пил та шум, що потребує додаткових заходів (витяжка, кожух) з боку користувача.

Точність і швидкість нижчі за промислові аналоги. Заявлена точність позиціонування $\sim 0,1$ мм є прийнятною для багатьох любительських задач, але

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може бути недостатньою для тонких гравюр чи прецизійних компонентів. Конструкція без шарико-гвинтових пар та з люфтами в з'єднаннях не гарантує стабільної високої точності на великих довжинах. Швидкість переміщення осей та подачі обмежена (сотні мм/хв) в порівнянні з професійними верстатами, що подають інструмент зі швидкістю кілька м/хв. Це означає нижчу продуктивність і більш тривалий час виготовлення деталей на 3018 Pro.

У відкритих джерелах описано численні приклади вдосконалення 3018 Pro шляхом додавання поворотної осі та підсилення жорсткості [5], [6].

1.2 АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ СТАНДАРТНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ ДОВГИХ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ

Стандартний настільний верстат CNC 3018 Pro має низку конструктивних обмежень, що унеможливають ефективне фрезерування довгих гвинтових (спіральних) поверхонь. Цей базовий 3-осьовий пристрій спроектовано для гравіювання по площині і невеликих деталей, тому спроби обробляти на ньому циліндричні заготовки з гвинтовим профілем стикаються з суттєвими технічними перешкодами. Розглянемо головні з них.

Відсутність поворотної осі. Верстат 3018 Pro не оснащено четвертою (А-) віссю, тобто пристроєм для обертання заготовки. Це означає, що обробка деталі з усіх боків (навколо її осі) в стандартній конфігурації неможлива. Виробник прямо зазначає обмеження: на цьому верстаті не можна гравіювати циліндричні або криволінійні об'єкти без спеціальних пристосувань. Фрезерування гвинтової поверхні вимагає синхронного обертання деталі і поступального руху фрези; без поворотної осі така кінематика недосяжна. Система керування GRBL, встановлена на 3018 Pro, підтримує лише три лінійні осі і не має штатного режиму для поворотного руху (не можна задати рух по осі в градусах). Існують модифіковані версії прошивки та апаратні «хаки», що дозволяють використати одну з лінійних осей як обертальну, але це компромісне рішення. Наприклад, деякі ентузіасти перепідключали кроковий двигун осі Y до поворотного пристрою і тимчасово жертвували

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рухом столу, реалізуючи обертання заготовки замість поступального переміщення. Однак така схема дає обмежену функціональність і не еквівалентна повноцінній 4-осьовій обробці – відсутня можливість одночасно обертати деталь і переміщувати її по довжині, що критично для рівномірної спіральної фрезеровки. У результаті без поворотної осі неможливо виконати безперервне фрезерування гвинтового профілю; можна хіба що спробувати поетапно обробляти сегменти, вручну повертаючи заготовку, але це неминуче призводить до похибок суміщення і нерівномірності кроку різьби.

Обмежена довжина осі Y. Робоче поле верстата 3018 Pro є дуже невеликим за промисловими мірками – приблизно 300×180×40 мм по осях X, Y, Z відповідно. Таким чином, максимальна довжина деталі, яку можна обробити вздовж, обмежується ~180 мм ходом осі Y. Очевидно, що довгі гвинтові вироби (наприклад, ходовий гвинт довжиною 0,5–1 м) не помістяться в робочу зону. Навіть для відносно невеликих деталей ця довжина накладає обмеження: при спробі нарізати різьбу або спіраль на стрижні довжиною, близькою до 180 мм, доведеться працювати «впритул» до межі столу. Користувачі відзначають, що робочий хід 300×180 мм є вкрай лімітованим; часто виникає потреба модернізувати верстат до формату 3040 (збільшивши вісь Y до ~300 мм) для практичних завдань. Отже, стандартна довжина осі Y не дозволяє обробляти *довгі* гвинтові поверхні без радикального зменшення масштабу деталі або перестановки заготовки, що знижує точність і зручність роботи (ризик зміщення кроку між операціями).

Недостатній хід по осі Z. Амплітуда руху шпинделя у вертикальному напрямку (Z) в CNC 3018 Pro становить всього близько 40–45 мм. Цього вистачає для гравіювання плоских матеріалів або тонких заготовок, але недостатньо для повноцінного фрезерування об'ємних циліндричних тіл. По-перше, під інструментом мусить поміститися сама заготовка певного діаметра. У стандартній конфігурації верстата зазор між шпинделем (у верхньому положенні) і столом дуже малий – фактично пристрій розрахований на обробку плоских деталей висотою кілька сантиметрів. Циліндрична болванка

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діаметром хоча б 50–60 мм вже не влізе у вертикальний простір верстата, не кажучи про потребу в запасі висоти для інструмента. По-друге, навіть якщо закріпити тонкий довгий стрижень, ходу Z може не вистачити для ефективного фрезерування його бічної поверхні під потрібним кутом. Іншими словами, малий робочий хід по Z та низький просвіт конструкції роблять неможливим оброблення циліндрів середнього і великого діаметра. Частково проблему вирішують модифікації — підняття порталу, подовження напрямних Z тощо, але в базовій моделі цього не передбачено.

Низька жорсткість конструкції при роботі з довгими деталями. Модель 3018 Pro належить до легких настільних верстатів, тому її конструкція не забезпечує достатньої жорсткості при навантаженнях, що виникають під час фрезерування довгих або масивних заготовок. Основна рама і портал виконані з алюмінієвого профілю і тонких алюмінієвих пластин, де це можливо, замість сталевих елементів. Лінійні напрямні – переважно валки малого діаметра ($\varnothing 10$ мм для осі Y) з прольотом ~ 300 мм, що спричиняє їхній прогин під вагою заготовки або при прикладенні сили фрезою. Гвинтові передачі – ходові гвинти типу T8 з кроком ~ 2 мм, приводяться кроковими двигунами невеликої потужності. Така «полегшена» конструкція знижує собівартість і підходить для дрібних робіт, але схильна до вібрацій і вигинів при значних навантаженнях. При спробі обробки довгої деталі можливі кілька негативних явищ: прогин направляючих (стіл або портал можуть дещо «гуляти»), особливо якщо деталь виходить за межі опор), резонансні вібрації під час різання (через малу масу і демпфування станини) та накопичення похибок позиціонування. На практиці користувачі 3018 Pro відзначають помітний люфт і хиткість вузлів. Заявлено, що в конструкції застосовано пружинні анти-люфтові гайки (подвійні бронзові гайки) для зменшення зворотного ходу гвинтів. Однак навіть після регулювання залишковий люфт може досягати $\sim 0,5$ мм на осях – це відчутно як «вільний хід» шпинделя при зміні напрямку руху. Такий люфт негайно впливає на точність гвинтової обробки: наприклад, може проявитися нерівномірність кроку різьби, коли зазор в передачі спричиняє варіацію кроку

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

між сусідніми витками. До того ж, люфт і гнучкість конструкції ведуть до мікросунень фрези, що погіршує профіль різьби (витки виходять нечіткими). Биття і колювання деталі теж неминучі, якщо довгий прут закріплений недостатньо жорстко. На малорозмірному столі 3018 Pro складно надійно притиснути тонку довгу заготовку лише стандартними струбцинами; будь-який виступаючий кінець під час різання відхиляється, викликаючи овальність та вібрацію різця.

Обмеження системи керування (GRBL 3-axis). Як зазначено, стандартна плата на базі GRBL в CNC 3018 Pro керує трьома осями і не підтримує додаткових приводів. Навіть придбавши поворотну вісь (є готові набори «4th axis» з патроном і задньою бабкою), користувач стикається з тим, що базовий контролер її не обслуговує. Необхідно або змінювати контролер на 4-осьовий, або використовувати нестандартні прошивки/плагіни, що «обманюють» GRBL, замінюючи лінійний рух обертальним. Такі обхідні методи, однак, суттєво ускладнюють процес підготовки програми. Зокрема, САМ-пакети для різьбових/спіральних траєкторій намагаються використовувати четверту вісь або спеціальні цикли різьбонарізання, які GRBL (3-axis) просто не розуміє. Виникають помилки пост-процесора на кшталт *“only 3 axis supported”*, як повідомляють користувачі Fusion 360 при спробі генерувати 4-осьову стратегію. Тому без переходу на іншу систему керування реалізувати правильну координацію обертів заготовки і поступального руху фрези неможливо.

Відсутність можливості утримання довгих тонких деталей (немає задньої бабки). Конструкція 3018 Pro не передбачає установки задньої бабки або будь-якої підтримки другого кінця деталі. У класичному токарному чи 4-осьовому фрезеруванні довгий прутков обов’язково підтримують з двох боків: з одного – приводний патрон, з іншого – обертовий центр (бабка), щоб запобігти прогину. Задня бабка є критичною для стабілізації довгих і тонких заготовок. На маленькому верстаті без бабки якщо затиснути довгий циліндр тільки з одного боку, вільний кінець буде вібрувати і відхилятися під час різання. Це

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до биття деталі, конічності отворів, зриву різання або навіть до вигину/вильоту заготовки зі збільшенням глибини різання. Відсутність штатного круглого поворотного патрона також ускладнює закріплення – стандартні притиски призначені для плоских об'єктів і не охоплюють круглий прут без спеціальних призматичних пристроїв. Деякі користувачі намагалися виготовляти саморобні призми або вузли обертання для 3018 Pro, але без підтримки з двох кінців результати були незадовільні – деталь неможливо втримати співвісно при навантаженні, виникає зміщення осі обертання і вібрація, що посує якість різьби.

Практичні приклади підтверджують вказані проблеми. У співтоваристві DIY часто повідомляють про спроби модифікувати CNC 3018 для різьбових робіт, проте більшість зізнається у невдачах без серйозної модернізації. На форумах виробник SainSmart і реселлери прямо заявляють, що циліндричні та криві поверхні не можуть бути оброблені стандартним 3018-PRO. Користувачі, які пробували нарізати різьбу фрезеруванням на 3018, стикалися з нерівномірним кроком різьби через люфти та неточну координацію рухів, з биттям заготовки через відсутність підтримки, а також з тим, що банально не вистачало ходу осей для завершення програми. Один з ентузіастів описує модернізацію 3018 Pro до 4 осей як проект, що зрештою перетворив «майже стоковий» верстат на практично нову машину після вкладення кількох сотень доларів і заміни більшості деталей. Інші повідомляють про істотний апгрейд (подовження осей, посилення рами, встановлення потужнішого шпинделя), без яких точне фрезерування навіть по алюмінію було недосяжним. Отже, експерименти спільноти підтверджують: без модернізації (додавання поворотної осі, розширення ходів, підвищення жорсткості та зміни контролера) верстат CNC 3018 Pro конструктивно непридатний для обробки довгих гвинтових поверхонь. Це обмеження закладено як кінематично (лише 3 осі), так і механічно (габарити і міцність станка). Для виконання таких завдань необхідне суттєве переоснащення або використання верстатів вищого класу, спроектованих спеціально під різьбонарізні операції.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 ОГЛЯД НАЯВНИХ РІШЕНЬ І МОДИФІКАЦІЙ CNC 3018 PRO (РОЗШИРЕННЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ, 4-ТА ВІСЬ, ПІДСИЛЕННЯ ЖОРСТКОСТІ)

Мета розділу: проаналізувати існуючі підходи до модернізації верстата CNC 3018 Pro для можливості обробки довгих гвинтових (спіральних) поверхонь. Розглянемо декілька напрямів удосконалень: розширення робочої зони станка, підвищення жорсткості конструкції (заміна напрямних), зміна кінематики руху (фіксований стіл vs. рухома портална балка), додавання четвертої осі, а також варіант заміни однієї з лінійних осей на поворотну. На основі технічних даних та досвіду користувачів (форумів, відео, інструкцій) буде виконано порівняння переваг і недоліків кожного рішення. Наприкінці підрозділу зроблено висновок щодо доцільності обрання поворотної осі замість однієї лінійної як оптимального рішення для даного навчального проєкту (деталі реалізації якого розглядатимуться в розділі 2).

Розширення робочої зони CNC 3018 Pro

Одним із очевидних способів адаптувати CNC 3018 Pro для обробки довгих виробів є збільшення його робочого поля. Стандартна модель 3018 має робочу область приблизно 300×180 мм, що є обмеженням для довгих заготовок. Існують як саморобні рішення, так і готові набори для розширення. Приміром, користувачі часто модернізують 3018 до формату “3040” – подовжуючи вісь Y до ~300×400 мм. В одному з проєктів автор зазначає, що робоча зона 300×180 мм “дуже обмежена” і планує перехід до формату 300×320 мм для більшого поля роботи. Готовим прикладом є набір розширення YoraHome 3018-Pro Expansion Kit, який перетворює стандартний 3018-Pro на версію 3036-Pro з полем ~30×36 см. Цей комплект включає подовжені елементи станка: додаткову плиту столу для підтримки деталі, подовжені алюмінієві профілі рами, довші круглі напрямні та ходовий гвинт для осі Y, а також кріплення й фурнітуру.

Переваги розширення робочої області: можливість встановлення і обробки довгих деталей без перехоплення або секційної обробки

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зокрема, для різьбових чи спіральних поверхонь значної довжини більша вісь Y дозволяє розмістити деталь повністю в зоні досяжності інструмента. Крім того, фіксація довгої заготовки стає простішою за наявності подовженого столу – можна використати додаткові точки кріплення, аби уникнути прогинів.

Недоліки та виклики: просте масштабування станка веде до зниження жорсткості конструкції, якщо не вжити заходів для її підсилення. Як відзначають практики, із збільшенням розміру рами “верстат стає менш стабільним”. Особливо це стосується портативних CNC на алюмінієвих профілях: довші направляючі й гвинти можуть прогинатися чи вібрувати під час роботи. Для компенсації часто доводиться посилювати раму (наприклад, додавати стяжки, додаткові опори) та застосовувати масивніші напрямні. У модернізованому зразку 3018-Pro було замінено стандартні напрямні осі Y діаметром 10 мм на товстіші 12 мм разом із новими лінійними підшипниками – це підвищило жорсткість і точність переміщення. Отже, розширення робочої зони доцільно поєднувати з заходами для збереження або підвищення твердості конструкції, інакше виграш у розмірі може обернутися втратою точності та якості обробки.

Підвищення жорсткості: встановлення лінійних напрямних замість круглих валів

Базова конструкція CNC 3018 Pro використовує круглі сталеві вали в ролі лінійних напрямних на осях X і Y, по яких рухаються каретки на підшипниках кочення. Така схема є економічно вигідною, але має обмеження по жорсткості: тонкі довгі вали схильні до прогину під навантаженням різання, а підшипники типу LM10UU можуть мати люфти. Для фрезерування складних профілів (зокрема гвинтових) і особливо при роботі з твердими матеріалами (напр. металами) критичною є стабільність геометрії. Тому одним з популярних апгрейдів є заміна круглих валів на лінійні рейкові напрямні (типу Hiwin MGN12, MGN15 тощо). Такі напрямні мають каретки із попереднім натягом і значно менший прогин при бокових силах.

					<i>КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На практиці користувачі відзначають помітний виграш від переходу на рейкові напрямні. Наприклад, один з власників 3018 Pro заявив: *“мені не подобається гнучкість лінійних валів осі Y... тому я замовив набір лінійних рейок довжиною 450 мм з каретками MGN15H”*. Встановлення таких рейок на місце штатних валів відразу підвищило жорсткість осі Y та усунуло прогин стола при навантаженні. Інший ентузіаст повністю оновив кінематику свого 3018-Pro: вісь X у нього побудована на парі рейок MGN12 замість рідних 10-мм валів, а вісь Y оснащена циліндричними валами збільшеного діаметра (12 мм) з новими підшипниками. Одночасно було додано інші підсилюючі заходи – трикутні кронштейни для жорсткості рами, демпфери коливань тощо. У результаті вдалося перетворити маленький верстат на суттєво більш стабільний: модернізований “Trigger’s Broom” (як жартівливо назвали цей оновлений 3018-Pro) успішно обробляє латунь та алюміній – завдання, з якими стандартна машина не могла впоратися.

Переваги рейкових напрямних: значно менше биття і люфту, вища точність позиціонування, краща витривалість під час різання. Рейкові каретки типово мають кілька рядів підшипників і більшу контактну площу з рейкою, що забезпечує високу жорсткість вузла. Вищезгаданий користувач після встановлення напрямних зміг без пропусків кроків збільшити швидкість різання по алюмінію до 1000 мм/хв при глибині 0,2 мм – результат недосяжний для стокового верстата. Отримана конструкція стала більш надійною для важких завдань і зберігає точність під навантаженням.

Недоліки та складність: подібний апгрейд вимагає інженерних навичок та додаткових деталей. Щоб прикріпити рейки до профілів 3018, потрібні спеціальні кріпильні кронштейни або перехідні деталі. Їх доводиться виготовляти самостійно (на 3D-принтері або фрезерувати з алюмінію) згідно з розмірами рейок і рами. Монтаж треба виконати з високою точністю паралельності, інакше можливе заклинювання кареток. Також слід врахувати, що якісні лінійні рейки (навіть китайські аналоги Hiwin) мають певну вартість, часто співставну з ціною всього 3018. Тим не менш, для підвищення

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продуктивності та жорсткості інвестиція виправдана – у модернізаціях на зразок “Full Metal Upgrade” використовують MGN12H на усіх осях і навіть замінюють ходові гвинти на шарико-гвинтові передачі, перетворюючи CNC 3018 на принципово інший рівень верстатаі.

Зміна кінематики: рухома головка (портал) по осі Y замість рухомого столу

Стандартна кінематична схема 3018 Pro – це фіксований портал і рухомий стіл (вісь Y). Тобто рама утворює нерухому порталну конструкцію, по осі X на ній рухається шпиндель, а сама заготовка переміщується вперед-назад на столі (вісь Y). Альтернативним підходом є кінематика типу 3D-принтера, коли стіл закріплений стаціонарно, а портална балка рухається по осі Y. Багато верстатів більшого розміру будуються саме за таким принципом: рухомий портал дозволяє зберегти компактність при великій робочій зоні, адже стіл не “віїжджає” за габарити рами. Для нашого завдання – довгі деталі – фіксований стіл потенційно зручніший: можна жорстко зафіксувати довгу заготовку, в тому числі пропущену через отвір або з вильотом спереду/ззаду станка, і обробляти її по всій довжині, переміщуючи інструмент уздовж. Крім того, відсутність руху столу з важкою деталлю усуває інерційні навантаження та вібрації, що виникають при різкій зміні напрямку руху масивної заготовки.

Втілення такої модифікації на прикладі 3018 Pro вимагатиме серйозної перебудови. Потрібно додати лінійні направляючі вздовж осі Y на рамі та забезпечити привід порталу по обох боках (щоб уникнути перекосів). Зазвичай це реалізується двома ходовими гвинтами або ременями синхронно на лівій і правій стороні порталу, кожен з власним кроковим двигуном, або через один мотор і вал приводу на дві сторони. У маленькому форматі можна спробувати і один центральний гвинт під столом, що штовхатиме весь портал, але є ризик хитання порталу без бокової підтримки. У будь-якому разі, конструкція ускладнюється: керуватися двома двигунами вимагає або додаткового драйвера (що виходить за межі 3-осьового контролера), або апаратного з'єднання двох моторів до одного драйвера. Саме через ці труднощі ентузіасти

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рідко обирають такий шлях для 3018. Зокрема, на форумі OpenBuilds автор модифікації зазначив, що розглядав перехід до рухомого порталу по осі Y, але вирішив “залишити все простіше” і просто додати лінійні рейки на існуючу компоновку. Очевидно, приріст жорсткості від рейок він оцінив важливішим та легшим для реалізації, ніж повна зміна кінематики.

Переваги рухомого порталу: цей підхід виправданий на більших верстатах – він дає змогу збільшити робочу площу без подвоєння габаритів станка, а також легше працювати з довгими деталями, які можуть виходити за межі столу. У контексті нашого завдання, якби 3018 мав відкриту раму спереду/ззаду, рухомий портал дозволив би теоретично обробляти нескінченно довгу деталь (подаючи її через верстат по мірі обробки). Так роблять на великих фрезерах при гравіруванні довгих панелей – фіксують панель, а портал їздить по ній.

Недоліки: для настільного верстата малого розміру вираш у жорсткості сумнівний. Як зауважують фахівці, рухомий стіл простіший і спершу жорсткіший для маленьких розмірів, а рухомий портал “потрібен у великих машинах для компактності, але вимагає ретельного проектування, щоб балка була достатньо жорсткою”. Переробка 3018 у таку конфігурацію майже дорівнює створенню нового верстата: потрібно перерахувати і виготовити багато деталей. Для цілей навчального проєкту це надмірно складно. До того ж, сама по собі кінематична схема з рухомим порталом не вирішує питання обробки гвинтових поверхонь – вона лише дає можливість встановити довгу деталь. Щоб нарізати спіраль, все одно потрібен або спеціальний різьбонарізний пристрій, або четверта (обертובה) координата. Таким чином, зміна кінематики без додавання обертальної осі не дасть повної відповіді на поставлену задачу, хоча й може розглядатися як доповнення до комплексної модернізації (після значного доопрацювання рами і приводу). Додавання четвертої осі (ротаційної) як окремого модуля Класичним рішенням для розширення можливостей фрезерного верстата є додавання 4-ї координати – поворотної осі (А або В). В контексті CNC 3018 Pro це означало б установку

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додаткового пристрою – маленького поворотного стола або патрона з кроковим двигуном – на робочий стіл, який може обертати заготовку навколо своєї осі. При цьому сам верстат зберігає всі три лінійні осі X, Y, Z, а обертання додається як четвертий вимір. Теоретично це найпотужніший підхід: він дозволяє виконувати повноцінну 4-осьову обробку. Наприклад, можна фрезерувати спіральні канавки, повертаючи деталь синхронно з поступальним рухом фрези, або гравіювати об’ємні об’єкти (статуетки, кільця) з усіх сторін без переустановки деталі. На практиці для маленьких верстатів існують навіть комерційні модулі: компанії випускають набори “4th Axis Rotary” для моделей типу 3018/3040. Так, SainSmart пропонує 4-ту вісь для своїх верстатів серії 4040/3030, оснащену редукторним кроковиком NEMA17 і 4-кулачковим патроном. Подібний модуль від YoraHome (сумісний з 3018-Pro) включає компактний 50-мм патрон, задню бабку для підтримки довгих деталей та ремінний редуктор 3:1 на кроковому двигуні. Такі пристрої монтуються на стіл верстата і під’єднуються до системи керування як окрема вісь.

Проблема сумісності з 3018 Pro: базовий контролер 3018 (прошивка GRBL на Arduino) розрахований на 3 осі і не підтримує керування четвертим кроковим двигуном. Тому для реалізації 4-осьового режиму необхідно оновити електроніку. Є два шляхи: (1) встановити інший контролер, який підтримує 4 осі (наприклад, плата Grbl_ESP32,duino CNC з 4 драйверами, або перехід на систему Mach3/GRBLHAL на більш продуктивному контролері); (2) використати альтернативну плату від 3D-принтера, яка вже має вихід на екструдер, перепрошивши її відповідно. На форумах описані обидва підходи. Зокрема, один користувач 3018 зазначав, що мати під рукою плату від Ender-3 (3D-принтера) з 4 драйверами – гарна ідея, бо її можна перепризначити: “чи не міг би я просто замінити рідний контролер 3018 на плату Ender 3 і додати/надрукувати четверту вісь?”. Це технічно можливо, і ентузіасти підтверджують, що 4-ту вісь успішно додавали, але робіт значно додається. Необхідно підібрати та підключити окремий драйвер крокового двигуна, узгодити напругу живлення, налаштувати прошивку (вказати кроки на оберт)

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і забезпечити підтримку у програмному забезпеченні (САМ має виводити 4-осьовий G-код).

На практиці додавання 4-ї осі до 3018 Pro суттєво збільшує складність проєкту. Один з майстрів детально описує процес модернізації: спочатку було придбано нову плату керування з підтримкою 4 осей, яку встановлено замість штатної і протестовано роботу існуючих XYZ-осей. Далі – проєктування і складання механіки поворотної осі: куплено міні-патрон (токарний трикулачковий або чотирикулачковий патрон малого діаметра), підібрано пасові шківни GT2 (співвідношення 20/60 зубців для збільшення моменту), кроковий двигун Nema17, виготовлено платформи кріплення до рами верстата. Також додається задня бабка для підтримки довгих валів. Після механічного монтажу – етап налаштування: калібрування кроків на оберт, синхронізація нової осі з існуючим ПЗ. Все це прирівнюється до окремого інженерного проєкту. Таким чином, переваги четвертої осі як модуля очевидні – максимальна гнучкість і функціональність, – але недоліки для нашого випадку – це збільшена вартість (новий контролер, компоненти осі), складність реалізації і потреба в спеціалізованому САМ-програмному забезпеченні. Для навчального проєкту масштаб модернізації може виявитися надмірним, якщо мета зводиться лише до нарізання гвинтових поверхонь.

Варто також відзначити обмеження геометрії самого 3018: робоча зона дуже мала по Z (~45-50 мм висоти). Розміщення патрона і деталі всередині цього простору може вимагати підняття порталу (збільшення просвіту по Z) або використання мініатюрних патронів. Без цих заходів 4-та вісь на столі може не поміститися під шпинделем або різальною фрезою (особливо якщо деталь діаметром кілька сантиметрів). Реальні користувачі часто стикаються з цим: “пальці схрещено, щоб 2.5-дюймовий патрон помістився – інакше доведеться мудрувати” жартує власник 3018 на Reddit. Тому додавання осі може потягнути за собою і модернізацію порталу (підвищення рами), як це роблять у “3040 Z-height upgrade” комплектах.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Заміна однієї з осей на поворотну (триосний режим з ротацією замість лінійного переміщення)

Альтернативний компромісний підхід – відмовитися від однієї лінійної осі на користь осі обертання. У контексті CNC 3018 Pro найлогічніше замінити вісь Y (поздовжній рух столу) на оберт навколо горизонтальної осі. Тобто стіл зробити нерухомим, а на ньому встановити обертальний пристрій, який виконуватиме функцію “лінеаризованої” осі Y. Практично це означає, що на вихід драйвера осі Y підключається кроковий двигун, який через редуктор обертає патрон із закріпленою заготовкою. У G-кодї рухи по Y інтерпретуються як поворот заготовки. Така схема фактично перетворює верстат на міні-токарний з ЧПУ: по осі X фреза рухається вздовж деталі, по Z – задає глибину різання, а замість переміщення заготовки вперед-назад ми обертаємо її, реалізуючи ріжучий процес по спіралі.

Переваги рішення: воно дозволяє використати наявний 3-осьовий контролер без заміни – з точки зору електроніки, ми все ще працюємо з трьома осями. Немає потреби купувати чи налаштовувати 4-осьову плату: прошивка GRBL цілком може керувати “псевдо-Y” в вигляді обертання, якщо правильно встановити кроки на одиницю (налаштовується параметр кроків/мм, який фактично стане кроками/градус або кроками/оберт в перерахунку через діаметр деталі). Таким чином досягається мінімальна складність на рівні програмно-апаратної інтеграції – верстат як був, так і лишається трьохосьовим, просто однією віссю рухається не лінійно, а обертально. З точки зору САМ, невеликі спіральні поверхні можна програмувати як розгортку: припустимо, якщо потрібно прорізати гвинтову канавку вздовж циліндра, можна задати рух по Y на довжину, що відповідає повному оберту (периметру) циліндра, – тоді фреза фактично здійснить один оберт деталі. Багато любителів саме так і роблять для гравіювання по круглих деталях лазером або фрезою: вимикають вісь Y і підключають замість неї роликівий поворотний механізм.

Практичний випадок реалізації описано на форумі: один з користувачів спробував під’єднати кроковий двигун з тримачем деталі замість осі Y свого

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3018. Він просто переставив кабель двигуна Y на свій ротаційний вузол (двигун із цанговим затискачем для деталі) – і зміг керувати обертанням через команду руху по осі Y. За його словами, свобода рухів була менша, ніж у повноцінної 4-осі (оскільки лінійна Y стала кутовою без можливості одночасно використовувати лінійний Y), але *“вдалося доволі легко виготовити досить складні деталі”*. Це підтверджує, що концепція працездатна: верстат сприймає поворот як лінійне переміщення і виконує потрібні операції.

Важливим аспектом є правильний підбір компонентів для такої поворотної осі. Щоб досягти достатнього крутного моменту і роздільної здатності повороту, рекомендується використовувати кроковий двигун Nema 17 збільшеної довжини (40-48 мм) з редуктором типу planetary gear. Планетарний редуктор з передатним відношенням 5:1 або 10:1 значно підвищує момент та точність позиціонування: наприклад, з редукцією 5:1 типова роздільна здатність Nema 17 (1,8° на крок) перетворюється на 0,36° на крок, а з мікрокрокуванням можна досягти ще меншого кроку. В описі комерційного рішення зазначено, що планетарний редукторний Nema17 перевершує за точністю та силою будь-які пасові передачі в таких модулях. Тому в нашому проекті закладаємо конфігурацію: кроковий двигун Nema 17 довжиною ~40 мм + планетарний редуктор 5:1, що сумарно дасть тримальний момент порядку 1.5–1.7 Н·м і дуже плавний хід. На вал редуктора встановлюється патрон для заготовки – компактний 4-кулачковий або 3-кулачковий патрон типу K02-63 діаметром ~63 мм, який здатен затискати прутки, трубки тощо. З'єднання вала двигуна з патроном може бути виконане через токарно виготовлений перехідник або стандартну муфту (наприклад, муфта D25L30 для вала 8 мм). Також потрібна нерухома задня бабка з центром для підтримки іншого кінця довгої заготовки, щоб вона не вібрувала при обертанні.

Переваги рішення *“ротаційна вісь замість Y”*: воно спеціально націлене на задачу нарізання гвинтових поверхонь. Фактично ми будуємо настільний верстат типу токарного з ЧПУ із можливістю фрезерування спіралі. У

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порівнянні з 4-осьовим підходом, тут *значно менше змін у електроніці* – не треба новий контролер, використовується вже налагоджене середовище (GRBL, G-code для 3 осей). Також зменшується і вартість: необхідно купити лише механічні вузли (двигун, редуктор, патрон, опори) і витратити час на їх інтеграцію. Ще одна перевага – спрощення програмування: можна обійтися без складного 4-осьового САМ. Наприклад, щоб вирізати різьбу, можна написати 3-осьовий G-код, де вісь Y (поворот) рухається синхронно з віссю X, і вийде гвинтова траєкторія. Деякі системи (напр. лазерні програми) мають режим розгортки, де обертальний рух прирівнюється лінійному – це можна використати і для фрезерування простих спіралей.

Можливі недоліки і обмеження: зворотною стороною цього підходу є втрата функціональності лінійної осі Y. Після переобладнання верстат уже не зможе виконувати звичайні фрезерні роботи на площині XY без зворотного переоснащення (тобто для плоского різьблення треба буде повернути стіл Y на місце або мати другу машину). Для навчального проекту, де основна мета – саме гвинтові поверхні, це прийнятно. Ще один нюанс – *обмежена гнучкість порівняно з повною 4-осьовою системою*: ми не можемо одночасно переміщати заготовку лінійно по Y і обертати її, щоб виконувати, скажімо, спіраль з поступовим зсувом уздовж осі. Проте за потреби це вирішується відповідним G-кодом: наприклад, щоб нарізати довгий гвинт, достатньо координувати X (подачу вздовж) і обертання (Y) – фактично дві осі працюватимуть разом, а вісь Z задаватиме профіль різьби. Це цілком можливо в рамках триосної прошивки (X, Y->rot, Z).

З точки зору механіки, слід дуже ретельно виставити центр обертання паралельно осі X (щоб фреза не “еліпсом” різала), і забезпечити достатню жорсткість кріплення патрона. Використання редуктора (5:1) дещо знижує максимальну швидкість обертання – але для різьблення вона не потрібна висока; важливіше, що редуктор має люфт менше 1°, тож позиціювання буде повторюваним.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичні кейси вказують, що заміна осі на поворотну є робочим компромісом. Зокрема, згаданий експеримент з заміною осі Y на обертальну показав, що навіть без оптимального підбору компонентів користувач зумів виконати задумане. Якщо ж зібрати систему професійніше (з редуктором, патроном, підтримкою), то можна очікувати якісного результату. Це рішення особливо привабливе для навчальних та дослідницьких цілей, бо дає можливість сконцентруватися саме на функції різьбонарізання/гвинтової фрезерування з мінімальними перешкодами у вигляді налаштування обладнання. Порівняльний аналіз і вибір оптимального варіанта. Проаналізувавши варіанти, можна зробити висновок, що кожна модернізація вирішує свою задачу, але найбільш збалансованою для нашої мети є заміна осі Y на поворотну. Підсумуємо коротко основні моменти порівняння:

Розширення робочої зони дозволяє фізично розмістити довгу заготовку. Це корисно і, ймовірно, потрібно в нашому проекті (хоча б частково). Але саме по собі розширення не дасть можливості різати спіраль – воно повинно йти в парі з іншими змінами. До того ж, подовження верстата без посилення може знизити точність, тому цей крок слід комбінувати з підсиленням рами (напр. товстіші вали, додаткові опори) f.

Підсилення жорсткості (рейки MGN12, тощо) є радше допоміжною мірою. В контексті різьбонарізання це важливо – інструмент матиме бічний тиск, і люфти неприпустимі. Тому встановлення лінійних напрямних на осі X і Y, а також жорстке кріплення рами – дуже бажане для досягнення якісного результату. Цей крок не конфліктує з іншими і може бути виконаний незалежно. Але сам по собі (без поворотної осі) він не дозволить обробляти довгі гвинтові поверхні, адже потрібен механізм обертання деталі.

Зміна кінематики (рухомий портал), хоча цікава з інженерної точки зору, для нашого малого верстата не дає суттєвих переваг у різьбонарізанні. Фіксація довгої заготовки можлива і на рухомому столі, якщо забезпечити її підтримку. А от складність реалізації рухомого порталу висока – потребує капітальної перебудови 3018. Через обмежений масштаб проекту цей шлях

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виглядає невиправданим. Простіше розширити та посилити наявну компоновку з рухомим столом, ніж будувати нову.

Додавання 4-ї осі як окремого модуля – максимально універсальне рішення, яке, проте, є і максимально складним. Для навчального проекту, де час та ресурси обмежені, впровадження повноцінної 4-осьової системи може вийти за рамки доцільності. Ми отримали б інструмент, потенційно здатний на більше, ніж потрібно (наприклад, гравірування по поверхні з одночасним рухом X, Y, A, Z – що не є метою зараз). Ціна цього – значні витрати і час на розробку та налагодження. Крім того, маленький 3018 фізично обмежує користь 4-ї осі (висота порталу, площа столу). У реальних прикладах люди, які пробували додати 4-ту вісь до 3018, стикались з необхідністю ще й піднімати портал і модернізувати станину. Отже, “класична” 4-та вісь більш виправдана на верстатах класом вище або як окремих пристрій (наприклад, токарний модуль).

Заміна осі Y на обертальну виглядає оптимальною для вирішення задачі різьбонарізання в рамках саме цього верстата. Вона є цільовою модернізацією: усуває головне обмеження (відсутність обертального руху) мінімальними засобами. Ми фактично отримуємо те, що потрібно – можливість обробляти довгі гвинтові поверхні – і жертвуємо тією функціональністю, яка не є критичною для поточного проекту (лінійне переміщення столу). З погляду навчального процесу, такий вибір також раціональний: студент знайомиться з принципами CNC, при цьому глибоко опрацьовує саме тему поворотної осі (яка є центральною в проекті), а не розпорошує зусилля на побічні складнощі типу багатовісного керування або проектування нової рами.

На основі цього порівняння приймаємо рішення: для даного дипломного проекту доцільно реалізувати модифікацію CNC 3018 Pro, що передбачає заміну осі Y на поворотну вісь. Це дозволить отримати верстат з трьома ступенями свободи (X, Z, та A – оберт навколо колишньої осі Y), здатний нарізати довгі гвинтові канавки та різьби. Всі інші модернізації, по можливості, слід додати як допоміжні: зокрема, розширення рами по Y (для

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміщення довгої деталі) і підсилення жорсткості (лінійні напрямні, кронштейни) – ці аспекти можуть бути частково реалізовані в конструкції. Проте саме концепція поворотної осі як заміни лінійного переміщення є головним вибором, оскільки вона оптимально задовольняє вимоги проекту при помірній складності. В наступному розділі буде детально розглянуто проектування цієї поворотної осі: вибір та розрахунок її компонентів, інтеграція з механікою верстата та налаштування керування.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ CNC 3018 PRO

2.1 Обґрунтування вибору схеми модернізації

Метою модернізації верстата CNC 3018 Pro є забезпечення можливості фрезерування довгих гвинтових поверхонь, які неможливо обробити в базовій конфігурації пристрою. Відсутність поворотної осі, обмежена довжина столу та недостатня жорсткість конструкції зумовлюють необхідність технічного доопрацювання верстата. При цьому схема модернізації має відповідати не лише вимогам функціональності, а й критеріям реалізованості в межах навчального проекту.

На першому етапі аналізувалися кілька потенційних варіантів удосконалення. Зокрема, розглядалася класична модернізація через додавання четвертої осі (А-осі) як окремого модуля. Такий підхід дозволяє зберегти функціональність трьох лінійних осей і розширити обробку на циліндричних поверхнях. Проте дана схема вимагає оновлення електронної частини (встановлення контролера з підтримкою 4 осей), адаптації САМ-системи для створення чотиривісних траєкторій та перепрошивки або заміни GRBL. Це значно ускладнює реалізацію та виходить за межі бюджетних і часових ресурсів навчального проекту.

Іншим варіантом була зміна кінематики за зразком 3D-принтера, де переміщення інструменту по осі Y виконується за рахунок руху порталу, а стіл фіксується. Така схема дозволяє звільнити простір під довгу деталь, однак

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потребує глибокої переробки рами та не розв'язує головного завдання – обертання заготовки навколо осі. Аналогічно, розширення робочої зони (наприклад, подовження осі Y, підняття осі Z) лише частково вирішує проблему габаритів, але не забезпечує ротаційного руху, необхідного для фрезерування гвинтових профілів.

У ході технічного аналізу було встановлено, що найбільш доцільним є рішення із заміною однієї з існуючих осей (осі Y) на поворотну. Такий підхід дозволяє без радикальної перебудови конструкції реалізувати синхронний рух фрези та обертання деталі. При цьому зберігається робота у межах існуючого ПЗ GRBL, а також досягається необхідна функціональність шляхом часткової заміни механіки. Запропонована поворотна вісь базується на стандартних і доступних компонентах: кроковому двигуні Nema 17 40 мм, планетарному редукторі з передавальним відношенням 5:1, валу D25L30 з діаметром 8 мм та чотирьохкулачковому патроні K02-63. Така конфігурація забезпечує достатній крутний момент для обертання полімерної заготовки, точне позиціонування, а також сумісність із механічними габаритами верстата.

У підсумку, обрана схема модернізації є оптимальним компромісом між технічною ефективністю, простотою реалізації та економічною доцільністю. Вона дозволяє значно розширити функціональні можливості CNC 3018 Pro без повної заміни платформи, при цьому адаптована під реальні обмеження освітнього проєкту. Проектування обертової осі та підбір відповідних вузлів буде розглянуто в наступних підрозділах.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Проектування ротаційної осі з кроковим двигуном Nema 17

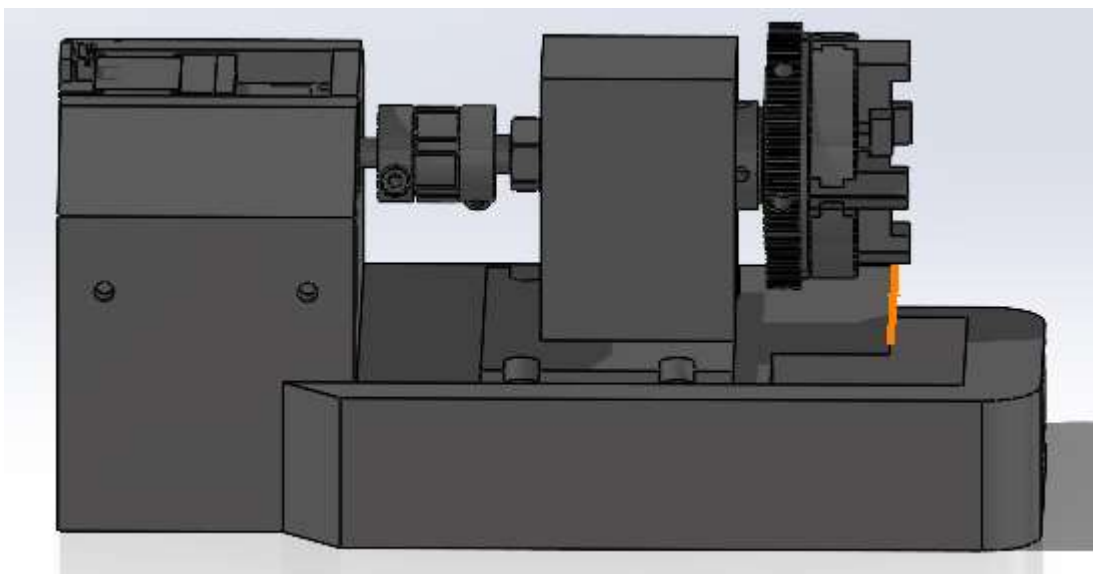


Рисунок 2.2.1 Ротаційна ось (Вигляд збоку)

У межах реалізації проекту модернізації верстата CNC 3018 Pro для фрезерування довгих гвинтових поверхонь було спроектовано спеціалізовану ротаційну вісь, яка замінює стандартну лінійну вісь Y. Основним завданням цієї осі є точне обертання заготовки навколо горизонтальної осі з можливістю синхронізації з поступальним переміщенням фрези по осях X і Z. Конструкція розроблена таким чином, щоб забезпечити максимальну жорсткість, компактність і модульність, а також — мінімальні вимоги до переналаштування електроніки.

Основа ротаційної осі складає кроковий двигун Nema 17 довжиною 40 мм, закріплений у власному корпусі в лівій частині платформи. До вала двигуна приєднаний планетарний редуктор з передатним числом 5:1, що дозволяє отримати високий крутний момент (понад 1.5 Н·м) та зменшити крок обертання до величин, придатних для обробки спіральних та різьбових поверхонь. Завдяки мікрошаговому режиму драйвера, забезпечується роздільна здатність до 0.036° на імпульс, що дозволяє виконувати точну обробку по куту.

Передавання моменту від редуктора здійснюється на привідний вал діаметром 8 мм (типу D25L30), встановлений у двох підшипникових опорах.

					<i>КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструкція виконана таким чином, щоб уникнути осьового люфту і забезпечити концентричність обертання. На правому кінці вала змонтовано 4-кулачковий патрон К02-63, що дозволяє фіксувати заготовки різної форми й діаметра — від циліндричних полімерних прутків до плоских чи багатограних заготовок. Незалежне регулювання кожного кулачка дає змогу зручно центрувати заготовку вручну без застосування прецизійних адаптерів.

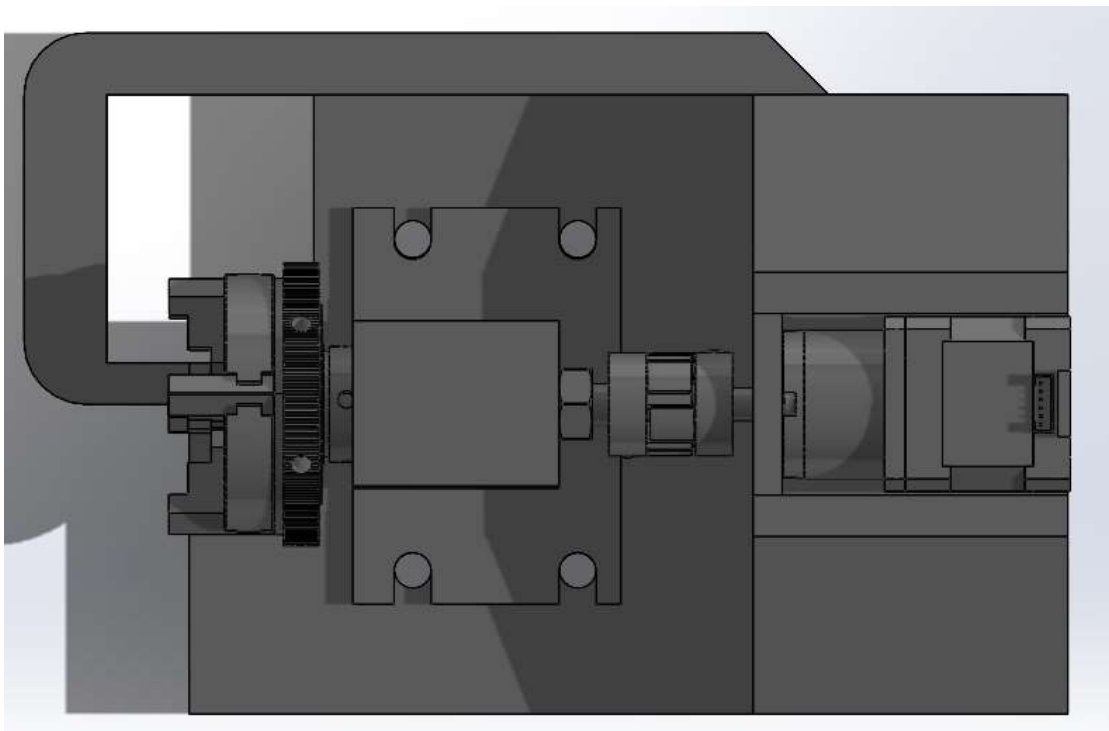


Рисунок 2.2.2 Ротаційна ось (Вигляд зверху)

На зображеннях (рис. 2.2.1–2.2.2) представлено фінальну модель ротаційної осі. Вигляд збоку демонструє загальне компонування механізму — від двигуна до патрона. Добре видно компактний і жорсткий корпус редуктора, що встановлений на платформі із пластику. Вигляд зверху ілюструє співвісність усіх компонентів: двигун – муфта – редуктор – вал – патрон. Таке компонування забезпечує точне передавання моменту без паразитного згину або зміщення.

Платформа ротаційної осі є самостійною частиною, що закріплюється до напрямних колишньої осі Y. Усі компоненти розміщені на базовій плиті з можливістю точного позиціювання, а з іншого боку передбачена площина для

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

встановлення задньої бабки або роликової опори. Таким чином забезпечується стійкість довгих заготовок під час обертання та виключається вібрація.

У технічному плані дана ротаційна вісь повністю адаптована до керування за допомогою GRBL-контролера. Рух осі Y перепризначається на обертальний режим, а налаштування кількості кроків на одиницю вводиться з урахуванням передатного числа редуктора. Завдяки цьому система не потребує дорогого контролера з підтримкою 4 осей, що спрощує її використання у навчальному середовищі.

Таким чином, сконструйована ротаційна вісь дозволяє точно й надійно обробляти гвинтові поверхні довжиною до 300–350 мм. Вона базується на доступних вузлах промислового рівня і повністю інтегрується в геометрію верстата без потреби радикальної перебудови основної платформи.

2.2.1 Вибір редуктора: планетарний редуктор 5:1 (Nema 17)

Для забезпечення стабільного обертання заготовки з високою точністю при невеликих обертах було прийнято рішення застосувати планетарний редуктор із передавальним відношенням 5:1, встановлений безпосередньо на валу крокового двигуна типу Nema 17 довжиною 40 мм. Такий вибір дозволяє ефективно підвищити обертовий момент двигуна при одночасному зменшенні кута повороту на кожен імпульс. Для реалізації поворотної осі було обрано кроковий двигун Nema 17 у поєднанні з планетарним редуктором 5:1, що забезпечує необхідний крутний момент [7].

Планетарний редуктор, на відміну від ремінних або зубчастих передач, має компактні габарити, співвісну геометрію й малий зворотний люфт. Саме остання характеристика є критичною при фрезеруванні гвинтових поверхонь, де будь-який люфт миттєво перетворюється на помилку кроку гвинта. Обране передатне число 5:1 дозволяє знизити базовий крок кутового переміщення з 1.8° до 0.36° (без урахування мікрошагу). При налаштуванні драйвера у режимі 1/16 мікрокроку можна досягти роздільної здатності обертання \approx

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

0.0225° на імпульс, що є більш ніж достатнім для задачі формування різьби з точністю до десятих міліметра.

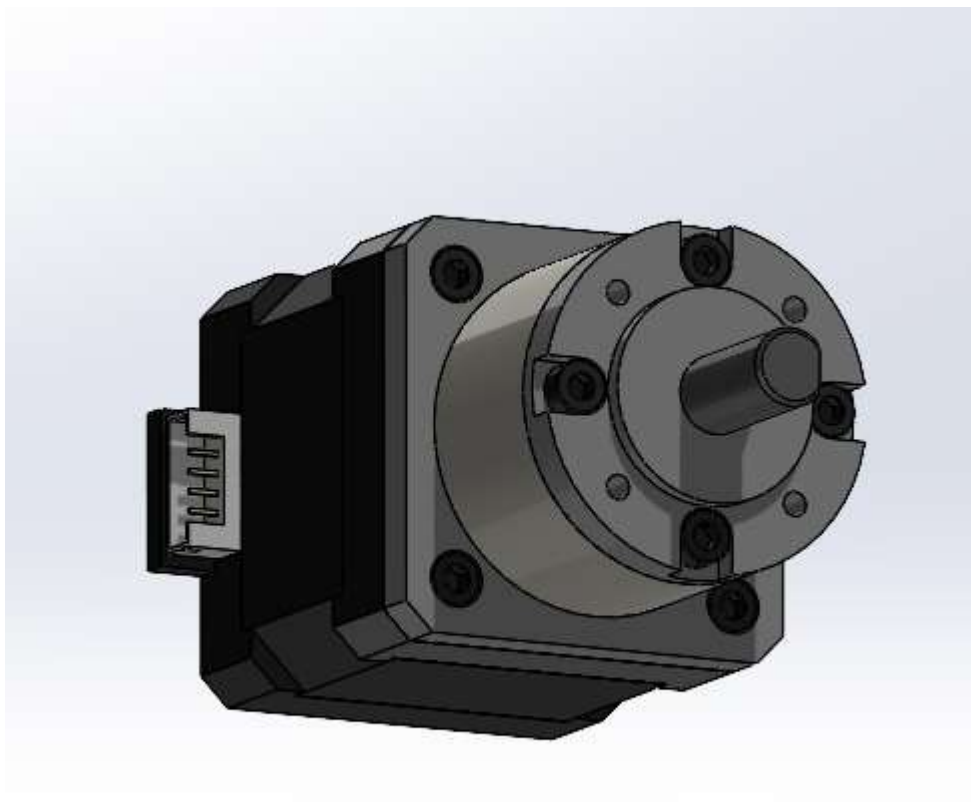


Рисунок 2.2.3 Планетарний редуктор 5:1 (Nema 17)

Редуктор обрано фланцевого типу, сумісний із стандартом монтажних отворів Nema 17, що дозволяє без додаткових перехідників прикріпити його до двигуна. Кріплення редуктора до базової плити виконується за допомогою друкованого 3D-кронштейна, спроектованого з урахуванням отворів на алюмінієвому профілі конструкції. Такий варіант забезпечує гнучкість компоновки: у разі зміни редуктора (наприклад, на 10:1 або іншу геометрію) можливе швидке виготовлення адаптера без зміни металеві рами.

На вихідному валу редуктора розміщений муфтовий вузол або перехідний вал, що з'єднує редуктор із основним приводним валом. Це з'єднання реалізовано через цангову муфту або шпонкове з'єднання, залежно від обраного варіанту друкованої деталі.

У конструкції редуктора також важливо врахувати теплові та динамічні навантаження. Зважаючи на роботу з полімерними деталями та невисоку

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

частоту обертання, редуктор не потребує активного охолодження. Втім, за результатами практичного тестування конструкції на стенді, було рекомендовано передбачити вентиляційні отвори у 3D-друкованому корпусі, що дозволяють пасивно охолоджувати мотор і редуктор під час тривалих циклів.

На рисунку зображено фінальне компонування двигуна, редуктора та кронштейна в моделі. Видно, що геометрія вузла мінімізована по висоті — це дозволяє зберегти робочу зону шпинделя в межах допустимої висоти по осі Z навіть після встановлення поворотної осі.

У підсумку, обраний планетарний редуктор 5:1 у поєднанні з Nema 17 забезпечує надійну, прецизійну і компактну передачу обертання, повністю відповідну вимогам проекту. Завдяки цьому стало можливим перетворити стандартну лінійну вісь CNC 3018 Pro на ефективну поворотну координату без кардинального втручання в геометрію верстата.

2.2.2 Вибір патрона: K02-63 (4-кулачковий)

Одним із ключових вузлів ротаційної осі є патрон, який виконує функцію надійного затискання заготовки під час обертання. В рамках модернізації CNC 3018 Pro було обрано механічний 4-кулачковий патрон моделі K02-63, що має широку сумісність із невеликими верстатами та забезпечує високий рівень універсальності при фіксації деталей різної форми й матеріалу.

Патрон K02-63 призначений для центрування та утримання полімерних, дерев'яних або металевих заготовок діаметром до 63 мм. Його конструкція передбачає чотири незалежно регульовані кулачки, що дозволяє здійснювати як зовнішнє, так і внутрішнє затискання деталей. На відміну від класичних трикулачкових патронів, 4-кулачкова схема дає можливість затискати не тільки круглі, а й квадратні, шестигранні або асиметричні заготовки, що значно розширює сферу використання осі в лабораторних умовах.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

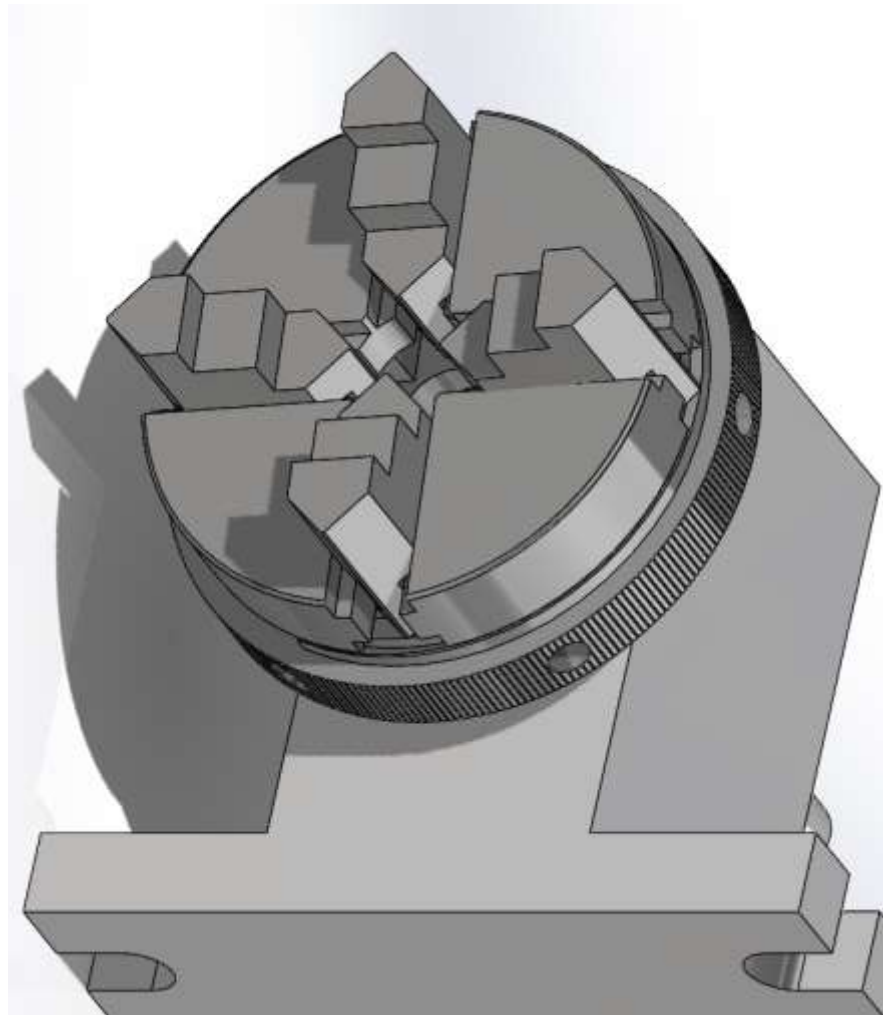


Рисунок 2.2.4 К02-63

Вибір саме цієї моделі зумовлений кількома технічними факторами:

- Невеликі габарити та маса (~1.3 кг) — сумісні з розмірами CNC 3018 Pro і не створюють надмірного навантаження на привідний вал;
- Механічна надійність — конструкція виконана зі сталі, допускає багаторазову зміну кулачків без зносу різьбових елементів;
- Можливість розміщення вала діаметром 8 мм — що повністю відповідає параметрам привідного вала з редуктора;
- Проста інтеграція в модель — патрон встановлюється на торець вала через цангову втулку або за допомогою перехідника, розміщеного у підшипниковій опорі.

Конструктивно патрон монтується на правому кінці привідного вала зберігаючи співвісність усієї передачі. Для кріплення використовується посадка на шпонку або фіксація через гвинти під шестигранник. Враховуючи

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використання друкованих корпусних деталей, було забезпечено відповідний виріз у 3D-моделі платформи, що дозволяє частково «втопити» корпус патрона в базу, зменшуючи загальну висоту і зміщення осі.

У контексті фрезерування гвинтових поверхонь перевагою K02-63 є те, що він дозволяє точно налаштувати центрування вручну, оскільки кожен кулачок регулюється окремо. Це важливо при роботі з полімерними заготовками, які можуть мати неідеальну геометрію або гнучкість. До того ж, при правильному налаштуванні забезпечується мінімальний биття, що позитивно впливає на якість різьблення.

Таким чином, обраний патрон K02-63 повністю відповідає технічним та конструктивним вимогам проєкту. Його універсальність, простота кріплення та висока точність центрування роблять його оптимальним рішенням для реалізації ротаційної осі на базі модифікованого CNC 3018 Pro.

2.2.3 Вал D25L30 з діаметром 8 мм

Передавання обертального моменту від редуктора до патрона у конструкції ротаційної осі здійснюється за допомогою валу D25L30 з діаметром 8 мм, який виконує функцію центрального з'єднувального елемента між двома вузлами. Даний вал обраний з урахуванням балансу між механічною міцністю, точністю обертання, простотою кріплення та доступністю в умовах лабораторного виготовлення.

Маркування D25L30 означає, що вал має діаметр 8 мм, загальну довжину 30 мм та, як правило, виконаний у вигляді циліндричної деталі з наскрізним отвором або глухим отвором для шпонкового з'єднання. Така геометрія забезпечує сумісність із вихідним валом планетарного редуктора та внутрішнім отвором патрона K02-63.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

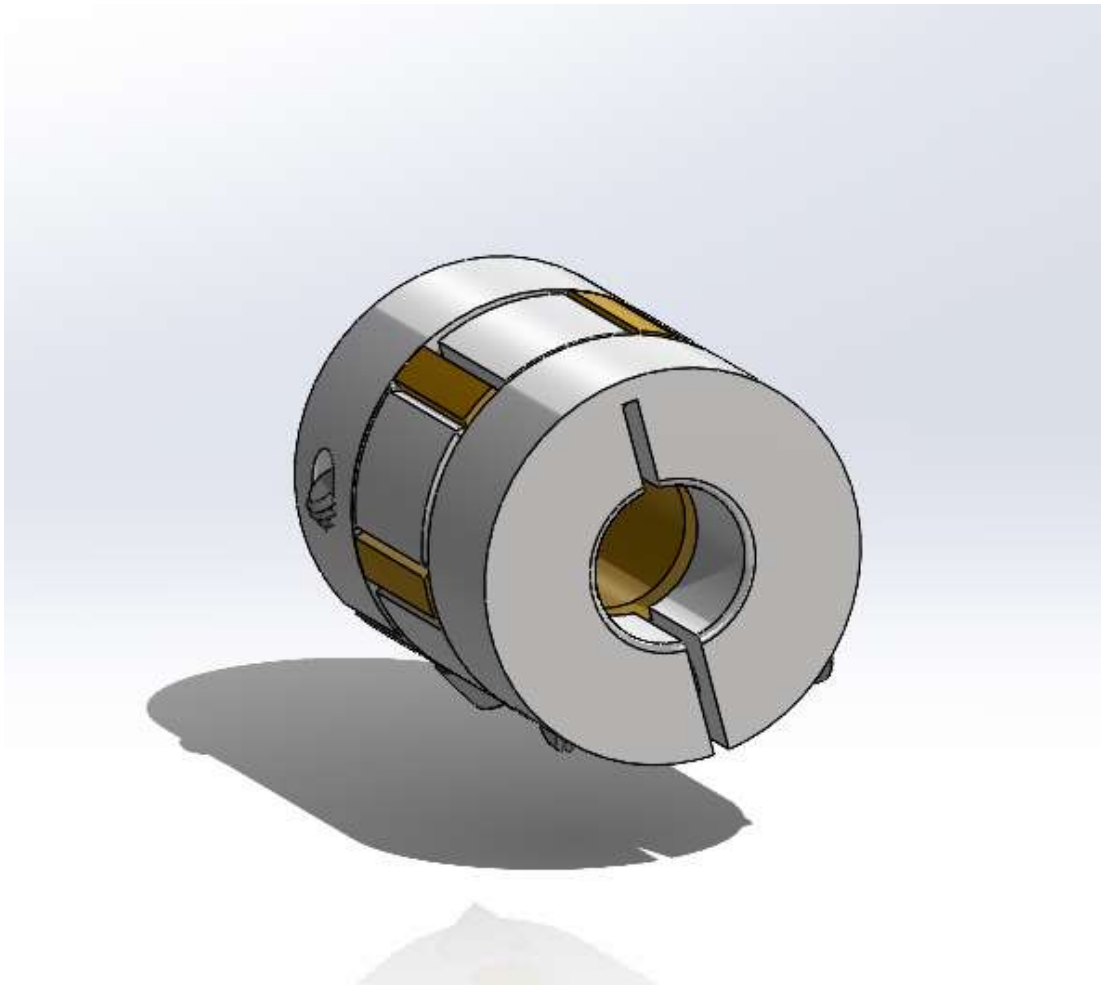


Рисунок 2.2.5 D25L30

Одним із головних завдань при виборі вала є забезпечення концентричності обертання, тобто мінімізації биття. Для цього вал виготовляється із загартованої сталі або точного алюмінію та розміщується у двох підшипникових опорах типу 608ZZ або 625ZZ, встановлених у 3D-друкованих корпусах. Така схема дозволяє компенсувати невеликі осьові навантаження, які виникають при фрезеруванні, а також гасити вібрації від двигуна.

Конструкція кріплення вала до редуктора реалізується через цангову муфту з гвинтовою фіксацією, яка забезпечує надійне з'єднання без зсуву та забезпечує передачу крутного моменту без люфту. Вільний кінець вала з'єднується з патроном через фланцеве або шпонкове з'єднання, залежно від обраної конфігурації. У моделі було реалізовано співвісну посадку вала та патрона, що дозволило зберегти геометрію осі в межах технічних допусків.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На показано зібраний вузол вала, встановленого між редуктором і патроном. Добре видно фіксаційні гвинти, посадочну частину та підшипникову опору у 3D-друкованому корпусі.

У загальній схемі ротаційної осі вал D25L30 виконує не лише функцію з'єднання, а й опорну роль, оскільки забезпечує механічну стійкість при навантаженні. Зважаючи на роботу з полімерними заготовками, відсутність надмірних згинальних навантажень дозволила обійтись без встановлення проміжних опор або додаткових підшипникових вузлів.

Таким чином, обраний вал D25L30 забезпечує прецизійне, жорстке і стабільне з'єднання між приводом та інструментом, є ключовим елементом у передачі крутного моменту і відповідає технічним та економічним вимогам модернізації.

2.3.1 Принцип встановлення та суміщення з поворотною віссю

Щоб уникнути прогину, биття та втрати точності при обробці довгих гвинтових заготовок, у процесі модернізації конструкції CNC 3018 Pro було реалізовано встановлення двох окремих опорних конструкцій-підпорок, які утримують заготовку в горизонтальній площині на рівні обертальної осі. Ці підпорки не є задньою бабкою в класичному токарному розумінні, а виконують функцію вільної підтримки обертового вала, дозволяючи зберегти його положення без значного опору обертанню.

Опори розміщено співвісно з патроном K02-63, на загальному монтажному рівні. Завдяки використанню трьох незалежних підпорок, заготовка надійно фіксується у вертикальній площині, але не затискається — тобто вільно обертається в опорах разом із приводом. Конструкція дає можливість використовувати як гладкий вал, так і вал із шліцами чи центрувальними елементами.

Підпорки мають напівциліндричну форму із внутрішньою посадкою під діаметр заготовки, та встановлюються на базову плиту або безпосередньо на профіль станка за допомогою кріплень. Для точного суміщення по висоті всі

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підпорки виготовлені однаковими по геометрії та встановлені на симетричній відстані від приводу. Це дозволяє уникнути перекосів заготовки та забезпечити паралельність її осі до напрямних фрезерної частини верстата.

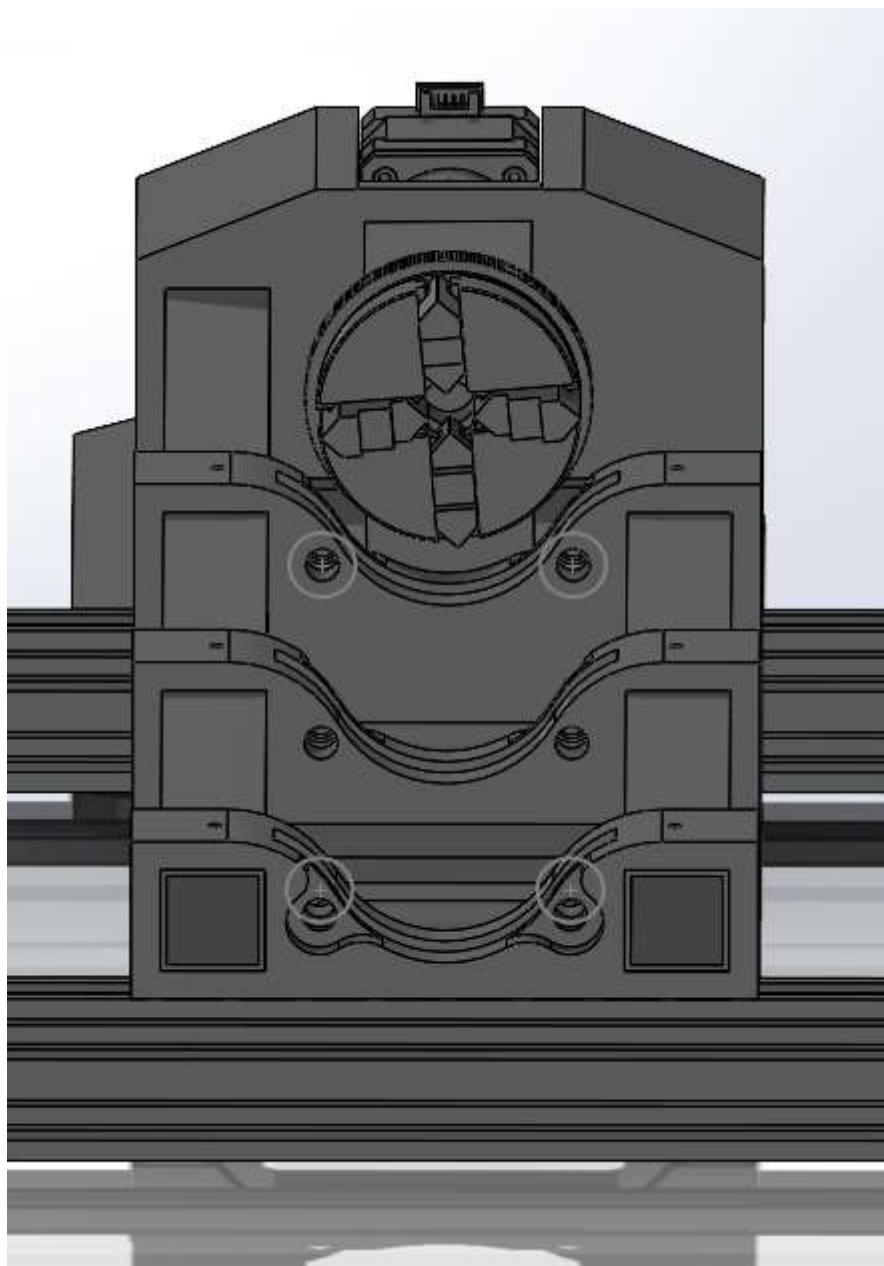


Рисунок 2.3.1 Підпори для заготовки

Процес центрування виконується вручну: заготовку обертають у патроні, спостерігаючи за візуальним відхиленням у підпорках. Завдяки відкритій конструкції є змога оперативно змістити або перевстановити опори під деталь іншої довжини без зміни геометрії платформи.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На рис. 2.3.1 зображено загальний вигляд поворотної осі з трьома підпірними опорами. Видно симетричне розміщення опор уздовж осі обертання та підтримку заготовки на всій її довжині.

Застосування такої схеми дозволяє працювати з деталями довжиною понад 300 мм без виникнення вібрацій чи зсувів, що особливо важливо при обробці м'яких полімерних матеріалів.

2.3.2 Виготовлення опорних елементів

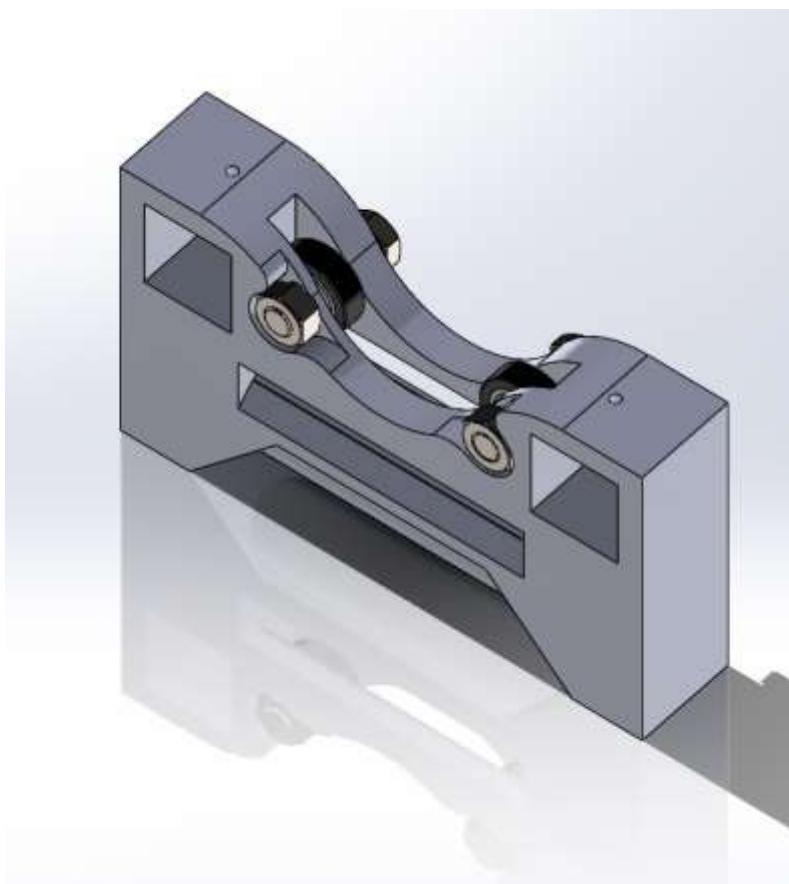


Рисунок 2.3.2 Центральна опорна підпора

Призначення

Центральна опорна підпора є частиною системи підтримки довгих обертових заготовок у складі модернізованого CNC 3018 Pro. Вона використовується для утримання вала в горизонтальній площині та зменшення радіального навантаження на шпиндель і редуктор.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Функціональні особливості конструкції

Конструкція складається з двох частин — основи та притискної верхньої кришки, що стягуються болтовим з'єднанням. В середині опорної дуги змонтовані два кулькові підшипники типу 5972KS01, які створюють низьке тертя при обертанні заготовки.

Завдяки використанню саме підшипників кочення, забезпечується:

- значне зменшення сили тертя у зоні контакту;
- стабільне обертання навіть при малій потужності приводу;
- відсутність зносу полімерної деталі при обробці.

Побудова

1. Основа початково створено ескіз прямокутного профілю на фронтальній площині.

Використано *Boss-Extrude* для побудови об'ємної основи. Додано напівциліндричний виріз (*Cut-Extrude*) з двома посадковими отворами для підшипників. Передбачені отвори під гвинти для фіксації кришки (*Hole Wizard*).

2. Верхня кришка Кришка є симетричною до верхньої частини основи. Модель створена копіюванням профілю основи з дзеркальним відображенням (*Mirror Bodies*) і незначними змінами. Місця контакту підшипників збігаються з відповідними поверхнями основи.

3. Підшипники імпортовано модель 5972KS01. Вставлено у вузол за допомогою *Insert Components*, після чого зафіксовано їх положення *Concentric Mate* до вирізу. Підшипники фіксуються притискною кришкою при стягуванні болтами.

4. Кріплення для з'єднання верхньої та нижньої частин застосовано болти за стандартом ISO 8676 M8x30 з гайками зв'язки в зборі реалізовані через *Mate: Coincident, Concentric, Parallel*. Поведінка моделі в зборі дозволяє протестувати притиск без обмежень.

Матеріал та виготовлення

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Матеріал корпусу: PETG або PLA+ (залежно від жорсткості та доступності).
- Метод виготовлення: FDM-друк. У верхній частині моделі немає нависань, отже, друк можливий без підтримок.
- Підшипники: готові промислові компоненти 5972KS01, призначені для обертових вузлів.

Переваги конструкції

- Конструкція не потребує юстування після встановлення.
- Можливе регулювання притиску болтами — для компенсації виробничих відхилень.
- Легко масштабувати для інших діаметрів валів.
- Придатна для друку, легка, замінна, не потребує складного обслуговування.

Опис бокової опори для підтримки вала

Призначення

Бокова опора є ключовим конструктивним елементом модернізованого CNC 3018 Pro і використовується для фіксації одного кінця довгої обертової заготовки. Вона виконує функцію опорного вузла, який зменшує навантаження на привід та забезпечує співвісність при фрезеруванні гвинтових поверхонь. Опора встановлюється перпендикулярно до площини верстата, безпосередньо на його торцеву стінку.

Функціональні особливості конструкції

- Конструкція забезпечує вільне обертання вала завдяки двом підшипникам кочення, які розміщено симетрично.
- Опора не блокує заготовку жорстко, а дозволяє їй рухатись з низьким опором, виконуючи роль плаваючої опори.
- Підшипники частково занурені в корпус і закріплюються притискною верхньою кришкою.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

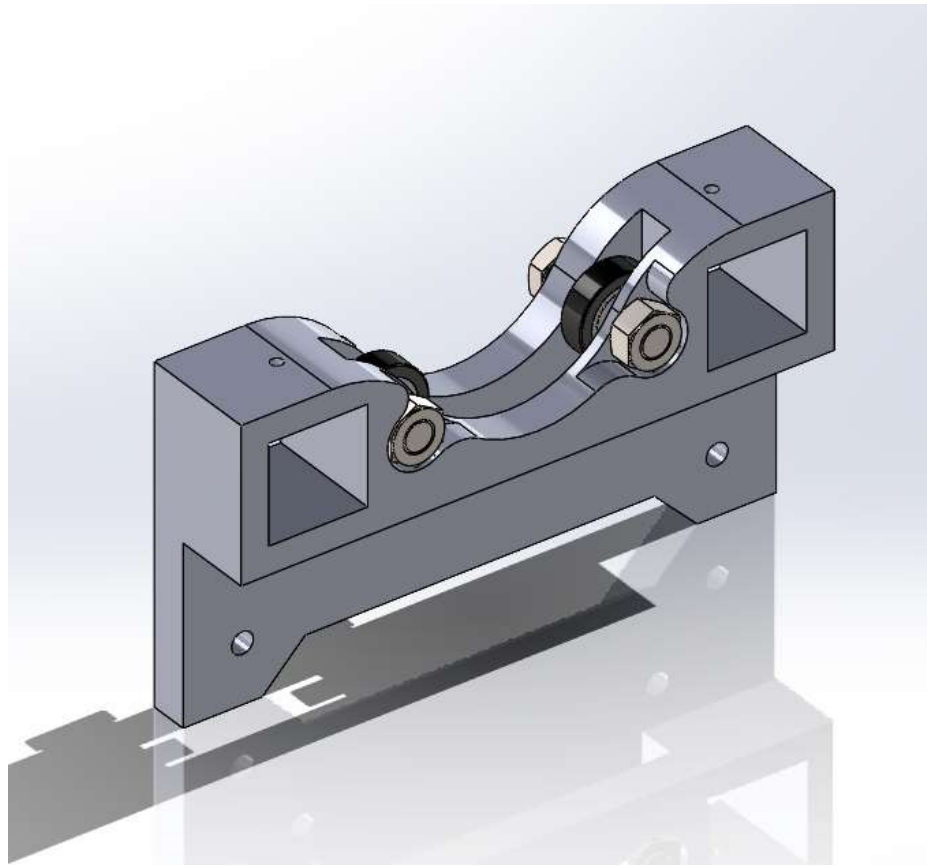


Рисунок 2.3.3 Бокова опорна підпора

Побудова моделі

1. Основа

- Створено ескіз прямолінійного профілю з виїмками під полегшення ваги.
- За допомогою *Boss-Extrude* утворено об'ємну модель.
- Вгорі виконано напівкруглий виріз, в якому розміщено два отвори для підшипників.

2. Верхня кришка

- Симетрична до верхньої частини основи.
- Фіксується болтами через наскрізні отвори, виконані *Hole Wizard*.
- Створена як окрема деталь, зібрана у вузлі через *Insert Component* і зв'язана *Mate*'ами.

3. Підшипники

- Встановлено підшипники типу 5972KS01, імпортовані через STEP-модель.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Зв'язані до корпусу через *Concentric Mate*.
- Притиск забезпечується затягуванням двох болтів.

4. Кріплення до стінки

- На тильній стороні основи передбачено монтажні отвори, через які опора кріпиться до вертикальної площини корпусу верстата.
- Використовується гвинтове з'єднання з потайними головками (типовий монтаж для алюмінієвого профілю або сталеві пластини).

Матеріал та виготовлення

Матеріал:

Буде використано термостійкий полімер (PETG або PLA+), оскільки опора не несе значного навантаження, але потребує стабільності та геометричної жорсткості

2.4 Підсилення конструкції та боротьба з люфтами

Одним із ключових завдань під час модернізації верстата CNC 3018 Pro для виконання операцій фрезерування довгих гвинтових поверхонь стало забезпечення достатньої жорсткості конструкції та зниження люфтів у механічних з'єднаннях. Через малу масу та відкриту рамну структуру базова модель демонструє недостатню стійкість при динамічних навантаженнях, що може негативно впливати на точність і якість обробки. У процесі проектування передбачено низку конструктивних рішень, які дозволяють мінімізувати паразитні переміщення, стабілізувати інструмент відносно заготовки та підвищити загальну точність роботи. Зокрема, на опорних вузлах застосовано металеві вставки — втулки та шайби, які слугують обмежувачами деформації полімерних елементів при затягуванні, запобігають розширенню пластикового корпусу, а також забезпечують точне суміщення половин корпусів. Це дозволяє досягнути кращої співвісності підшипників і зменшити мікролюфти в обертових з'єднаннях. Опорні елементи фіксуються до бази верстата як через стандартні Т-пази, так і через додаткові торцеві отвори, що дозволяє покращити фіксацію по осі обертання та забезпечити більшу стійкість до зсуву під час зміни вектора навантаження. Конструкція передбачає застосування

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повнорозмірних болтів і гайок замість типових пластикових фіксаторів. Це забезпечує надійне з'єднання з можливістю регулювання натягу, зменшує ризик осьових люфтів та спрощує демонтаж при технічному обслуговуванні. В опорних вузлах було змінено геометрію розміщення підшипників, збільшено базу між опорними точками, що дозволило підвищити опір до вигину і кручення під час обробки. Такі зміни є доцільними з точки зору геометричної стабільності та конструкційної стійкості при роботі з довгими деталями. Передбачені технічні рішення дозволяють знизити вібрації під час роботи шпинделя, покращити фіксацію заготовки навіть у режимі реверсивного обертання, а також сприяють підвищенню точності формування траєкторії при обробці гвинтових профілів. Загальна концепція побудови механічної частини вузла відповідає вимогам до підвищеної жорсткості та мінімізації деформацій у системах з точним переміщенням.

РОЗДІЛ 3. ОСОБЛИВОСТІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.3.1 Особливості САМ-програмування для обертальної обробки у середовищі Autodesk ArtCAM 2018

Програмне забезпечення ArtCAM дозволяє реалізувати управління поворотною віссю шляхом заміни лінійної координати на обертальну [9]. Одним із ключових етапів у реалізації функціональної модернізації верстата CNC3-3018Pro є адаптація системи керування до підтримки обертової осі. З огляду на те, що стандартна прошивка GRBL не підтримує повноцінну чотиривісну кінематику, було прийнято рішення реалізувати обертальну обробку шляхом програмної заміни лінійної координатної осі (Y) на поворотну (A) на етапі формування керуючої програми (УП). Такий підхід дозволяє здійснювати обробку циліндричних деталей із гвинтовою геометрією без зміни базового контролера.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для підготовки УП було використано Autodesk ArtCAM 2018, яке має функціонал для роботи у режимі циліндричної розгортки (cylinder wrapping). Цей режим дозволяє розглядати заготовку як циліндр, на поверхні якого «розгортається» двовимірною траєкторією. При цьому обертальний рух навколо осі циліндра моделюється у програмі шляхом заміни координати переміщення (наприклад, Y) на координату кута обертання (A), яка задається в градусах.

Принцип роботи системи

У контексті модернізованого CNC3-3018Pro, вісь Y, яка в базовій конструкції забезпечує поступальний рух столу, була механічно й електронно замінена на обертову вісь A, що обертає заготовку навколо її поздовжньої осі. Після цього у САМ-середовищі усі переміщення по осі Y автоматично інтерпретуються як обертання на відповідний кут. Таким чином, при генерації G-коду команда:

G1 X50 Y100

перетворюється на:

G1 X50 A1000

де A1000 означає обертання заготовки на 1000 кутових одиниць (градусів).

Алгоритм створення УП у ArtCAM 2018

1. Побудова або імпорт геометрії елемента, що має бути розгорнутим на циліндричну поверхню.
2. Активізація режиму Wrapped Rotary Machining.
3. Вибір осі обертання (у нашому випадку – $Y \rightarrow A$) і вказання діаметра заготовки.
4. Формування 2D- або 3D-траєкторій, які будуть «розгорнуті» на обертову геометрію.
5. Генерація G-коду з урахуванням обертальної кінематики.
6. Експорт програми у форматі, сумісному з GRBL (або Mach3 – у разі використання відповідного контролера).

Переваги підходу

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Такий принцип програмування забезпечує сумісність з доступним обладнанням, не вимагає складних оновлень прошивки або встановлення спеціалізованих драйверів, зберігаючи при цьому достатню точність і функціональність для обробки довгих гвинтових поверхонь, спіралей, різьб і декоративних елементів.

Таким чином, застосування Autodesk ArtCAM 2018 дозволяє ефективно реалізувати задачу формування гвинтових та інших спіральних поверхонь на деталях циліндричної форми, використовуючи лише базові ресурси стандартного верстата із незначними апаратними змінами. Дана методика відзначається простотою впровадження, економічністю та адаптивністю до умов освітньої або лабораторної бази.

3.3 Підбір інструменту та параметрів фрезерування гвинтових поверхонь

Для якісного виконання фрезерування гвинтових поверхонь на модернізованому верстаті CNC3-3018Pro, обладнаному ротаційною віссю, особливу увагу необхідно приділити вибору інструменту та визначенню оптимальних параметрів обробки. Оскільки матеріалом обробки у даному випадку є полімерна заготовка, це визначає специфіку інструментального забезпечення та режими різання. Щоб уникнути прогину заготовки при обертанні, додаються опорні вузли, які компенсують її масу та знижують навантаження на патрон [10].

Тип заготовки та особливості обробки

Використання полімерів як конструкційного матеріалу передбачає низький опір різанню, але водночас вимагає уникнення перегріву інструменту, який може призвести до деформацій або часткового плавлення поверхні. Крім того, заготовка має значну довжину та обертається навколо власної осі, що створює нестандартні умови навантаження на фрезу.

Вибір фрезерного інструменту

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи матеріал та конфігурацію обробки, доцільним є застосування кінцевих фрез з одним або двома зубами невеликого діаметра. Оптимальним варіантом є твердосплавні інструменти з полірованими канавками, які забезпечують ефективне виведення стружки та знижене тертя при високій швидкості обертання.

Для виконання гвинтових або спіральних профілів доцільно використовувати фрези з циліндричним хвостовиком та прямим або спіральним різальним краєм, здатні працювати по криволінійній траєкторії.

Параметри режиму різання

Для забезпечення стабільної та точної обробки рекомендовано дотримуватись таких принципів:

- Швидкість обертання шпинделя — вища за середню, з метою уникнення задирок та покращення якості поверхні. При фрезеруванні полімерів перевага надається значенням у верхньому діапазоні доступної швидкості.
- Подача по осі X має бути рівномірною та узгодженою з обертанням заготовки по осі A. При цьому формується гвинтова траєкторія, де співвідношення між лінійною подачею та обертом визначає крок гвинтової поверхні.
- Глибина різання встановлюється виходячи з жорсткості системи кріплення та потужності шпинделя, оскільки надмірне навантаження може призвести до втрати точності або деформацій.

ПІДСУМОК ВИКОНАНОЇ РОБОТИ

У ході виконання дипломного дослідження було розроблено, обґрунтовано та частково реалізовано проєкт модернізації настільного ЧПК-верстата CNC3-3018Pro з метою розширення його технологічних можливостей для фрезерування довгих гвинтових поверхонь.

Основні результати роботи можна узагальнити наступним чином:

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Проведено аналітичний огляд стандартної конструкції верстата CNC3-3018Pro, виявлено технічні обмеження при обробці довгих обертових заготовок.
- Запропоновано конструктивну схему модернізації, що передбачає заміщення однієї з координатних осей на ротаційну та впровадження допоміжної опорної системи.
- Розроблено 3D-модель обертальної осі з використанням крокового двигуна Nema 17, планетарного редуктора 5:1, патрона K02-63 і валу з точним centruванням.
- Спроектовано та адаптовано опорні конструкції, що стабілізують довгі заготовки при обертовій обробці; передбачено можливість їхнього виготовлення методом 3D-друку з полімеру.
- Проведено попереднє програмування САМ-маршруту в середовищі Autodesk ArtCAM 2018 із використанням функції «wrapped rotary machining», що дозволяє реалізувати фрезерування по гвинтовій траєкторії.
- Визначено параметри обробки та підібрано фрезерний інструмент відповідно до матеріалу та особливостей модернізованої системи.

Виконане дослідження підтвердило практичну доцільність обраного підходу та продемонструвало, що модернізований верстат здатен виконувати завдання, характерні для вищого класу обладнання, за умови грамотної адаптації конструкції та програмного забезпечення. Отримані результати можуть бути використані як у навчальних цілях, так і при реалізації прикладних інженерних задач у малосерійному виробництві.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведене дослідження відкриває низку можливостей для подальшого вдосконалення конструкції та розширення функціональності модернізованого верстата CNC3-3018Pro. На основі отриманих результатів можна виділити наступні перспективні напрями розвитку:

- Впровадження повноцінної чотирьохосової кінематики із заміною базового контролера GRBL на більш функціональний (наприклад, Mach3 або FluidNC), що дозволить одночасне керування обертальною та лінійними осями.
- Автоматизація позиціонування заготовки за допомогою індикаторів нульових точок, енкодерів та датчиків початкового положення ротаційної осі.
- Механічна стабілізація конструкції шляхом виготовлення опорних елементів із металу або композитних матеріалів для підвищення жорсткості системи при обробці великих заготовок.
- Інтеграція системи активного охолодження або подачі стисненого повітря для забезпечення якіснішої обробки матеріалів із низькою температурою плавлення (наприклад, PLA, ABS).
- Розширення номенклатури оброблюваних поверхонь, зокрема: створення багатозахідних гвинтових профілів, декоративних елементів із подвійною кривизною, та нарізання функціональних різьб.
- Оптимізація САМ-маршрутів із використанням адаптивних стратегій фрезерування, що дозволить скоротити час обробки та зменшити навантаження на шпиндель.

Загалом, розроблена схема модернізації може бути масштабована та використана як основа для створення доступного верстата з ротаційною віссю, придатного для навчальних цілей, прототипування, а також виготовлення унікальних виробів малої серії. Подальші дослідження в цьому напрямі сприятимуть підвищенню точності, ефективності та універсальності конструкції

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У процесі виконання дипломної роботи на тему «Модернізація верстата CNC 3018 Pro для фрезерування довгих гвинтових поверхонь» було проведено комплексне прикладне дослідження, спрямоване на підвищення технологічних можливостей базового настільного ЧПК-обладнання.

На основі аналізу технічних характеристик базової моделі CNC 3018 Pro було встановлено, що стандартна конструкція не дозволяє здійснювати обробку довгих циліндричних заготовок із гвинтовими профілями через обмеження по висоті, відсутність поворотної осі та недостатню жорсткість системи.

У рамках роботи:

- сформульовано технічні вимоги до модернізованого верстата з урахуванням поставленої мети;
- обґрунтовано доцільність впровадження ротаційної осі з приводом на основі крокового двигуна Nema 17 та планетарного редуктора з передатним числом 5:1;
- розроблено опорні конструкції з підшипниками кочення, що забезпечують підтримку та обертання довгої заготовки без надмірного тертя;
- реалізовано конструктивні рішення щодо підсилення рами верстата та зменшення люфтів за рахунок металевих вставок, болтових з'єднань і жорсткого монтажу до корпусу;
- забезпечено можливість точного суміщення елементів конструкції в 3D-середовищі SolidWorks та підготовлено модель до 3D-друку.

Практична значущість дослідження полягає в можливості застосування розробленої модернізації для виконання технологічних завдань, пов'язаних з обробкою гвинтових профілів у навчальних, дослідницьких або малосерійних умовах. Результати роботи мають прикладний характер та можуть бути основою для подальшого вдосконалення ЧПК-обладнання подібного класу.

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, мету дипломної роботи досягнуто, усі поставлені завдання виконано. Отримані результати підтверджують інженерну доцільність обраного підходу та демонструють перспективу подальших досліджень у напрямку автоматизації подібних технологічних процесів.

					<i>КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3018-PRO CNC Router – Product Details. *Woodstarter*.
URL: <https://woodstarter.com/collections/cnc-laser-machines/products/3018-pro-cnc-router> (дата звернення: травень 2025).
2. 3018-PRO DIY Desktop CNC Router Kit. *SainSmart*.
URL: <https://docs.sainsmart.com/article/5aw3myyf3n-genmitsu-3018-pro-assembly-notes> (дата звернення: травень 2025).
3. CNC 3018 (Pro) – Buyer’s Guide. *All3DP*. URL: <https://all3dp.com/2/cnc-3018-pro-buyer-s-guide> (дата звернення: травень 2025).
4. CNC 3018 Genmitsu 3018 Pro Resources *SainSmart*.
URL: <https://docs.sainsmart.com/article/3jgtgas880-genmitsu-3018-pro-resources> (дата звернення: травень 2025).
5. Genmitsu 3018 Pro for 1st CNC discussion. *Reddit*.
URL: https://www.reddit.com/r/hobbycnc/comments/paggb7/genmitsu_3018_pro_for_1st_cnc (дата звернення: травень 2025).
6. CNC 3018 to 3040 Upgrade with 500W Spindle Motor. *YouTube*
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=an0JTNjjmwc> (дата звернення: травень 2025).
7. Планетарні передачі *Stud*
URL: https://stud.com.ua/72527/tehnika/planetarni_peredachi (дата звернення: травень 2025).
8. Kiran S. 3018 CNC Machine Upgrade to 5050 CNC. *Machine Instructables*. URL: <https://www.instructables.com/3018-CNC-Machine-Upgrade-to-5050-CNC-Machine/> (дата звернення: травень 2025).
9. Overseer314. Is it realistic to add a 4th axis to my CNC 3018? *Reddit*.
URL: https://www.reddit.com/r/hobbycnc/comments/klfi9k/is_it_realistic_to_add_a_4th_axis_to_my_cnc_3018/ (дата звернення: травень 2025).

					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

10.Радіальні підшипники. *Irbis*.

URL: <https://www.irbis.ua/catalog/podshipniki/radialnyye-podshipniki>

(дата звернення: травень 2025).

11.Using ArtCAM 2018 for CNC Rotary Axis Work. *YouTube*.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=l68WcQOV2xY>.

12.Характеристики ЧПУ CNC 3018 Pro DIY. *FreeDelivery*.

URL: <https://freedelivery.com.ua/elektronika-52/dlja-chpu/chpu-standok-frezernyi-cnc-3018-pro-cnc3018-grbl-diy-patron-er11-canga.html> (дата

звернення: травень 2025).

13.Обговорення CNC 3018 і четвертої осі. *Reddit*.

URL: <https://www.reddit.com/r/hobbycnc/> (дата звернення: травень 2025).

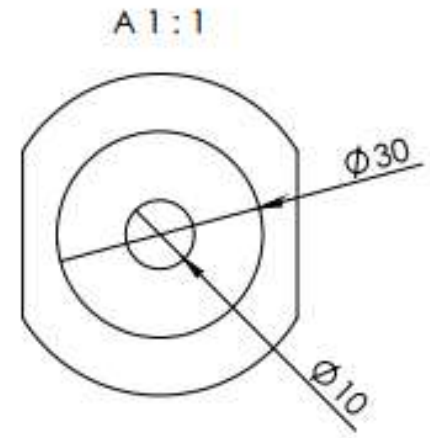
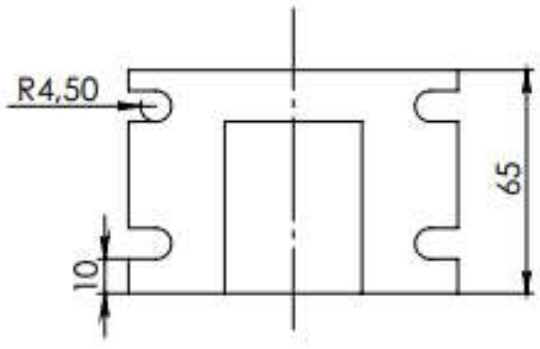
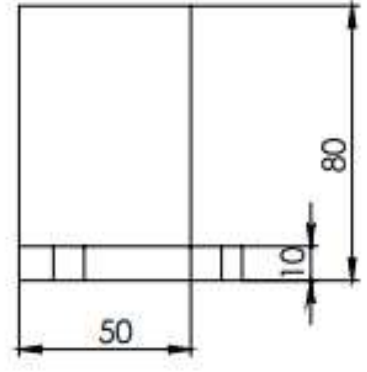
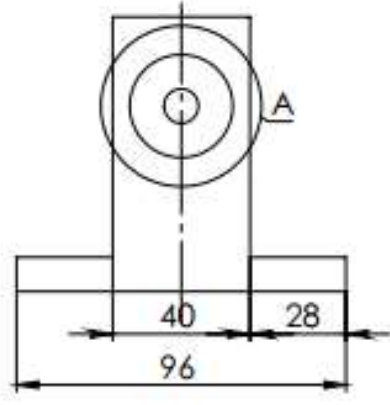
					КР.ПМІ-63.06.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ДОДАТКИ

СБ

Перв. промен.

Справ. №



А

А

Подп. и дата

Изм. № дубл.

Взам. инв. №

Подп. и дата

Изм. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Комарець В.В.		
Пров.		Копей В.Б.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

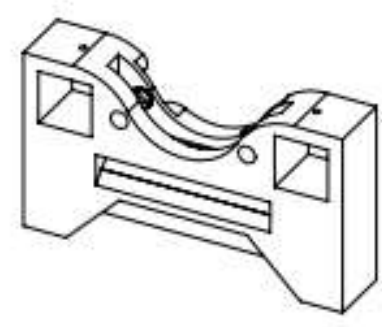
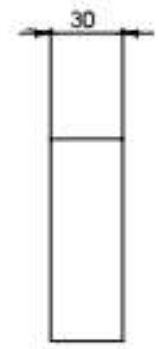
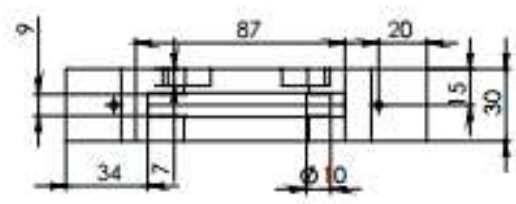
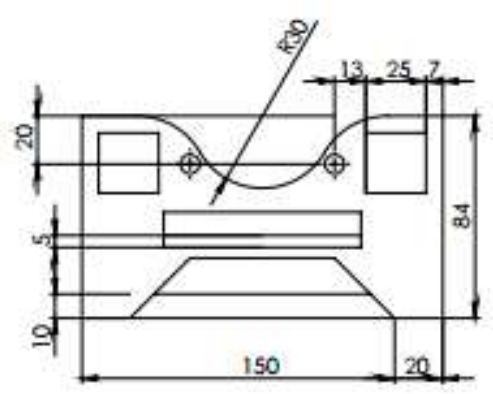
БР.ПМІ-64.01.02.003

**Опора патрона
K02-63**

Лит.	Масса	Масштаб
Лист		Листов

**ІФТУНГ
ПМІ-21-1**

Ім'я, № листу	Підп. і дата	Вказ. мав. №	Ім'я, № дубль.	Підп. і дата	Стор. №	Лист. порядком.



СБ

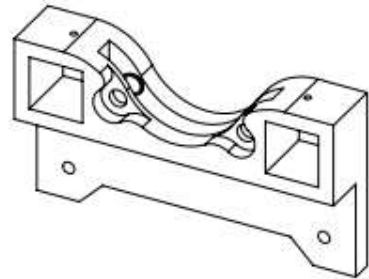
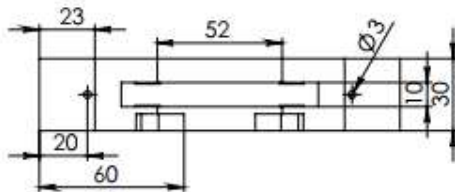
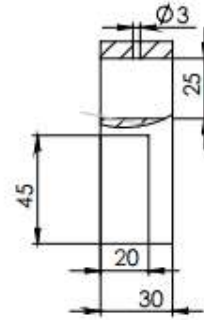
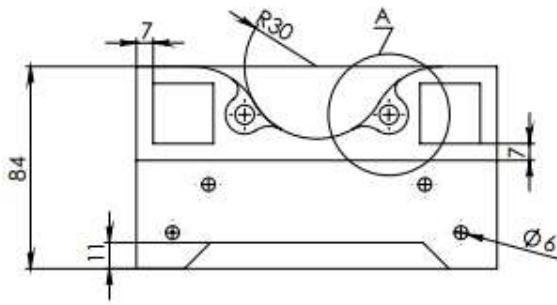
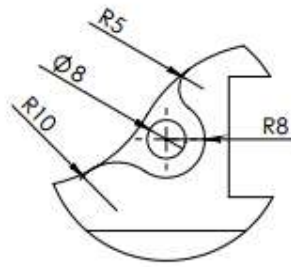
				БР.ПМІ-64.01.02.005		
Ім'я, Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.	Комаров В.В.					
Прок.	Копей В.Б.			Лист	Листом	ІФТУНГ ПМІ-21-1
Т. контр.						
Н. контр.						
Утв.						

Підпора центральна

Файл: Сетевий_директ

СБ

DETAIL A
SCALE 1:1



Гарв. примен.
Стрл. №

Имя, № подл.	Подп. и дата	Взам. имя, №	Имя, № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.
Разраб.		Комарец В.В.	
Пров.		Копей В.Б.	
Т. контр.			
Н. контр.			
Утв.			

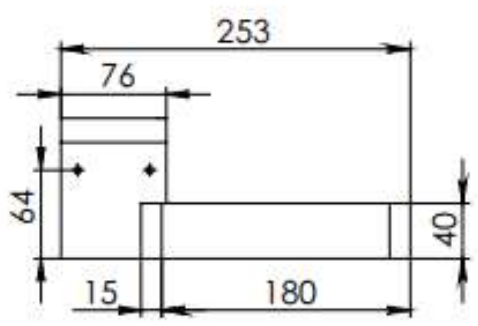
БР.ПМІ-64.01.02.006

Бокова підпора

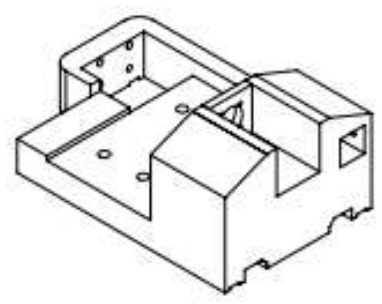
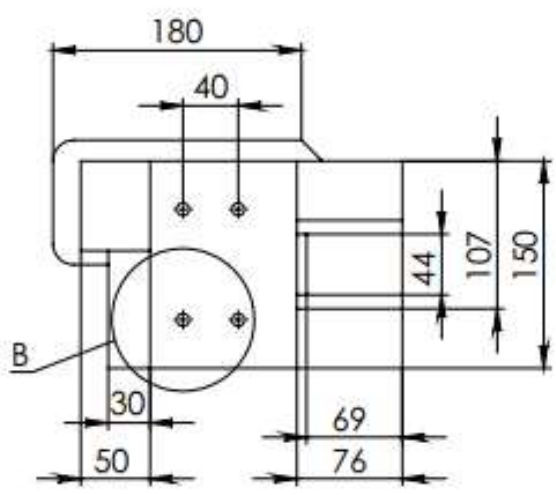
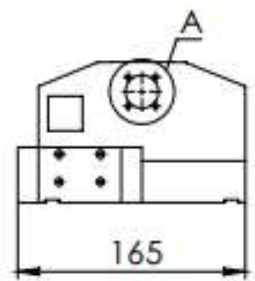
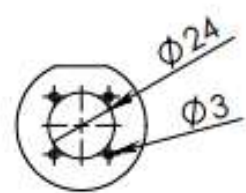
Лит.	Масса	Масштаб
Лист	Листов	
ІФТУНГ		
ПМІ-21-1		

Лист	Перв. примен.
	Справ. №
Подп. и дата	Д
	А
Взам. инв. №	Инд. № дубл.
Подп. и дата	
Инд. № подл.	

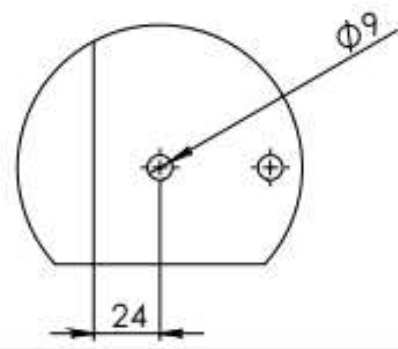
СБ



A 2:5



B 2:5



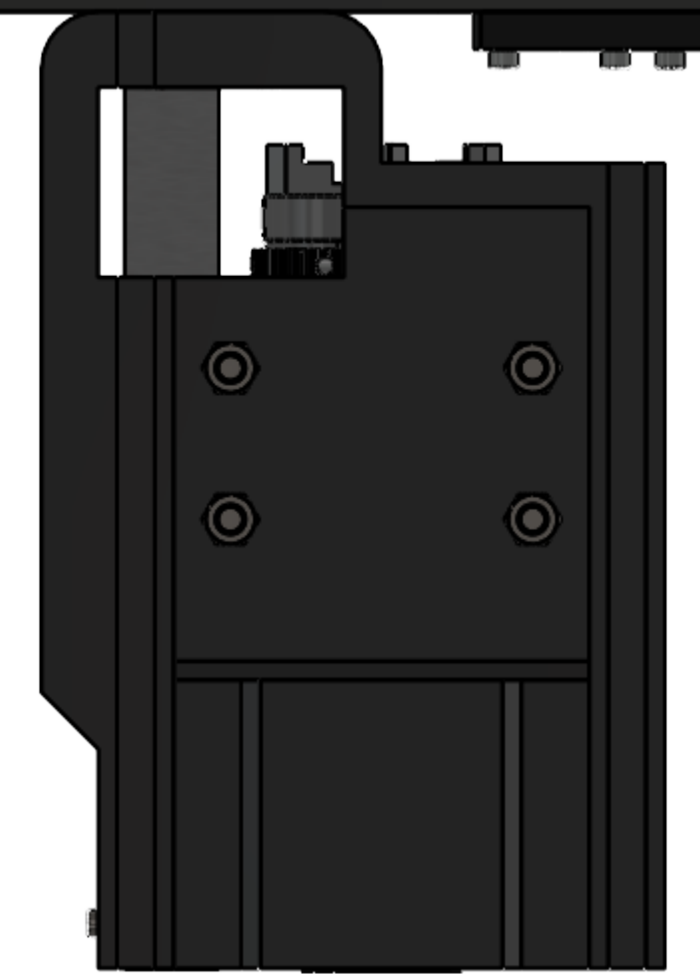
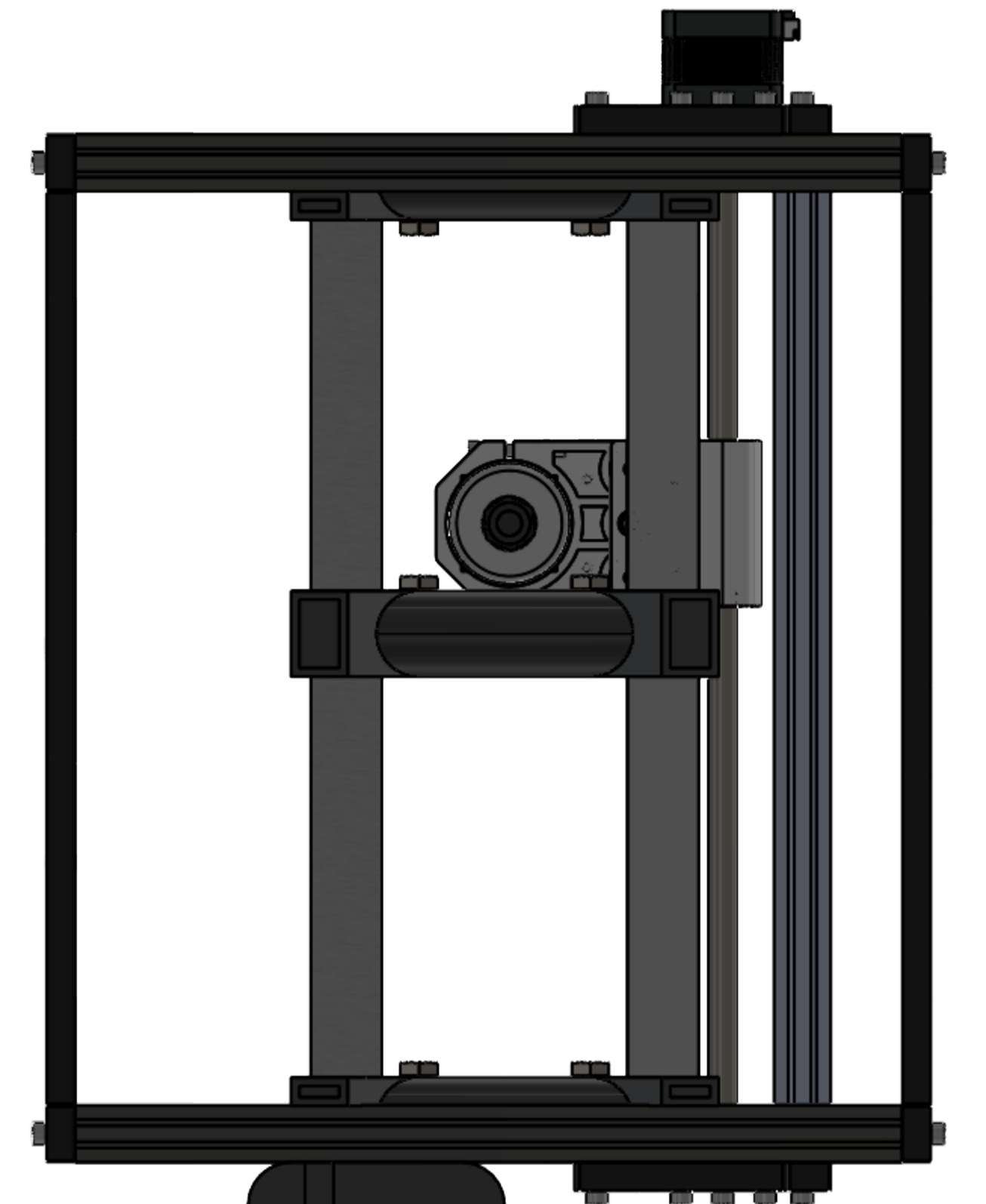
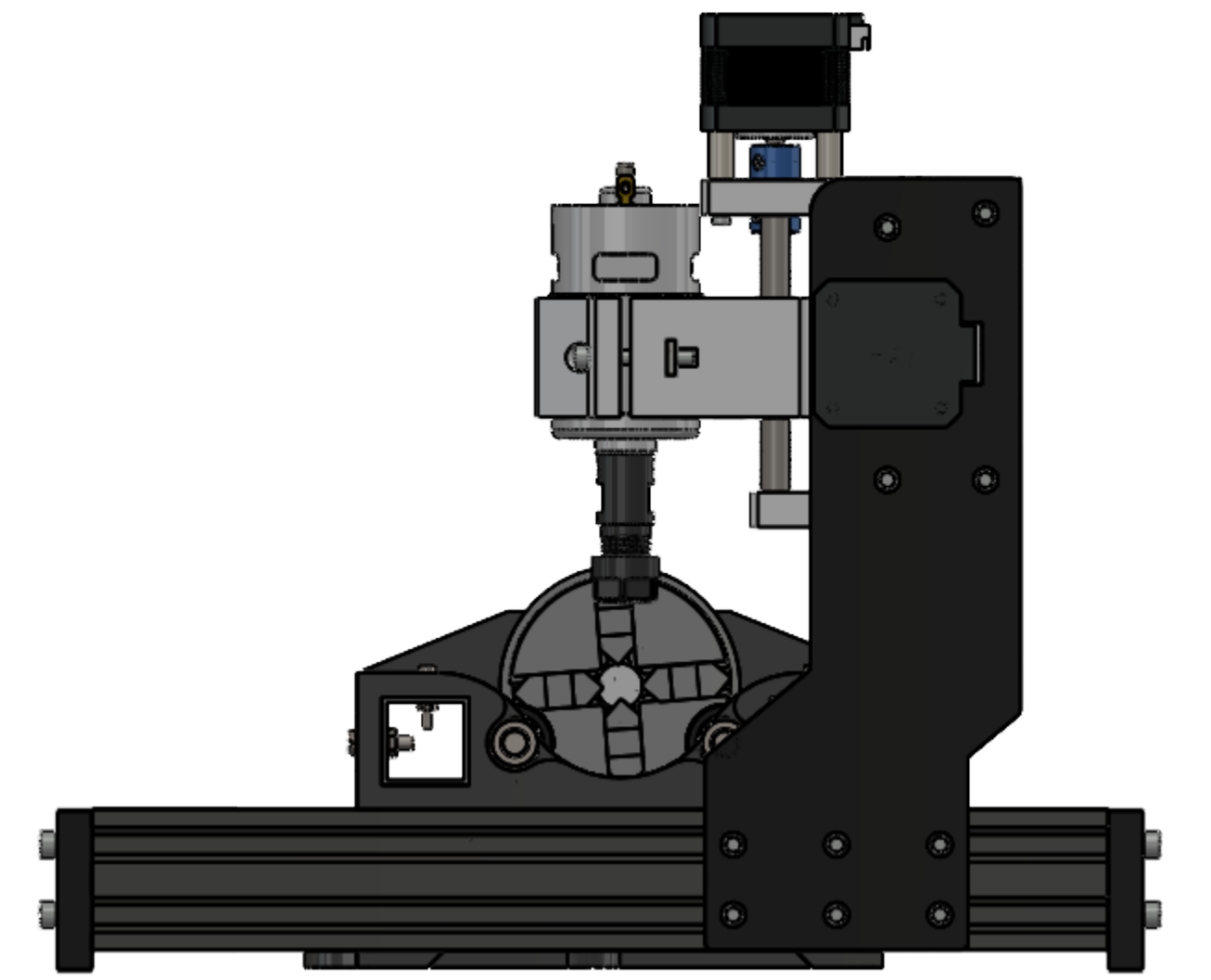
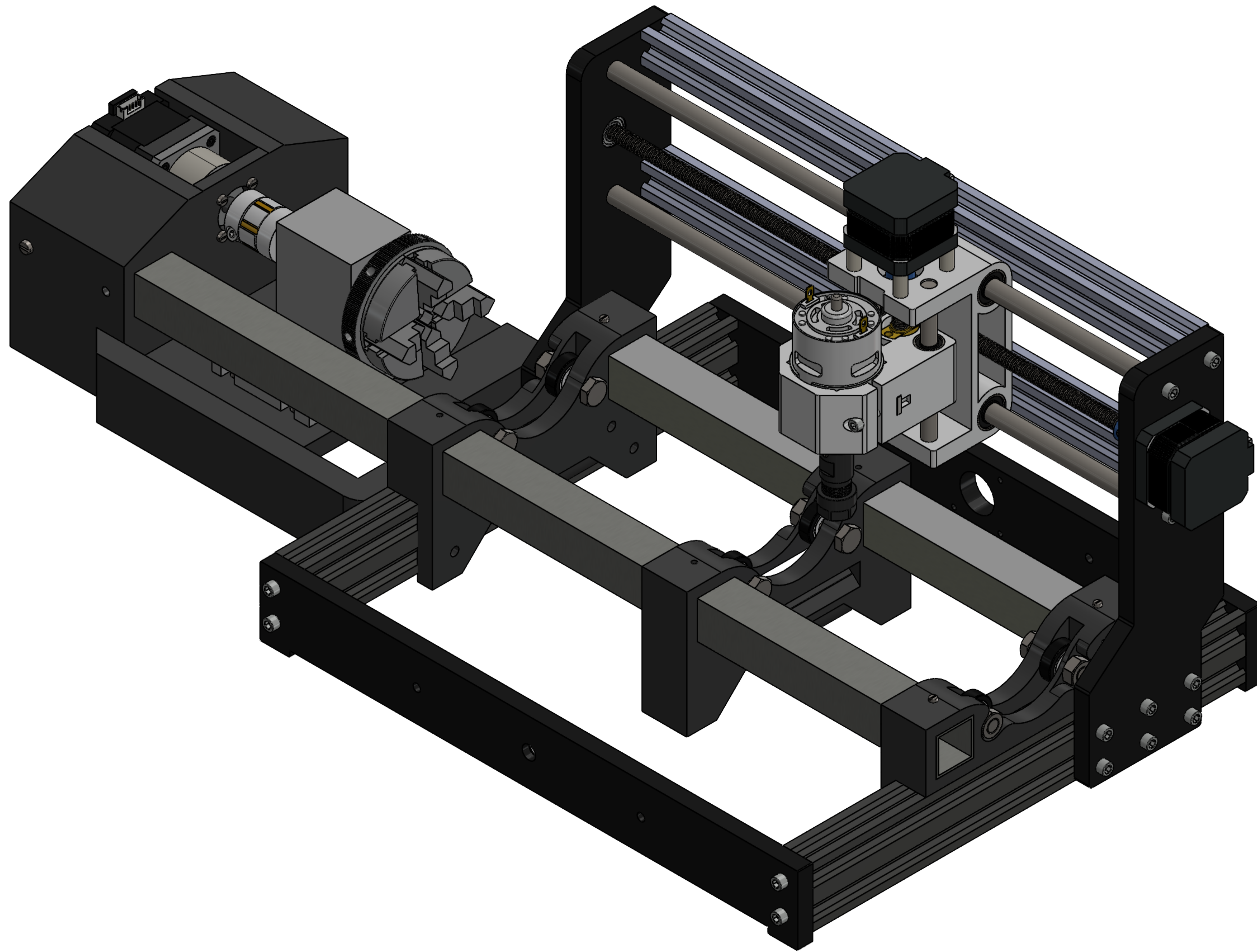
БР.ПМІ-64.01.03.001

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		Комарець В.В		
Пров.		Колей В.Б		
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

**Базовий корпус
ротаційного вузла**

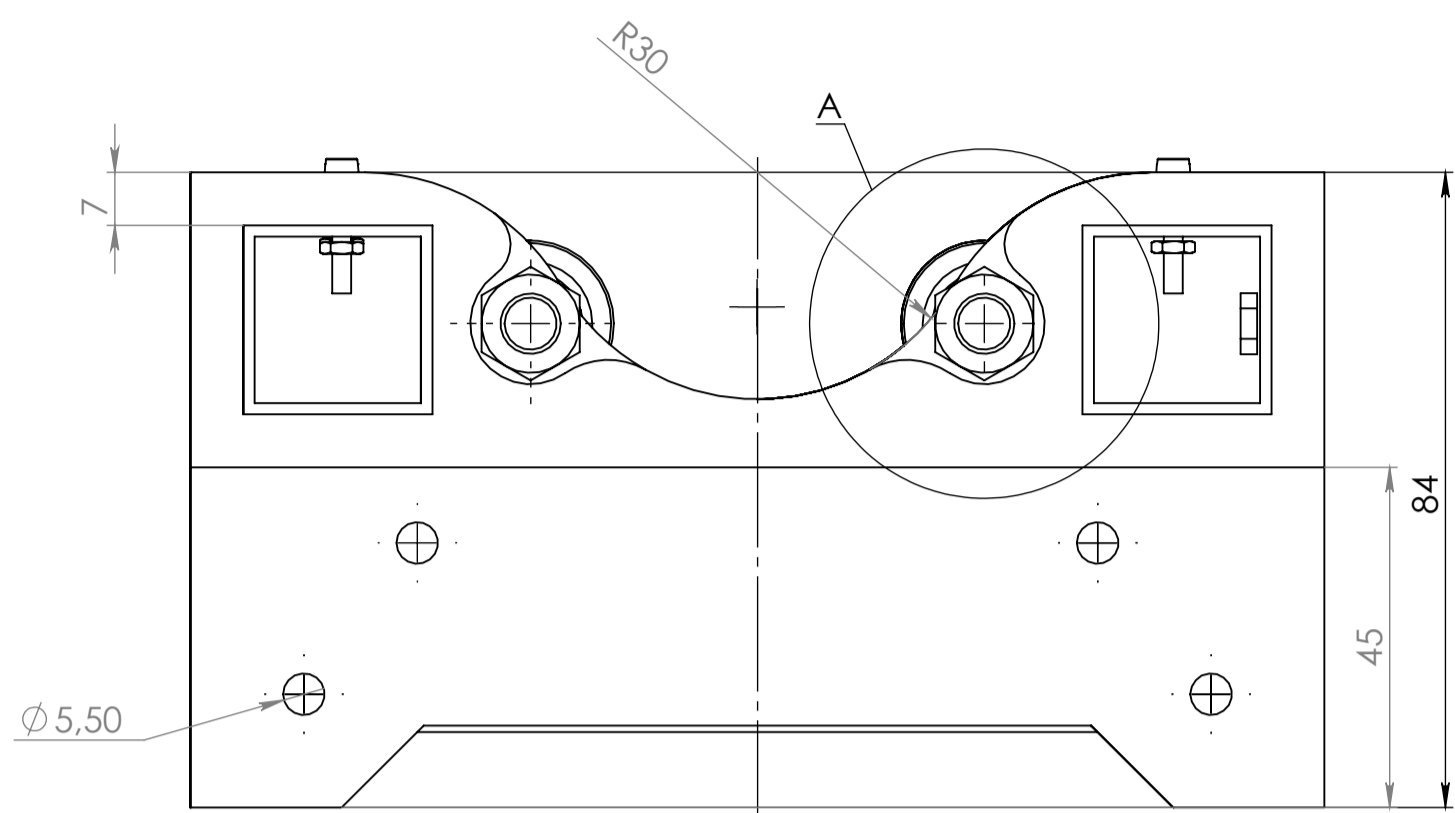
Лит.	Масса	Масштаб
Лист	Листов	

**ІФТУНГ
ПМІ-21-1**

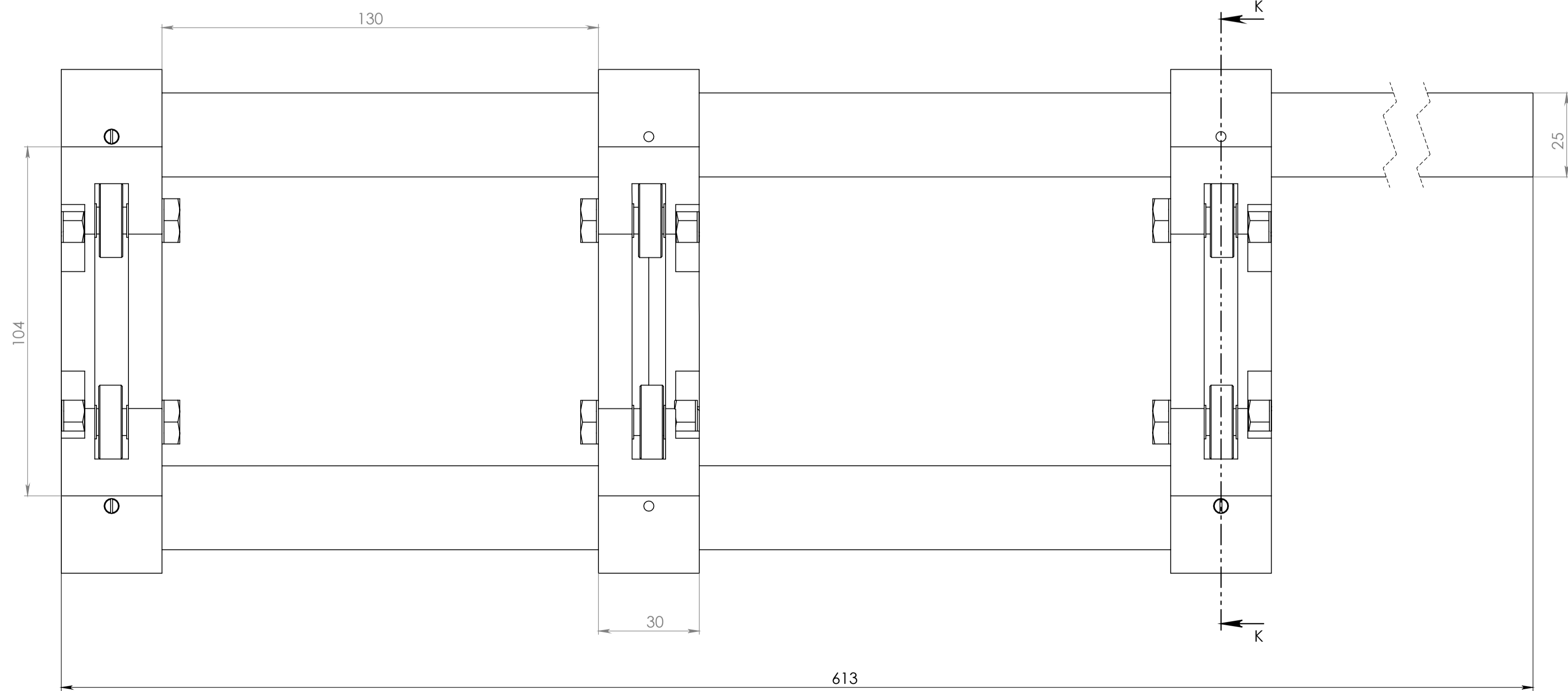
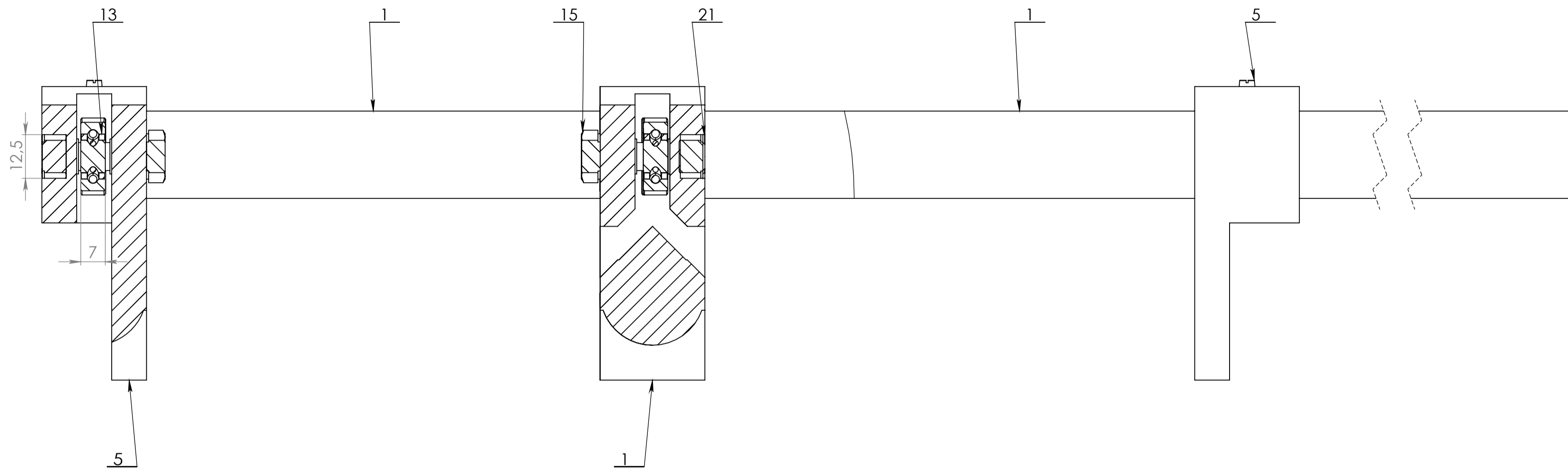
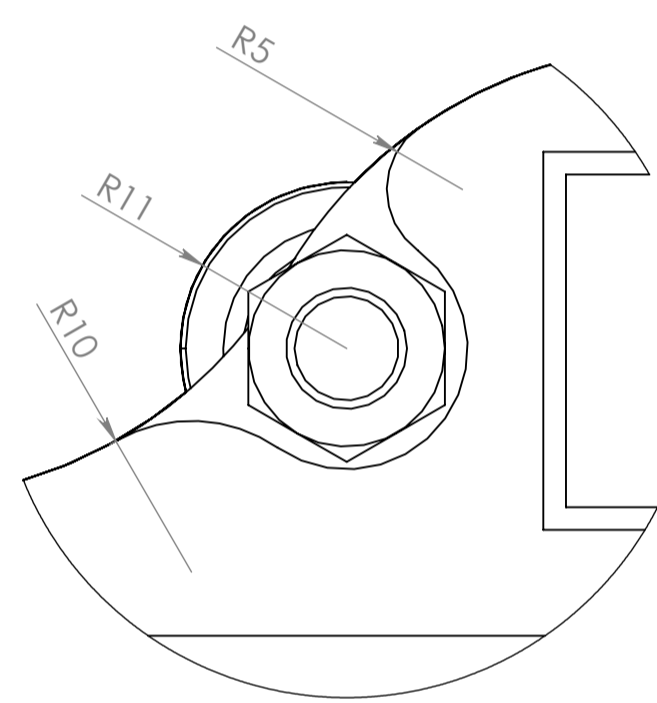


				БР.ПМІ-64.01.02.002		
				Загальний вигляд верстата після модернізації		
Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.	Комарець В.В.					
Пров.	Копей В.Б.					
Т. контр.						
Н. контр.						
Утв.						
				Лист	Листов	
				ІФТУНГ ПМІ-21-1		
				Формат А1		

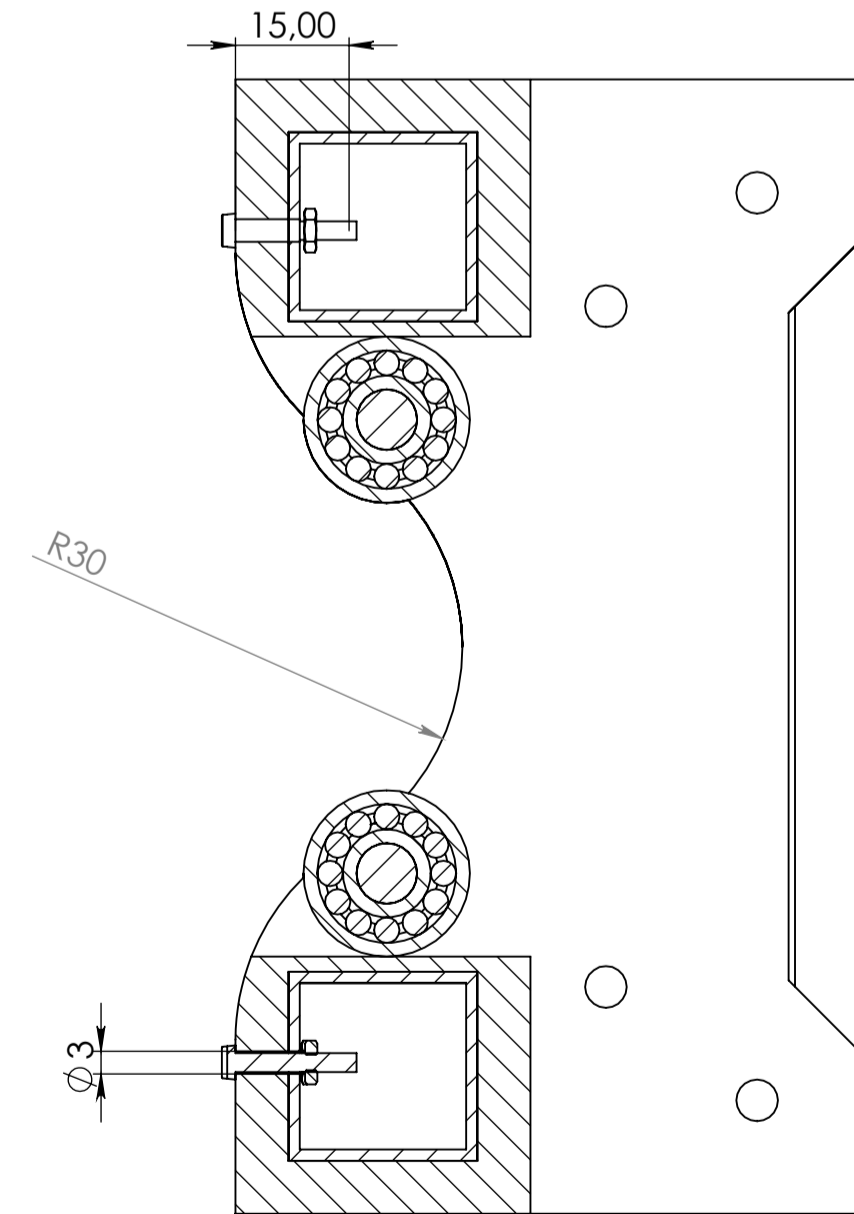
Имя № подл. Подп. и дата Взам. инв. № Инв. № дубл. Подп. и дата Стр. № Перв. примен.



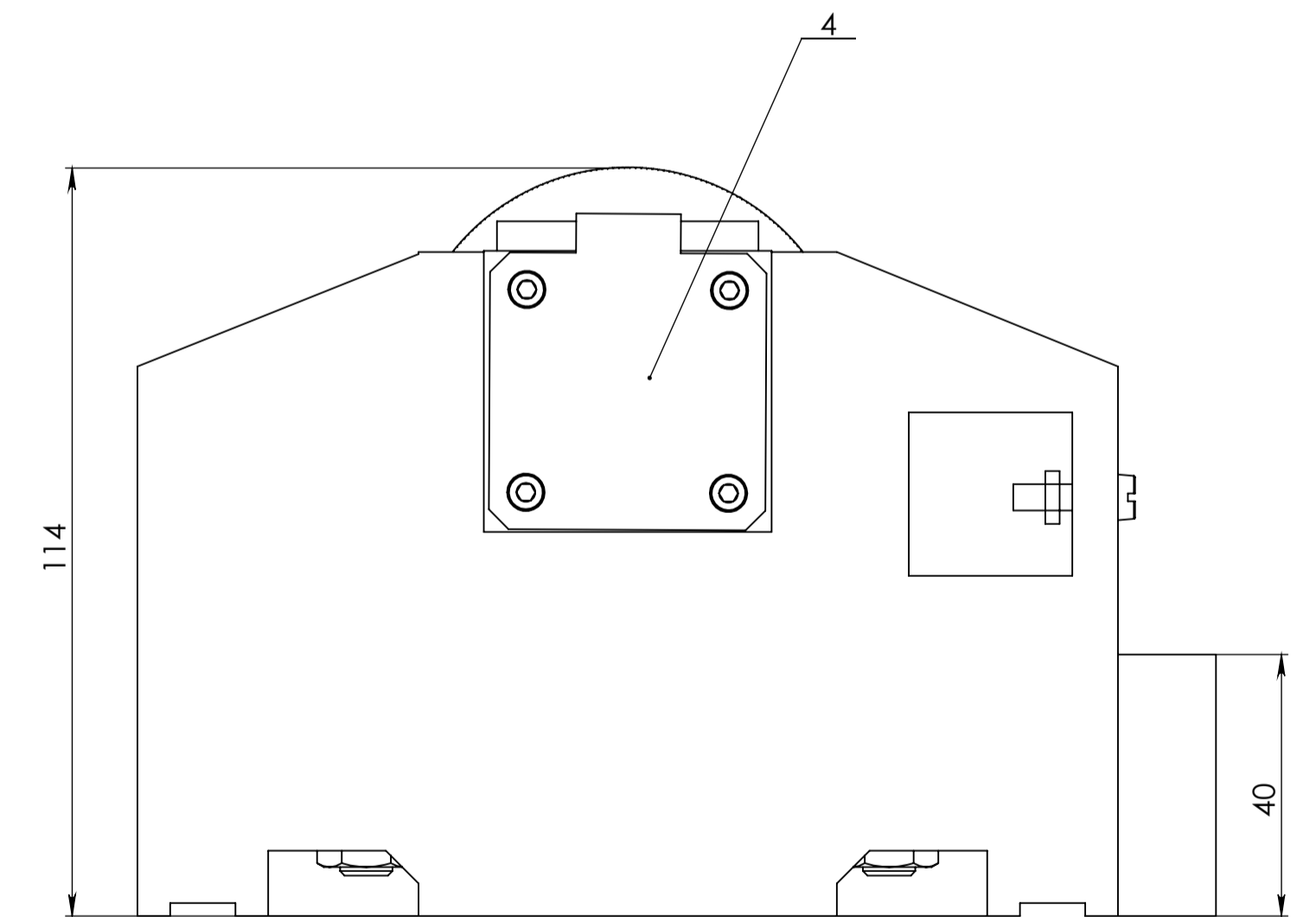
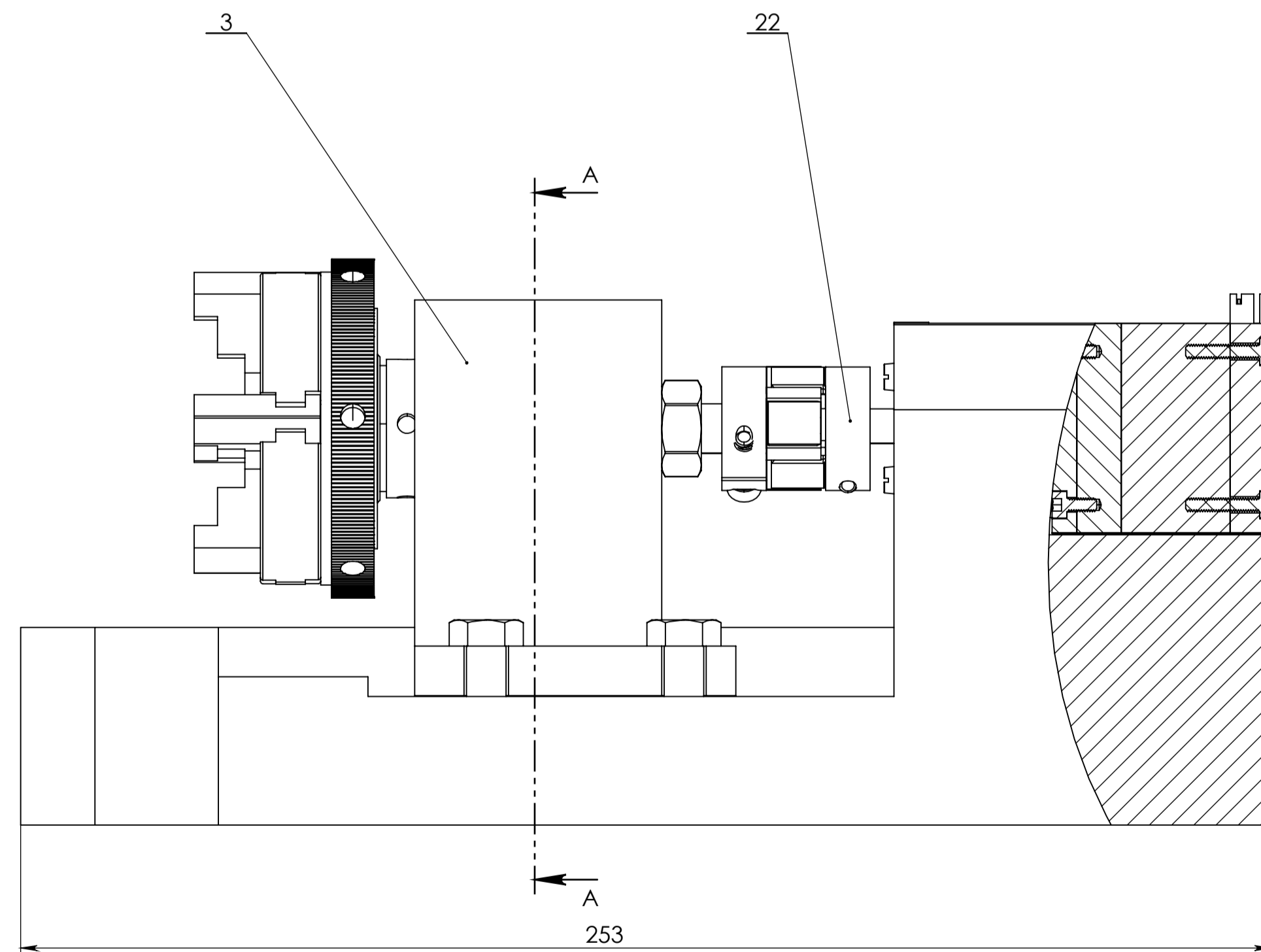
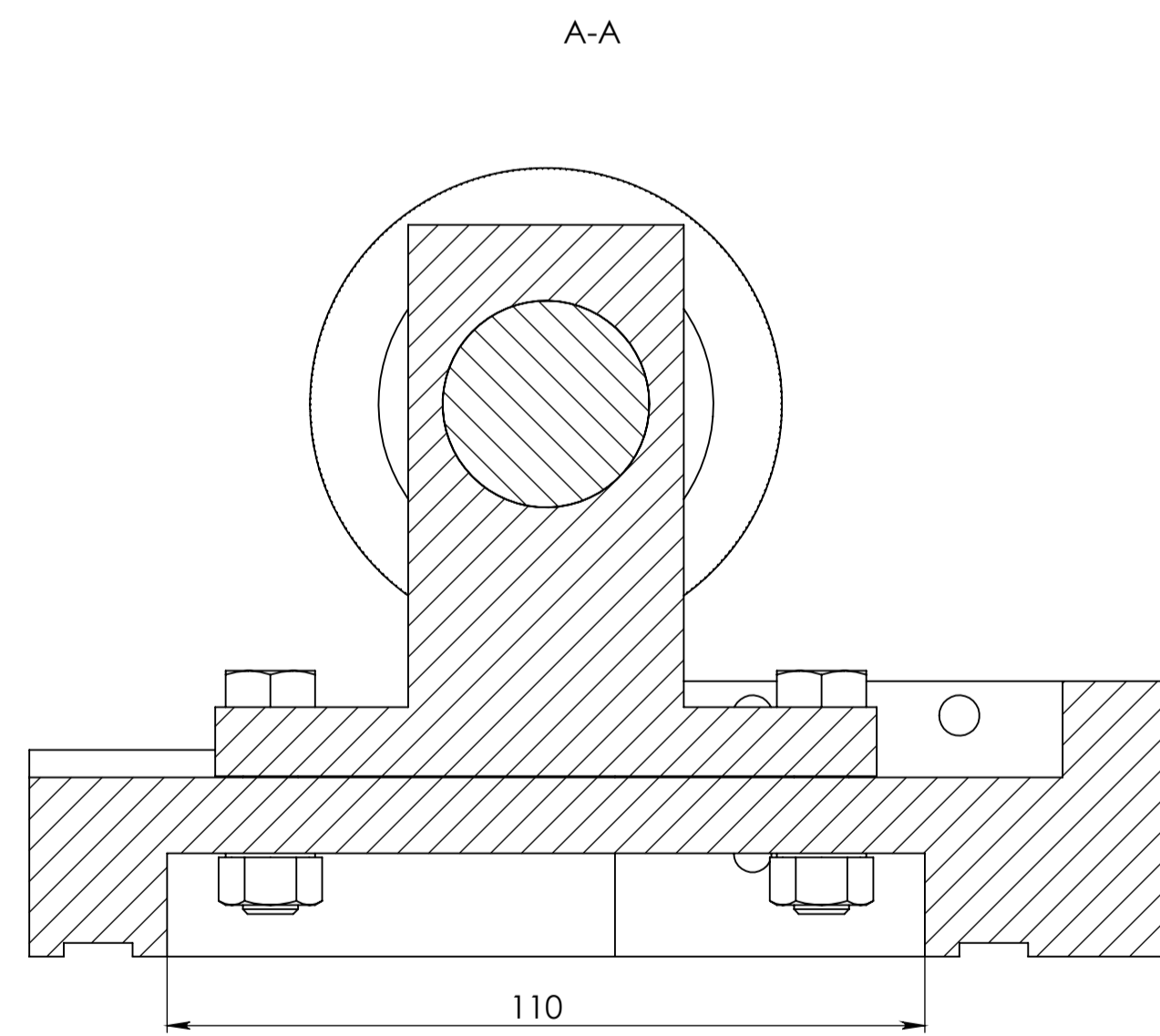
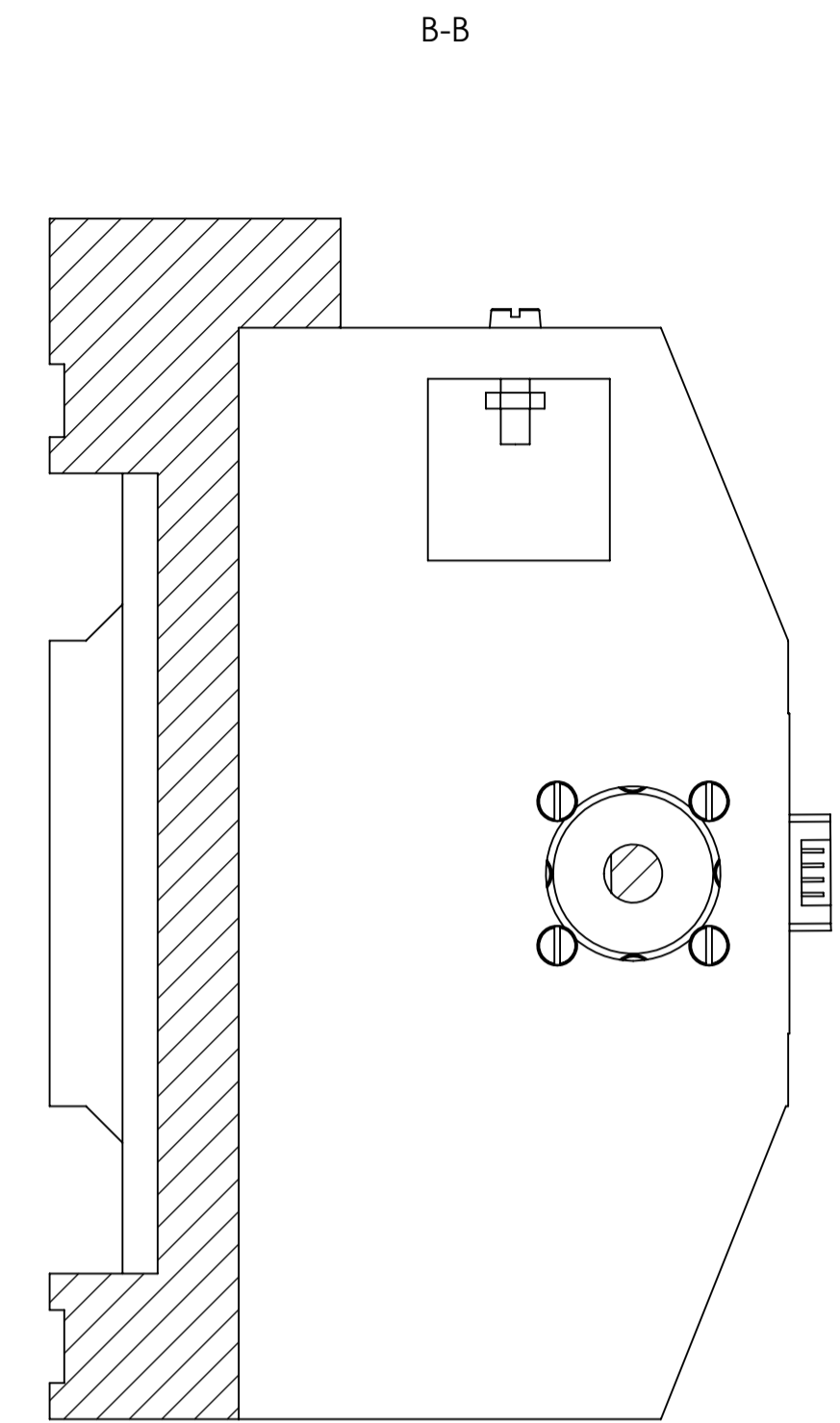
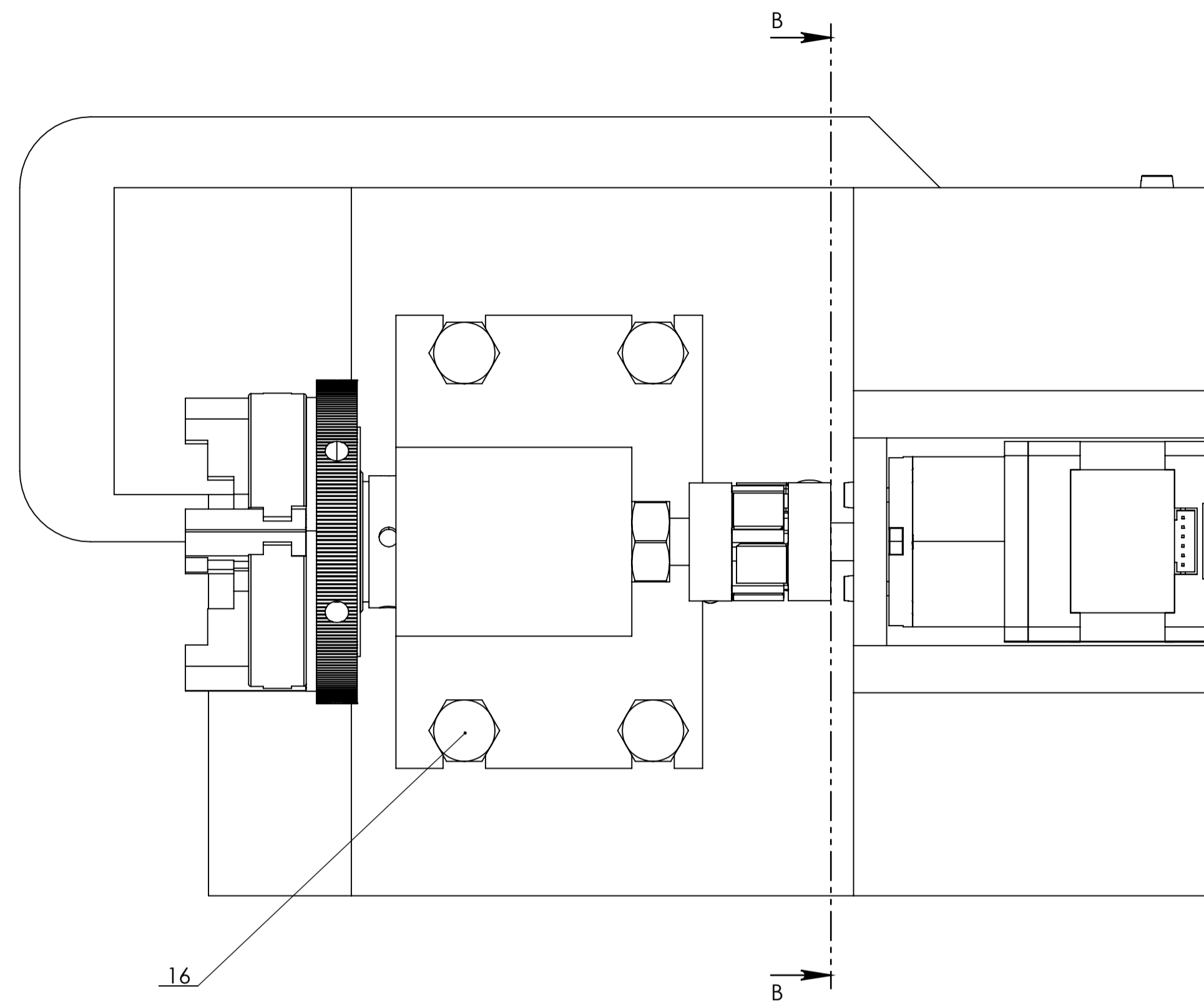
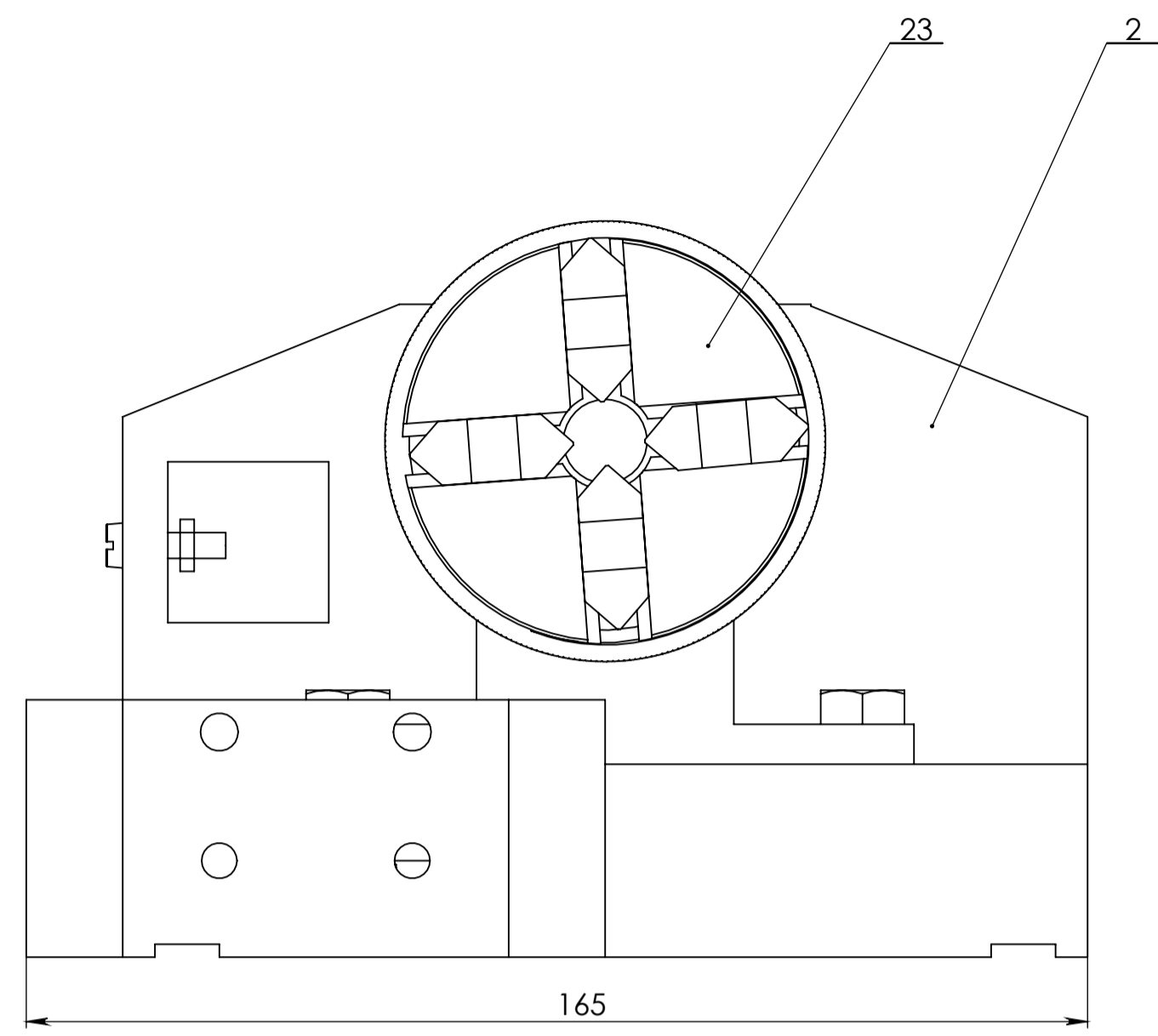
A 2:1



K 1:1



				БР.ПМІ-64.01.02.001СБ		
				Опорні вузли для утримання заготовки		
Лист	Маса	Масштаб		Лист	Листов	Масштаб
		1:1				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.		Комарець В.В				
Пров.		Копей В.Б				
Т. контр.						
Н. контр.						
Утв.						



				БР.ПМІ-64.01.03.003СБ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Механізм ротаційної осі	Лит.	Маса	Масштаб
Разраб.	Комарець В.В.							1:1
Пров.	Колей В.Б.							
Т. контр.								
Н. контр.						Лист	Листов	
Утв.						ІФТУНГ		
						ПМІ-21-1		
						Формат А1		

T1
 G43 H1
 M03 S18000
 G00 X0.000 F8000
 G00 Y0.000
 G00 Z177.800 F3000
 G00 A0.000

 G00 Y0.000 Z165.100 A0.000
 G01 Y0.040 A-180.000
 G01 Z139.792 F3000
 G01 A180.000 F10000
 G01 Y0.190
 G01 Y0.265 Z139.550
 G01 Y0.274 Z139.581
 G01 Y0.340 Z139.792
 G01 A-180.000
 G01 Y0.640
 G01 A180.000
 G01 Y0.688
 G01 Y0.739 Z139.759

G01 Z149.845 A-20.094
 G01 Z150.431 A-19.887
 G01 Z150.680 A-19.704
 G01 Z150.754 A-19.552
 G01 Z150.777 A-19.438
 G01 Z150.777 A-19.172
 G01 Z150.717 A-18.948
 G01 Z150.552 A-18.523
 G01 Z150.385 A-18.158
 G01 Z149.576 A-16.623
 G01 Z149.147 A-15.780
 G01 Z148.657 A-14.945
 G01 Z148.314 A-14.768
 G01 Z148.301 A-14.580
 G01 Z147.949 A-14.360
 G01 Z146.819 A-13.783
 G01 Z146.489 A-13.564
 G01 Z146.282 A-13.347
 G01 Z146.212 A-13.211
 G01 Z146.189 A-13.088

M05
 M30

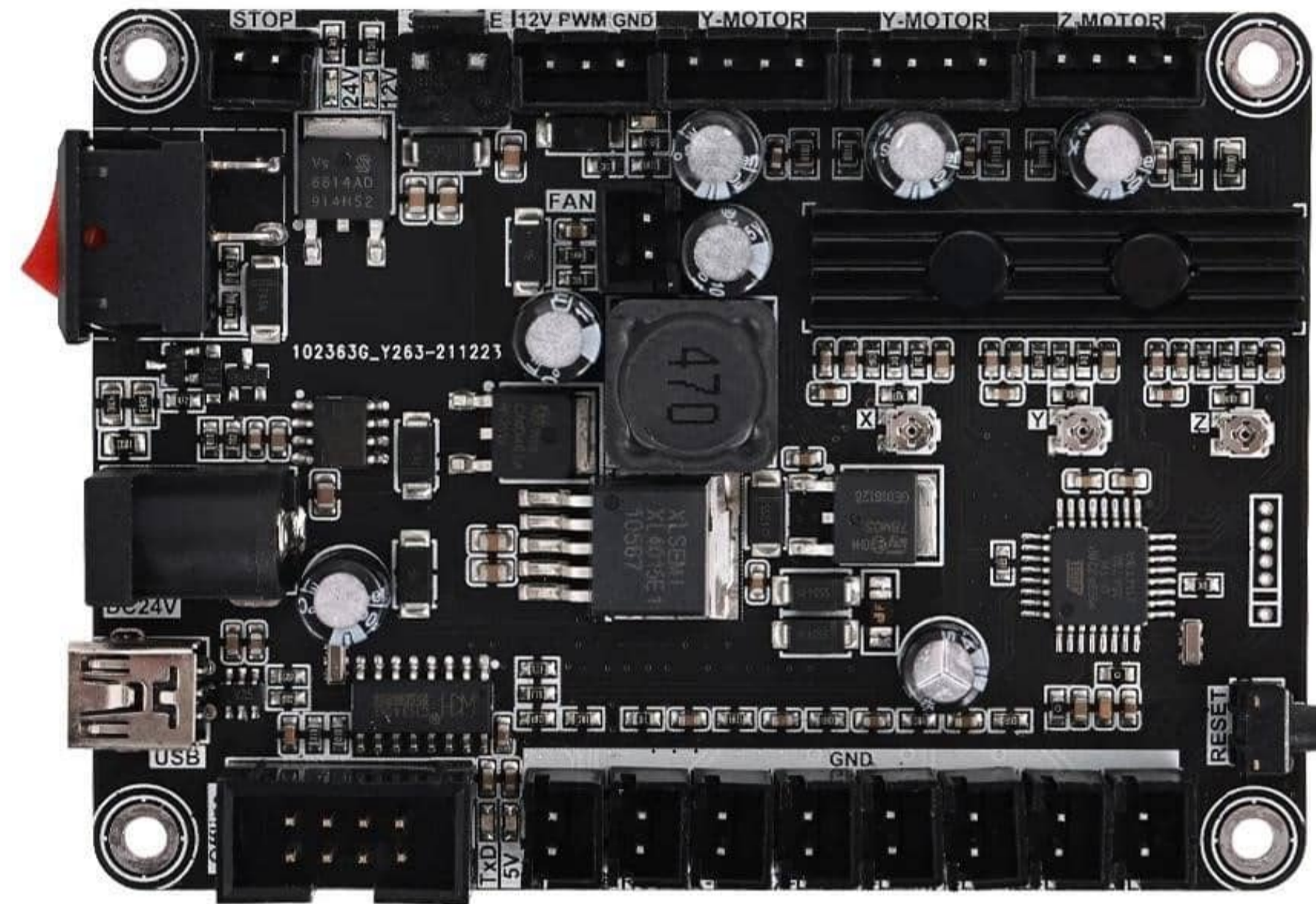


Рис 1 GRBL 1.1

Характеристики GRBL 1.1:
 Платформа: Arduino Uno (ATmega328P)
 Кількість осей: 3 (X, Y, Z)
 Частота ШІМ (PWM): 1 кГц (налаштовується)
 Максимальна роздільна здатність подачі: до 30 000 кроків/сек
 Буфер команд: 128 байт
 Підтримка швидкої зупинки (Feed Hold): є
 Максимальна довжина команди: 80 символів
 Підтримка лінійної інтерполяції (G01): є
 Підтримка кругової інтерполяції (G02, G03): є
 Підтримка G-кодів: G0, G1, G2, G3, G4, G10, G17–G21, G28, G30, G38.2–G38.5, G40, G43.1, G49, G53–G59, G61, G80, G90–G94, G98–G99
 Підтримка M-кодів: M0, M2, M3, M4, M5, M8, M9, M30
 Протокол зв'язку: UART (9600–115200 бод, типowo — 115200)
 Підтримка кінцевих вимикачів: 6 входів (мінімум і максимум для кожної осі)
 Холості переміщення (Rapid travel): до 2000 мм/хв (обмежено апаратно)
 Підтримка роботи з лазерами: є, включно з режимом «laser mode»

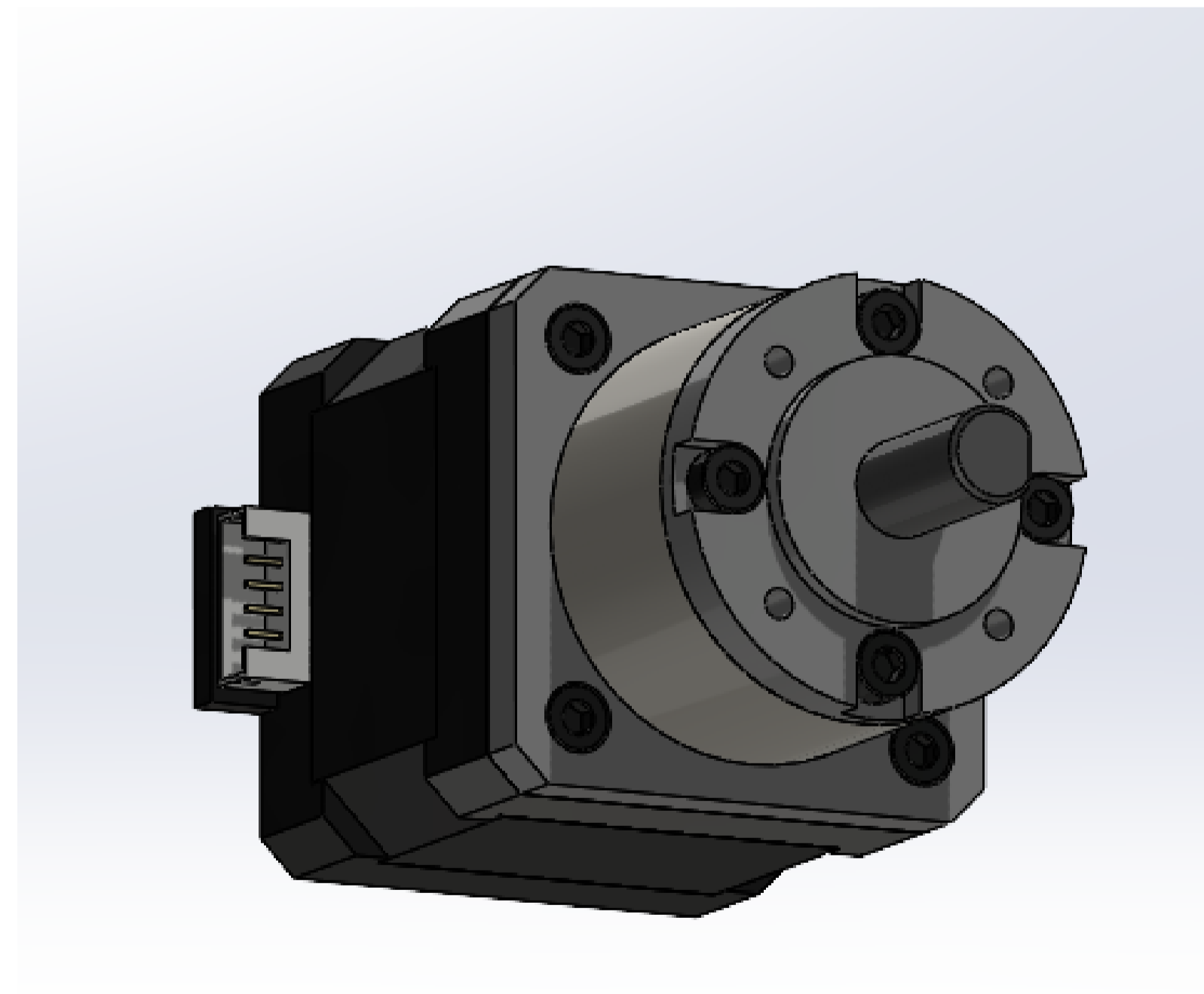
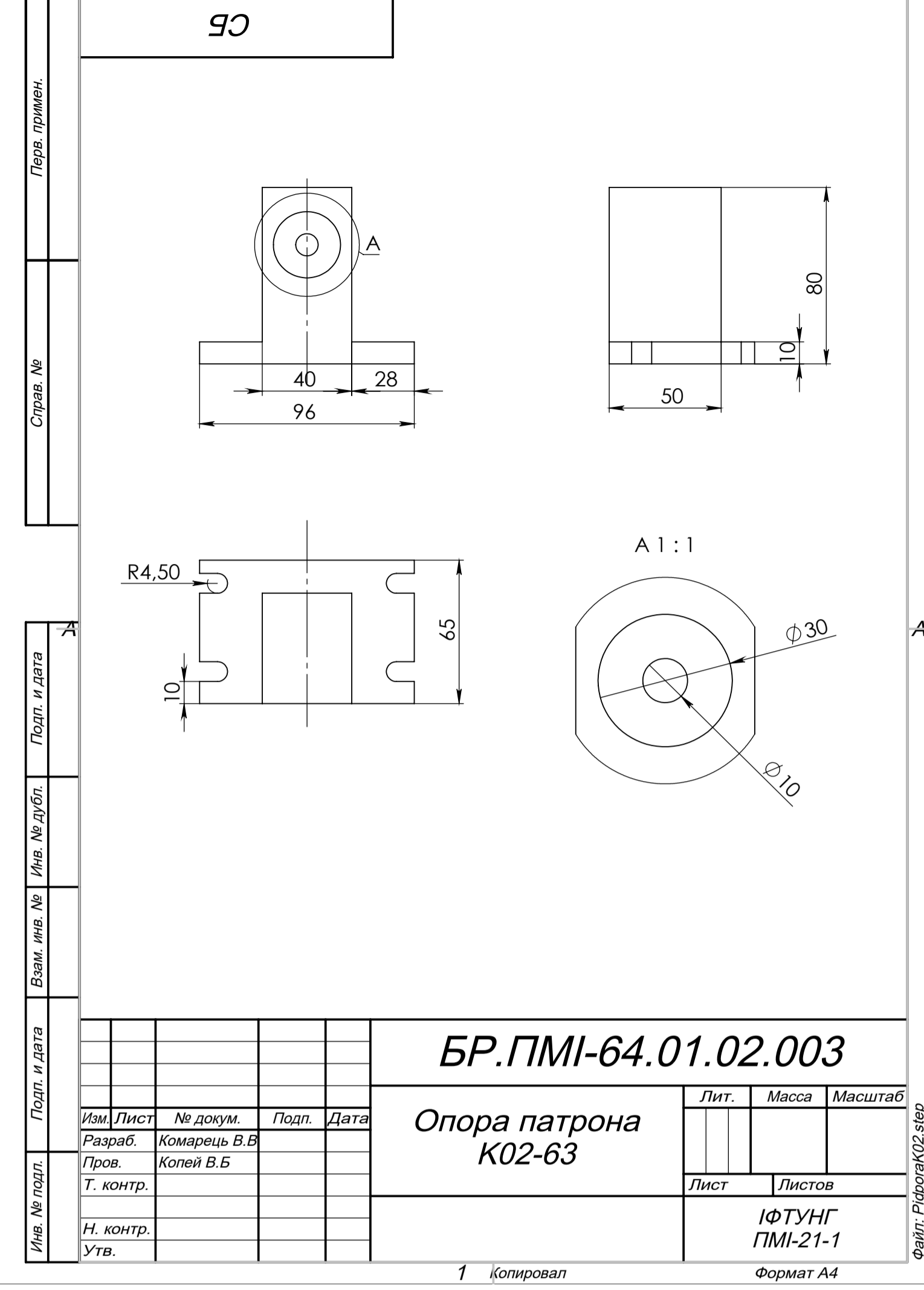
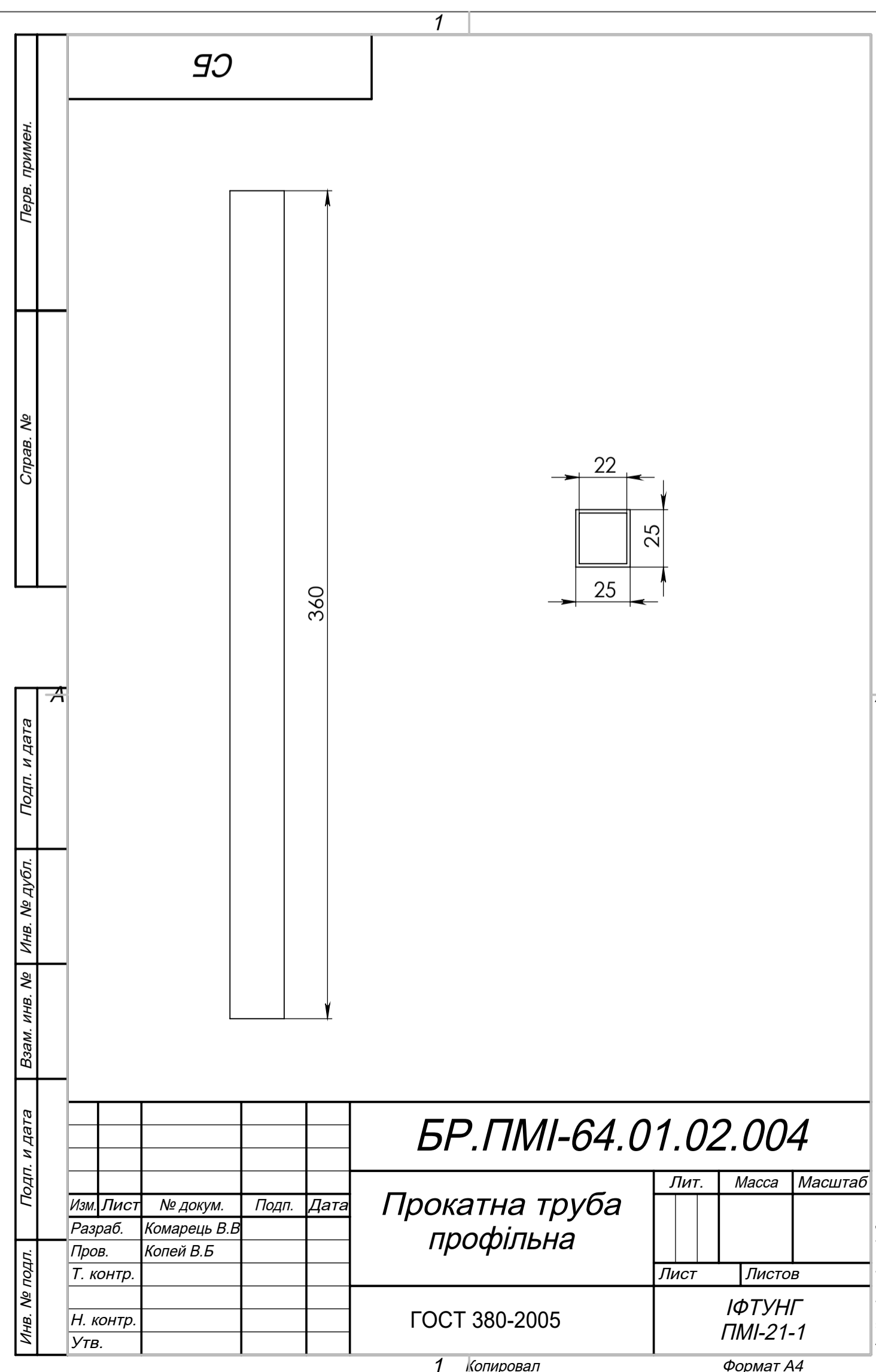
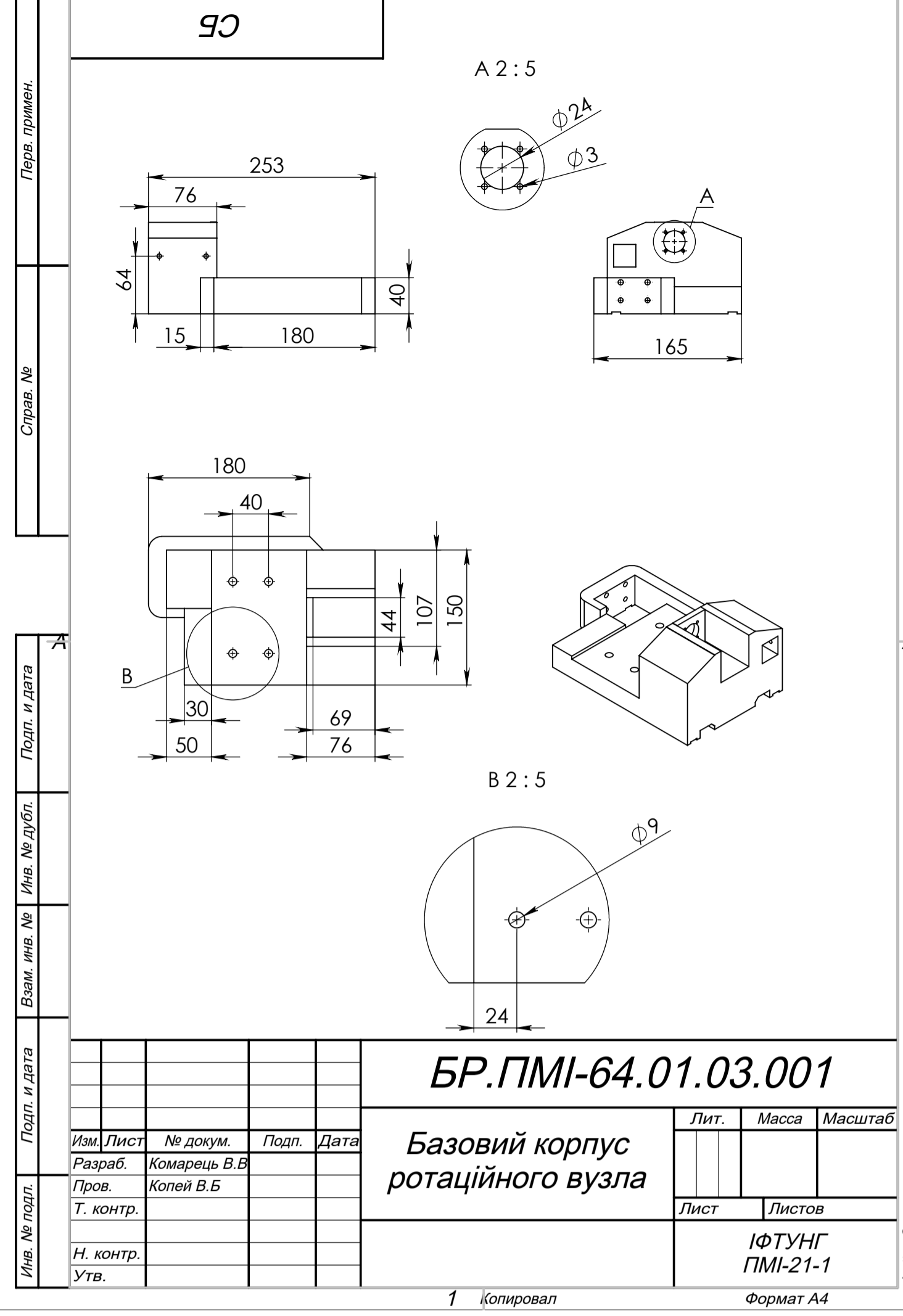
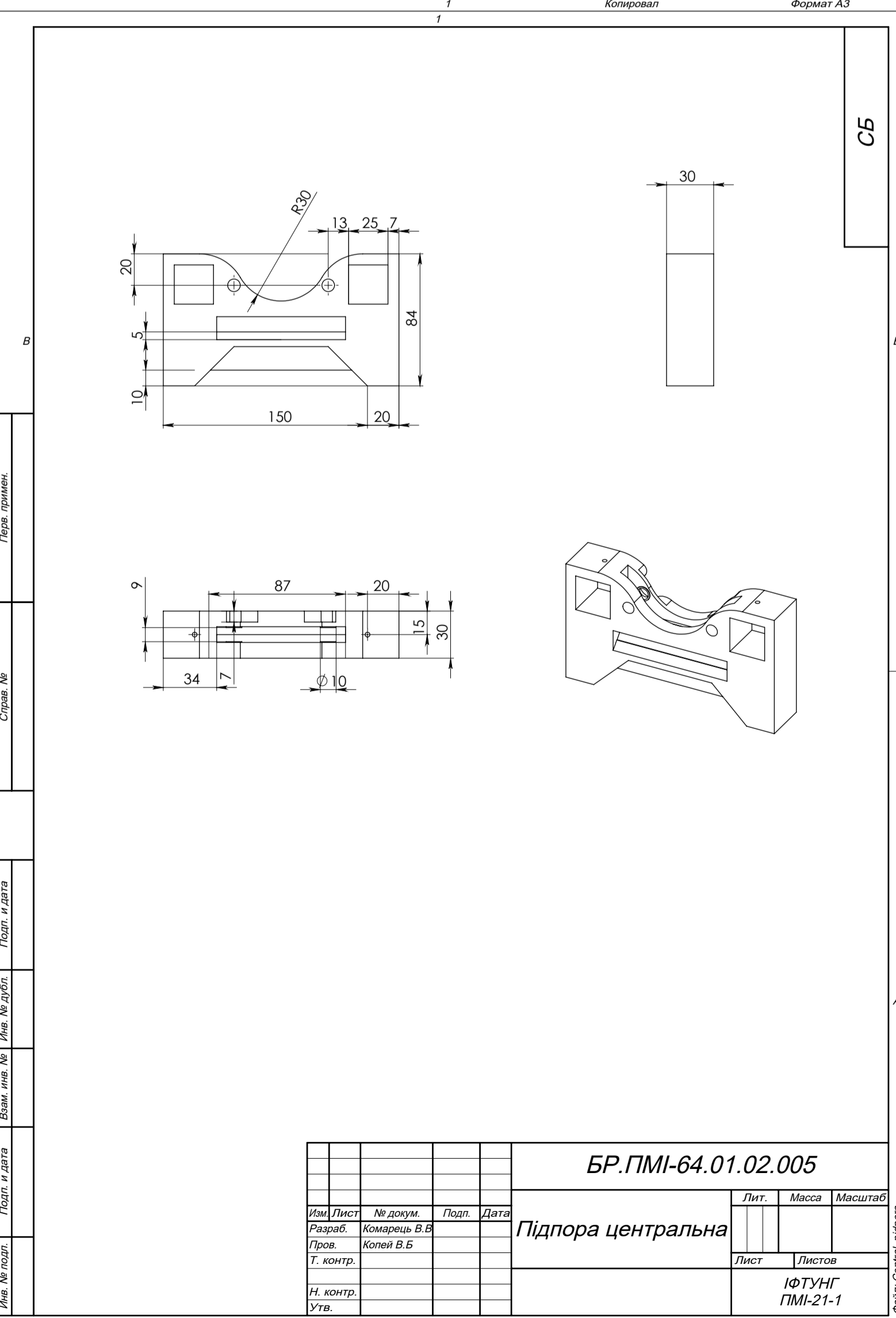
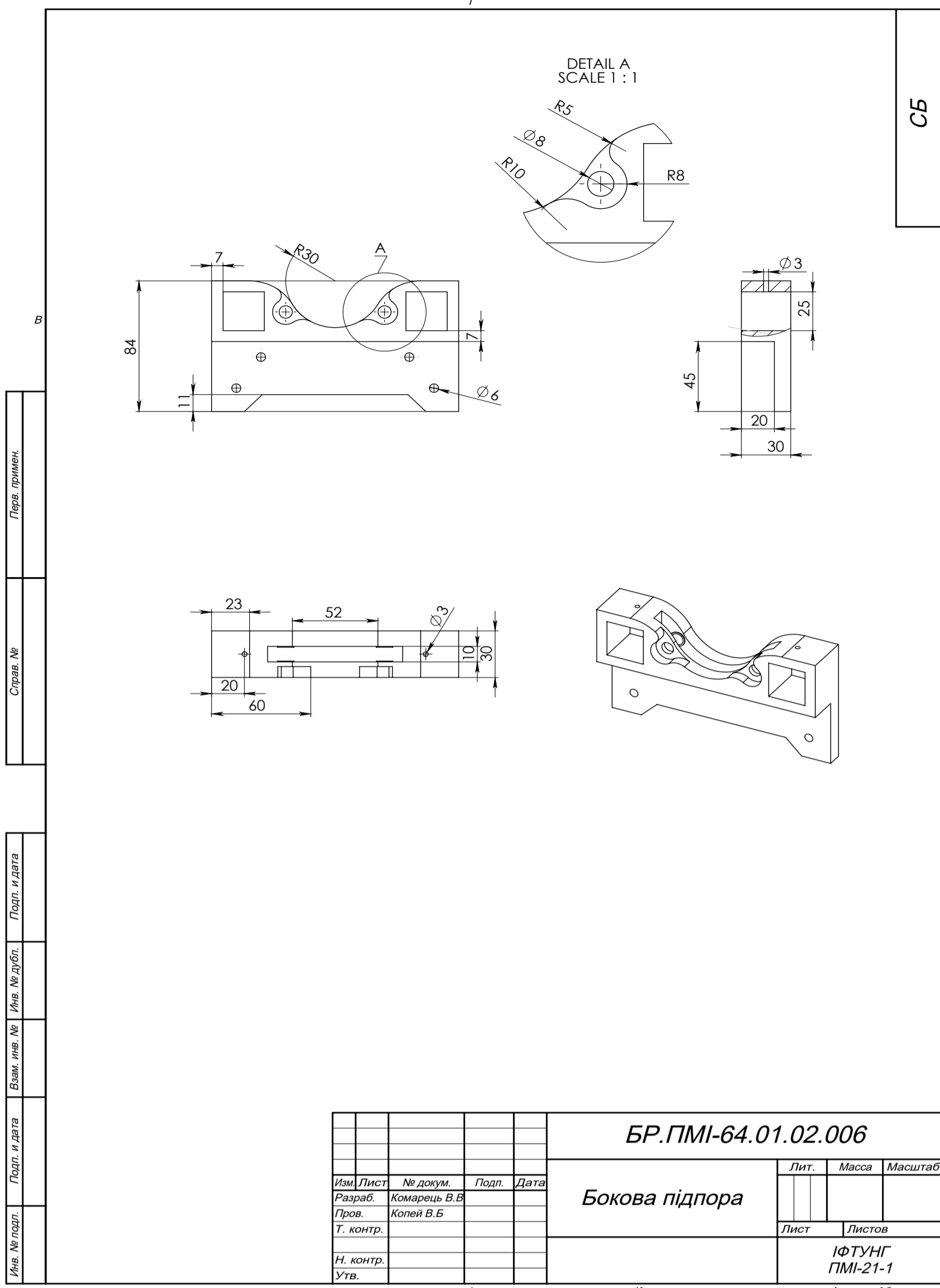


Рис 2 Планетарний редуктор 5:1 для Nema 17

Передавальне число: 5:1
 Сумісність двигуна: Nema 17 (42x42 мм)
 Тип з'єднання: вал–муфта або фланцеве кріплення
 Діаметр вихідного вала: 8 мм (часто з шпонкою або пласким зрізом)
 Довжина вихідного вала: 20–25 мм
 Момент що передається (номінальний): ~10–20 Н·см (залежить від конкретної моделі)
 Максимальний момент: до 30–40 Н·см
 Точність позиціонування: <1° люфту (типowo ~0.3°)
 Матеріал корпусу: алюмінієвий сплав або сталь
 Рівень шуму: <60 дБ
 Маса: ~150–250 г
 ККД: ~90–95%

				БР.ПМІ-64.01.02.004		
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		
Разраб.	Комарець В.В.					
Пров.	Копей В.Б.					
Т. контр.						
Н. контр.						
Утв.						
					Елементи автоматизації	
					Лит.	Масштаб
					Лист	Листов
					ІФТУНГ ПМІ-21-1	
					Формат А1	



Форм. Зона Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Заміт-ки
Документація				
A4	БР.ПМІ-61.00.00.000	Пояснювальна записка	1	
A1	БР.ПМІ-61.01.01.000СК	Механізм ротаційної осі	1	
A1	БР.ПМІ-64.01.02.001СК	Опорні вузли	1	
Деталі				
A4	1 БР.ПМІ-64.01.01.001	Підпора центральна	1	
A4	2 БР.ПМІ-64.01.01.002	Базовий корпус	1	
A4	3 БР.ПМІ-64.01.01.003	Опора патрона K02-63	1	
A4	4 БР.ПМІ-64.01.01.004	Прокатна труба профільна	2	
A4	5 БР.ПМІ-64.01.01.005	Бокова підпора	2	
Стандартні виробы				
4		Мета 17 з планетарним редуктором 5:1	1	
13		Підшипник 5972KS01	6	
14		Гвинт М3x12 ДСТУ ISO 4762:2006	4	
15		Гвинт М8x20	8	
16		Гвинт М8x15	4	
17		Гвинт М3x25	4	

Форм. Зона Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Заміт-ки
	18	Гайка шестигранна ISO 4032 - M8	6	
	19	Гайка ISO 4035 - M2.5 - N	4	
	20	Гайка ISO 4035 - M4 - N	6	
	21	Гайка ISO 4035 - M8 - N	8	
	22	Муфта D25L30	1	
	23	Патрон K02-63	1	

Форм. Зона Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Заміт-ки
БР.ПМІ-61.01.01.000				
Лист				
2				

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Комарець В.В.			
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб

БР.ПМІ-64.01.02.006

Бокова підпора

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А3

1 Копіровал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Комарець В.В.			
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб

БР.ПМІ-64.01.03.001

Базовий корпус ротаційного вузла

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А4

1 Копіровал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Комарець В.В.			
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб

БР.ПМІ-64.01.02.003

Опора патрона K02-63

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А4

1 Копіровал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Комарець В.В.			
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб

БР.ПМІ-64.01.02.005

Підпора центральна

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А3

1 Копіровал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Масса	Масштаб

БР.ПМІ-64.01.02.004

Прокатна труба профільна

ГОСТ 380-2005

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А4

1 Копіровал

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Комарець В.В.			
Пров.	Копей В.Б.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Утв.				

Лит.	Лист	Листов
		1

БР.ПМІ-64.01.01.000

ІФТУНГ ПМІ-21-1

Формат А4