

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ Олег ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

“ ” _____ 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»
спеціальності 131 Прикладна механіка**

на тему: Стенд для тестування взаємодії гетерогенних промислових систем

Виконав: студент 4 курсу, групи МА-22

Довженко Роман Андрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник к.т.н.,доц. Зілінський А. І. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці _____ к.т.н.,доц. Зілінський А. І. _____
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

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

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

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 рік

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олег ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Довженку Роману Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проєкту: ”Стенд для тестування взаємодії гетерогенних промислових систем”

керівник проєкту: Зілінський Андрій Іванович к.т.н., доц
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом проєкту: 08.06.2026;

3. Вихідні дані до проєкту: номінальна маса 1 кг, хід штока 0,1 м, час висування штока 0,4 с.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Тенденції промислової автоматизації та аналіз існуючих рішень. Розділ 2. Розрахунково-конструкторське проєктування. Розділ 3. Технологія виготовлення кронштейна. Розділ 4. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу: пояснювальна записка, схема пневматична принципова + схема електрична принципова, складальне креслення стенда,

специфікація, креслення деталей: кронштейн оптичного датчика, плита кріпильна, бункер, кронштейн пневмоциліндра задній, габаритне креслення стенда, загальний вигляд стенда

6. Консультанти розділів проєкту

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

7. Дата видачі завдання – 06.03.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Отримання завдання	Березень 2026	Виконав
2	Аналіз існуючих систем та складових	Березень 2026	Виконав
3	Складання принципової пневматичної схеми	Квітень 2026	Виконав
4	Складання принципової електричної схеми	Квітень 2026	Виконав
5	Проведення пневматичних розрахунків	Травень 2026	Виконав
6	Підбір обладнання	Травень 2026	Виконав
7	Виконання технологічного розділу	Травень 2026	Виконав
8	Виконання розділу охорони праці	Червень 2026	Виконав

Студент

(підпис)

Роман ДОВЖЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

Андрій ЗІЛІНСЬКИЙ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Стенд для тестування взаємодії гетерогенних промислових систем

Київ – 2026 рік

АНОТАЦІЯ

Темою дипломного проєкту є створення навчального стенда, який дасть змогу вивчати процеси промислової автоматизації та взаємодії між різними типами контролерів. Допоможе дослідити гетерогенні промислові системи. Він дозволить зрозуміти, як оптимально побудувати реальну систему, яка працюватиме на базі трьох контролерів, що відповідають за різні функції, але працюють в одній системі.

У першому розділі наведено коротку історію розвитку та автоматизації промисловості. Проведено огляд актуальних технологій які використовуються в сучасній промисловості: розглянуто найпопулярніші типи контролерів, на основі яких будуються сучасні автоматизовані системи, детально розглянуто особливості використання мікроконтролерів та програмованих логічних контролерів, а також способи їх програмування.

Другий розділ містить у собі основні технічні деталі, які стосуються цього проєкту. В ньому наведені необхідні розрахунки, а також підбір усіх компонентів, необхідних для побудови стенда. Також в ньому проведена побудова пневматичної схеми та розроблена схема підключення всіх компонентів.

Третій розділ присвячений технології виготовлення кронштейна. Він містить підбір матеріалу та форми заготовки, а також повний поетапний опис процесу виготовлення з усіма технологічними етапами, включаючи підбір верстата, усієї необхідної оснастки та різального інструменту щоб забезпечити максимальну швидкість та точність виготовлення.

Останній розділ відведено під охорону праці. Він потрібен для забезпечення оптимальних умов роботи зі стендом та зберегти здоров'я користувачів. Також у ньому передбачені усі можливі небезпеки та нюанси, які можуть виникнути у процесі роботи.

Ключові слова: автоматизація, гетерогенні системи, промисловість, навчальний стенд, контролери.

ANNOTATION

The topic of this thesis project is the creation of a training bench that will enable the study of industrial automation processes and the interaction between different types of controllers. It will allow for the investigation of heterogeneous industrial systems. It will help understand how to optimally design a real-world system based on three controllers responsible for different functions but operating synchronously.

The first chapter provides a brief history of industrial development and automation. It reviews current technologies used in modern industry: the most popular types of controllers on which modern automated systems are based are examined; the specifics of using microcontrollers and programmable logic controllers, as well as methods for programming them, are discussed in detail.

The second chapter contains the main technical details related to this project. It includes the necessary calculations, as well as the selection of all components required to build the test bench. It also includes the design of the pneumatic diagram and the connection diagram for all components.

The third section is devoted to the manufacturing process for the bracket. It covers the selection of materials and blank shapes, as well as a complete step-by-step description of the manufacturing process, including all production stages, such as the selection of machinery, all necessary fixtures, and cutting tools to ensure maximum speed and precision in manufacturing.

The final section is devoted to occupational safety. It is necessary to ensure optimal working conditions with the stand and to protect the health of users. It also covers all possible hazards and nuances that may arise during the work process.

Keywords: automation, heterogeneous systems, industry, training bench, controllers.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
Мета й постановка задачі	10
1. ТЕНДЕНЦІЇ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	11
1.1 Сучасна автоматизація виробництва: особливості, технології та системи управління.....	13
1.2.1 Програмовані логічні контролери	18
1.2.2 Мікроконтролери.....	19
1.2.3 Застосування	20
1.3 Програмування та піраміда автоматизації	21
Висновок до розділу 1	26
2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКЕ ПРОЄКТУВАННЯ.....	28
2.1 Логіка роботи системи	28
2.2 Статичний розрахунок пневмоприводу	30
2.3 Динамічний розрахунок пневмоприводу двосторонньої дії.....	32
2.4 Підбір пневматичного обладнання	35
2.5 Розрахунок гільзи пневмоциліндра на міцність	39
2.6 Підбір електрообладнання.....	41
Висновок до розділу 2.....	47
3 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КРОНШТЕЙНА	48
3.1 Завдання на розробку технологічного процесу.....	48
3.2 Вибір заготовки	49
3.3 Розробка маршрутного технологічного процесу	50
3.4 Вибір різального інструменту. Розрахунок режимів різання	57
3.5 Оснащення операцій	61
Висновок до розділу 2.....	63
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	64
4.1 Мікроклімат	65

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Стенд для тестування взаємодії гетерогенних промислових систем	Літ.	Арк.	Акрушів		
Розроб.		Довженко Р. А.								
Перевір.		Зілінський А. І.					7	76		
						НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»				
Н. Контр.										
Затверд.										

4.2 Виробниче освітлення.....	66
4.3 Виробничий шум.....	67
4.4 Ураження електричним струмом.....	67
4.5 Пожежонебезпека.....	68
Висновки до розділу 4.....	69
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	70
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	72

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Світ постійно розвивається. Попит від споживачів збільшується, а промисловість виходить на новий рівень. Створюють нових роботів, автоматизовані лінії та шляхи для оптимізації виробництва. Трансформація та глобалізація сучасного ринку створює нові вимоги до промислових підприємств, змушуючи оперативно реагувати на зміни. Серед ключових чинників, що визначають ефективність сучасних виробництв, можна виділити такі:

Виробнича гнучкість – можливість швидко перебудовувати та перелаштовувати технологічні лінії в залежності від об'ємів виробництва та типу продукції, яка виготовляється.

Екологічна стійкість – введення концепції раціонального енергоспоживання, акцент на мінімізації відходів виробництва а також максимальне зменшення викидів та карбонового сліду. Значна частина зусиль та фінансів іде на зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище.

Комплексна автоматизація та цифровізація – гостра потреба інтеграції інтелектуальних систем та роботизованих комплексів для підвищення продуктивності праці, зменшення кількості браку та економії людських ресурсів.

Для підтримання такого стрімкого розвитку категорично необхідні нові спеціалісти, які матимуть відповідні знання та навички. Саме підготовка таких спеціалістів є однією з головних цілей сучасних університетів та інших навчальних закладів. Хороші викладачі та сучасна теоретична база стають надійним фундаментом для навчання, але ще важливішу роль відіграє практика та відточування навичок на справжніх приладах та системах. Щоб забезпечити таку можливість потрібно поповнювати арсенал університетів сучасним та актуальним обладнанням.

Підчас дипломного проектування було використано генеративні моделі штучного інтелекту Google Gemini та NotebookLM виключно як допоміжні інструменти для пошуку інформації та джерел, а також планування роботи, перекладення зарубіжних джерел і перевірки тексту на помилки.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета й постановка задачі

Метою моєї бакалаврської роботи є розробка навчального стенду для тестування та дослідження взаємодії гетерогенних промислових систем.

Базою стенда слугуватиме колаборативний робот-маніпулятор Franka Emika Panda, який безпосередньо взаємодіатиме з об'єктами. За переміщення деталей будуть відповідати конвеєрні стрічки, та пневмоциліндри, керовані промисловим контролером (ПЛК) Siemens. Також ПЛК проводитиме обробку сигналів з датчиків: магнітні датчики на пневмоциліндрах, оптичні датчики для контролю положення деталей, та датчик кольору. Вимірювання ваги, а точніше зчитування даних тензодатчика здійснюватиметься за допомогою мікроконтролера Arduino.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний ринок та тенденції розвитку промисловості для отримання повної картини можливостей сучасної автоматизації.
2. Скласти структурну схему та описати логіку роботи.
3. Провести підбір обладнання та компонентів, які стануть складовими стенда. Провести розрахунок пневматики.
4. Розробити всі необхідні пневматичні та електричні схеми підключення обладнання. Зробити 3Д візуалізацію.
5. Побудувати та розрахувати технологічний процес виготовлення кронштейнів для кріплення датчиків.
6. Провести аналіз проблем та потенційних небезпек, які можуть виникнути в процесі експлуатації обладнання. Розробити рекомендації для тих хто буде взаємодіяти зі стендом для захисту їх здоров'я.

Робота з розробленим стендом дозволить набути практичних навичок програмування ПЛК Siemens, мікроконтролерів Arduino та робота-маніпулятора Franka Emika Panda, а також дослідити логіку побудови алгоритмів керування для комбінованих роботизованих систем.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1. ТЕНДЕНЦІЇ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Промисловість розвивається протягом усієї історії людства. Людина – це істота, яка за своєю природою намагається створити для себе комфортні умови для існування. Для цього необхідно виготовляти речі, які зможуть забезпечити зручність та простоту побуту.

У зв'язку з розвитком суспільства, попит та вимоги до готового продукту зростали. Виходячи з цього, виробничі процеси постійно намагаються зробити більш точними, для отримання продукту вищої якості та оптимізувати, щоб економити час та людські ресурси.

Все почалося з примітивних кам'яних знарядь та ручної праці. З часом складність виробів підвищувалась, розвинулась металургія, з'явилися складніші інструменти, та перші верстати. Але джерела енергії були все ще примітивними: водяні колеса, сила тварин та людей. Протягом тривалого періоду розвитку промисловості, ми перейшли до механізації та використання парових двигунів. Працівники заводів почали керувати машинами, які значно пришвидшили та спростили виробничі процеси. Так відбулась «Перша промислова революція». [1,2]

Друга промислова революція зумовлена розвитком транспорту з паровими двигунами, винайденням двигуна внутрішнього згорання та початком використання електроенергії. Це значно пришвидшило технологічний прогрес.

Наступним кроком стала третя промислова революція (1970-ті роки). Промисловість почала набувати сучасного вигляду: почалась масова автоматизація з використанням електроніки, комп'ютерів та інших цифрових технологій. На цьому етапі на заводах почали активно інтегрувати верстати з ЧПК, системи на основі контролерів (ПЛК) та роботизовані маніпулятори.[3]

Зараз індустрія переходить на наступний етап своєї еволюції (Індустрія 4.0). Її суть полягає у глибокій інтеграції інтелектуальних систем у виробничі процеси.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Межі між фізичною та цифровою сферами починають стиратись через злиття автоматизованого виробництва, передових технологій, обміну даними та штучного інтелекту в єдину самокеровану систему. [4]

Реалізація Індустрії 4.0 базується на таких принципах:

- Взаємодія: здатність пристроїв, машин та систем спілкуватися між собою.
- Віртуалізація: створення цифрових копій фізичних об'єктів для моніторингу в режимі реального часу.
- Режим реального часу: миттєвий збір та аналіз даних для швидкого реагування.
- Орієнтація на послуги: пропозиція продукції через інтернет-послуги та її адаптація під клієнта.
- Модульність: гнучке налаштування ліній шляхом заміни чи додавання окремих модулів без зупинки всього виробництва.

Для оптимізації та спрощення виробничого процесу запроваджують нові тенденції, які роблять системи надійнішими, швидшими, мінімізують втручання людей та вплив людського фактору:

- промисловий інтернет речей та Кіберфізичні системи: вони є основою комунікації для сучасного виробництва. Забезпечують безперервний обмін інформацією між фізичним об'єктом та його цифровим відображенням за допомогою сенсорів та актуаторів. Дозволяють машинам спілкуватися, що забезпечує моніторинг операцій та управління процесами у реальному часі;[5]
- штучний інтелект та машинне навчання: алгоритми ШІ дозволяють передбачати поломки обладнання до їх виникнення та уникати дорогих простоїв. Також вони застосовуються для контролю якості через системи комп'ютерного зору, які виявляють дефекти прямо на лінії;[6]
- цифрові двійники: це віртуальні копії фізичних об'єктів або цілих виробничих процесів, які синхронізовані з оригіналом. Вони дозволяють інженерам

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

проводити віртуальні випробування, знаходити недосконалості та оптимізувати роботу без ризику для реального обладнання;[7]

- передова робототехніка: на зміну традиційним роботам приходять автономні системи та колаборативні роботи. Вони оснащені сенсорами та машинним зором, що дозволяє їм безпечно працювати поряд з людьми, перебираючи на себе небезпечні або рутинні завдання;
- адитивне виробництво (3D-друк): Технологія дозволяє швидко створювати складні деталі та прототипи, мінімізуючи відходи та скорочуючи час розробки. Вона набула дуже великої популярності, оскільки за останні роки стала значно доступнішою. Дуже великою перевагою є можливість втілити модель, зроблену на комп'ютері, в реальність з мінімальними витратами часу та грошей. Технологія широко застосовується в побуті, комерційних цілях та навіть у конструкторських бюро для швидкого виготовлення прототипів чи навіть готових деталей. Основними типами 3D друку є FDM (пошарове наплавлення матеріалу) – найшвидший та найдешевший варіант, але має нижчу точність; SLA (друк з рідкої сировини) – забезпечує дуже високу точність, але має нижчу швидкість та високу ціну; SLS та SLM (лазерне спікання порошків) – найбільша вартість, але забезпечує однорідну поверхню, високу точність та міцність, що дозволяє друкувати складні відповідальні деталі з різноманітних матеріалів, в тому числі металів. [8]

1.1 Сучасна автоматизація виробництва: особливості, технології та системи управління

1.1.1 Еволюція процесів складання та виклики сучасного ринку

Складання - це фінальний і часто найвідповідальніший етап виробництва, який полягає у з'єднанні окремих деталей або вузлів для утворення готового продукту. Цей процес охоплює як основні технологічні функції (наприклад, запресовування, зварювання, склеювання), так і допоміжні операції (транспортування, точне позиціонування, контроль якості та спеціальні операції, такі як маркування чи очищення).

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Історичні підходи до організації виробництва зазнали кардинальних змін. Якщо у 1913 році масове виробництво на прикладі компанії Ford базувалася на випуску моделі «Model T» виключно в чорному кольорі задля максимального прискорення процесів, то сьогодні з'явилися зовсім інші правила. Сучасним трендом є глибока індивідуалізація, коли виробники адаптують продукти під унікальні потреби кожного клієнта. Наприклад, сучасні автомобілі можуть мати мільйони або навіть мільярди теоретичних варіантів комплектацій. Підприємствам необхідно постійно балансувати між впровадженням нових технологічних можливостей, виконанням жорстких бізнес-вимог (ергономіка, організація праці) і забезпеченням високих стандартів якості на надзвичайно динамічному ринку. [9,10]

1.1.2 Баланс між ручним та автоматизованим виробництвом

Під час проєктування виробничих систем кожне підприємство стикається з вибором оптимального рівня автоматизації. Ручне складання залишається актуальним завдяки своїй безпрецедентній адаптивності та порівняно низьким початковим інвестиціям. Воно є економічно доцільним для створення прототипів, дрібносерійного випуску або спеціалізованих виробів. Проте ручна праця має суттєві недоліки: високі поточні витрати на оплату праці, ризик впливу людського фактору, мінливість якості готової продукції та значне фізичне навантаження на працівників.

З іншого боку, автоматизоване складання із застосуванням машин та промислових роботів забезпечує високу ефективність, швидкодію та стабільну повторюваність результатів. Воно дозволяє налагодити безперервне цілодобове виробництво та суттєво знизити собівартість одиниці продукції при великих обсягах випуску. Головними бар'єрами для повної автоматизації залишаються значні початкові капіталовкладення в обладнання, складність технічного обслуговування та низька гнучкість системи у разі різкої зміни продукції. [9,10]

1.1.3 Перехід від жорсткої до гнучкої автоматизації

Традиційно автоматизація мала фіксований характер. Такі системи, як безперервні роторні складальні лінії, здатні працювати з надзвичайною швидкістю,

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

проте вони апаратно налаштовані на виконання лише однієї конкретної операції. Оскільки життєвий цикл товарів на сучасному ринку стрімко скорочується, використання таких вузькоспеціалізованих машин стає фінансово не вигідним через їх швидке моральне старіння.

Відповіддю на цей виклик стала концепція «гнучкої» автоматизації. Вона базується на створенні модульних складальних комірок, які можна швидко переоснастити або модернізувати відповідно до нових виробничих завдань. У центрі таких систем знаходяться багатоцільові промислові роботи, здатні виконувати широкий спектр операцій зміною керуючої програми або робочого інструмента. [9,10]

1.1.4 Промислові роботи як фундамент сучасних виробництв

Промислові маніпулятори є основним виконавчим інструментом гнучкої автоматизації. Залежно від кінематичної структури, що визначає їхнє технологічне призначення, роботи поділяються на такі типи:

- Роботи з шарнірною рукою (антропоморфні) (Рис.1.1): за кінематикою нагадують руку людини, мають високу кількість осей вільності та є найбільш універсальними для складних просторових маніпуляцій. [14]



Рис. 1.1. Антропоморфний робот [11]

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

- Дельта-роботи (Рис. 1.2): системи паралельної кінематики з кількома важелями. Відзначаються надвисокою швидкістю і використовуються переважно для операцій сортування та пакування дрібних деталей. [14]



Рис. 1.2. Дельта-робот [12]

- SCARA-роботи (Рис. 1.3): оптимізовані для швидких і високоточних переміщень у горизонтальній площині, що робить їх стандартом у мікроелектроніці. [14]



Рис. 1.3. Скара робот [13]

- Лінійні (декартові) роботи (Рис. 1.4): здійснюють рух по прямих напрямних, забезпечуючи високу точність позиціонування на великих робочих площах. [14]

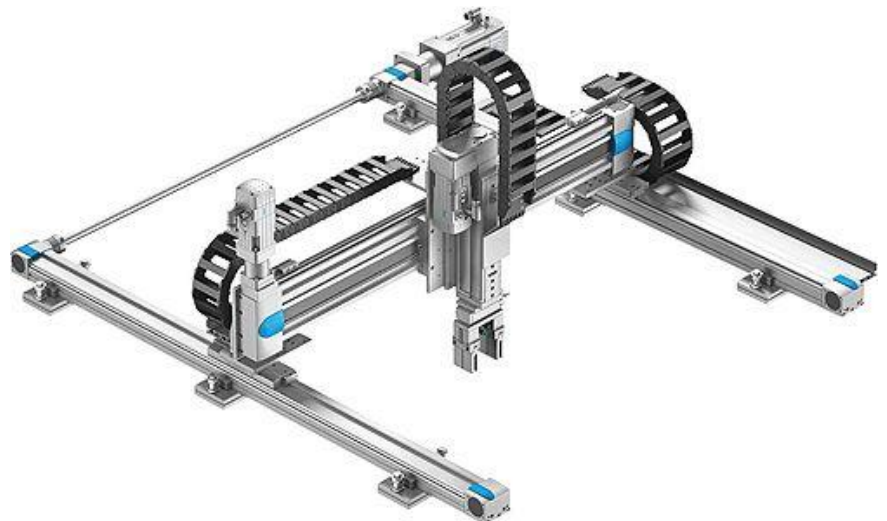


Рис. 1.4. Декартовий робот [14]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.МА2202.00.000 ПЗ

Арк.

16

- Колаборативні роботи (коботи) (Рис.1.5): інноваційний клас маніпуляторів, яскравим представником якого є Franka Emika Panda. Вони розроблені для безпечної фізичної взаємодії в одному просторі з людиною без використання захисних огорож, що досягається завдяки надчутливим датчикам контролю зусиль у кожному суглобі. [14]



Рис. 1.5. Кобот [15]

1.1.5 Програмовані логічні контролери (ПЛК) як ядро автоматизації

Якщо роботи виконують функцію виконавчих механізмів автоматизації, то її центральним обчислювальним ядром є програмовані логічні контролери (ПЛК). Це спеціалізовані цифрові електронні системи, розроблені для керування промисловими машинами та процесами. У минулому алгоритми роботи обладнання формувалися шляхом складного фізичного з'єднання реле та кабелів (жорстка релейна логіка), що робило будь-які модифікації надзвичайно трудомісткими. ПЛК дозволили замінити апаратні зв'язки програмним кодом.

ПЛК (наприклад, промислові контролери серії Siemens SIMATIC) циклічно опитують датчики, обробляють отримані масиви інформації за допомогою логічних операцій та видають команди на виконавчі пристрої. [16]

1.2 ПЛК та мікроконтролери: сфера застосування, переваги та недоліки

ПЛК та мікроконтролери – це основа сучасних автоматизованих промислових систем. Вибір системи керування є одним з основних аспектів під час проектування нової виробничої лінії, оскільки від цього залежить надійність, точність, а в першу чергу – вартість обладнання. Обидві технології дозволяють

створювати складні автоматизовані пристрої, але логіка їх роботи та особливості використання абсолютно різні з точки зору програмування, подальшого використання та реструктурування. [16]

1.2.1 Програмовані логічні контролери

ПЛК – це обчислювальний пристрій, що може керувати машинами, автоматизувати їх роботу, керувати виробничими процесами та цілими підприємствами. Це готовий модуль, побудований на базі мікроконтролера чи мікропроцесора, оснащений системою живлення, операційною системою, готовими захищеними модулями реального часу та мережевого зв'язку. На його основі можна побудувати готову функціонуючу систему.



Рис. 1.6 - ПЛК SIMATIC S7-1200 [17]

Найпопулярнішими на сьогоднішній день є

ПЛК компанії Siemens серій SIMATIC S7-1200 (для малих завдань) (Рис. 1.6) та S7-1500 (для складних систем), а також Schneider Electric.

Такі контролери мають ряд переваг:

- надійність: Вони спроектовані для безперебійної роботи в складних умовах, стійкі до температур, вібрацій, постійного навантаження та електромагнітних перешкод;
- стандартизація та простота налаштування: ПЛК використовують візуальні мови програмування (наприклад Ladder Logic або FBD), що дозволяє технічному персоналу розуміти логіку роботи, знаходити несправності та обслуговувати систему без вузькопрофільних спеціалістів;
- редагування під час роботи: Більшість контролерів дозволяють корегувати роботу та вносити зміни в налаштування без повної зупинки виробничого процесу та перезавантаження;

- модульність та масштабованість: ПЛК часто мають модульне виконання, що дозволяє легко масштабувати систему шляхом додавання блоків вводу/виводу даних, мережевих модулів і т. п. Також це значно спрощує ремонт;

Попри всі вищеперераховані переваги, ПЛК не можуть стати ідеальним рішенням для абсолютно всіх задач промисловості. Їх широкий функціонал та гнучкість призводять до значно вищої вартості порівняно з мікроконтролерами. Використання програмованих логічних контролерів для побудови простих систем або вирішення нескладних задач буде економічно невиправданим, оскільки не розкриє закладений в них технологічний потенціал. [16]

1.2.2 Мікроконтролери

Мікроконтролер – це компактний чип, який включає в себе процесор, пам'ять та інтерфейси вводу/виводу розміщені на одному напівпровідниковому кристалі. Вони дозволяють розробляти та виконувати вбудовані програми та виконувати схожий з ПЛК набір функцій. Проте, їх використання має певні особливості та обмеження.

Плати на базі мікроконтролерів часто використовуються для вирішення нескладних задач та виготовлення саморобок (з використанням плати розширення можна навіть використовувати як материнську плату для станків з ЧПК) інженерами любителями. Найпопулярнішими варіантами, завдяки великій кількості цифрових та аналогових входів і виходів, а також низькому енергоспоживанню, стали плати Arduino Uno та

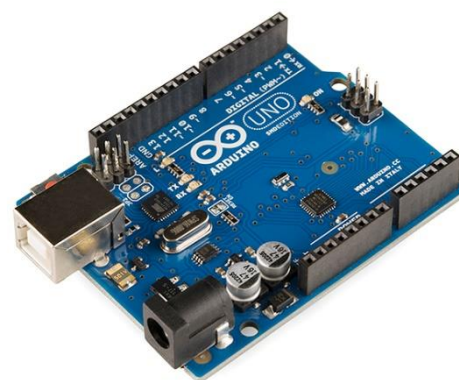


Рис 1.7 - Arduino Uno [19]

Arduino nano (Рис. 1.7) на базі чипа ATmega328P, а також їх дешеві копії. Вони дуже доступні та мають безліч зовнішніх модулів і датчиків, а також прості в програмуванні.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Також часто використовуються мікроконтролери ESP32 там де потрібне бездротове підключення Wi-Fi та Bluetooth. Для окремих, більш складних завдань, використовують вироби компанії Raspberry Pi Foundation.

До їх переваг можна віднести:

- значно нижча вартість у порівнянні з ПЛК (використання мікроконтролера може бути дешевшим у декілька разів);
- компактність та енергоефективність: Поєднання основних компонентів на одному чипі дозволяє створювати мініатюрні пристрої, які здатні працювати навіть від батарейок протягом тижнів ;
- гнучкість налаштувань: Для програмування використовуються мови високого та низького рівня (C++, Assembly), що дає розробнику змогу повністю контролювати функції програмного забезпечення.
- Проте мікроконтролери мають недоліки, які роблять їх використання як основи в проектуванні відповідальних та складних автоматизованих систем нераціональним:
- складність розробки: Для використання мікроконтролерів необхідно розробляти індивідуальну друковану плату з великою кількістю додаткових електронних компонентів, які будуть забезпечувати захист від перешкод, стабілізацію живлення та дозволятимуть працювати з периферійними пристроями;
- складність обслуговування: Для діагностики потрібен кваліфікований спеціаліст, а для оновлення прошивки потрібне перезавантаження системи;
- відсутність стандартизації: У разі поломки плати на базі мікроконтролера необхідно проводити ремонт самої плати або виготовляти таку ж на замовлення. [19,20,21]

1.2.3 Застосування

Вибір між ПЛК та Мікроконтролером найчастіше залежить від масштабу виробництва, умов у яких він буде експлуатуватись, вимог до надійності та необхідної адаптивності.

					<i>ДП.МА2202.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Мікроконтролери обирають тоді коли важлива компактність, низьке енергоспоживання та невисока вартість. Вони будуть хорошим вибором якщо запланований великий тираж виробництва. Це допоможе вирішити проблему з високою вартістю проектування та відсутністю стандартизації. Такі чипи стають основою вбудованих систем та цифрових побутових приладів чи навіть іграшок.

ПЛК є стандартом для управління процесами та автоматизації промисловості, де важливі надійність та простота модифікації. Їх використовують на автоматизованих виробництвах для керування роботами та конвеєрами, в енергетичній інфраструктурі для керування підстанціями та розподілення енергії, на пакувальних лініях та окремих верстатах. [22]

1.3 Програмування та піраміда автоматизації

Програмування промислових контролерів кардинально відрізняється від розробки класичного програмного забезпечення для персональних комп'ютерів чи хмарних систем. Головною особливістю ПЛК є забезпечення жорсткого реального часу, постійності виконання операцій та високої надійності. Програма ПЛК працює не в системі подій операційної системи, а в безперервному циклі, що керується внутрішнім процесором.

1.3.1 Циклічна модель виконання програм

В основі функціонування будь-якого ПЛК лежить циклічний принцип опитування, який складається з трьох послідовних етапів, що повторюються безперервно:

1. Читання входів: Процесор копіює поточний фізичний стан усіх цифрових та аналогових датчиків, підключених до входних модулів, у спеціальну область пам'яті - образ процесних входів. Протягом усього наступного циклу виконання програми ці значення залишаються незмінними, що виключає нестабільність логіки через зміну сигналів під час обчислень.
2. Виконання користувацької програми: Процесор послідовно, рядок за рядком або блок за блоком, виконує завантажений алгоритм керування.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

При цьому він використовує дані з образу входів та проміжних блоків пам'яті, розраховуючи нові стани для вихідних сигналів.

3. Оновлення виходів: Розраховані значення з образу процесних виходів фізично передаються на вихідні модулі контролера, які активують виконавчі механізми (катушки реле, контактори, клапани, інвертори конвеєрних приводів).

Тривалість одного такого циклу для сучасних контролерів становить від кількох мікросекунд до десятків мілісекунд. Перевищення критичного часу циклу відстежується апаратним сторожовим таймером, що призводить до аварійної зупинки контролера задля безпеки технологічного процесу. [23]

1.3.2 Програмування робототехніки: від пультів до цифрових двійників

Для виконання заданих функцій робототехнічні комплекси потребують програмування, яке реалізується за двома основними підходами: онлайн та офлайн.

Онлайн-програмування здійснюється безпосередньо на робочому місці за допомогою пульта керування. Оператор здійснює просторове «навчання» робота, підводячи його інструмент до цільових точок, або фізично переміщує ланки маніпулятора по заданій траєкторії з подальшим запам'ятовуванням. Цей метод є наочним, проте його критичним недоліком є необхідність зупинки виробничого процесу на час написання програми.

Офлайн-програмування виконується на віддаленому комп'ютері. Воно може реалізовуватись у вигляді написання коду спеціалізованими текстовими мовами (наприклад, RAPID для систем ABB або KRL для KUKA). Більш сучасним підходом є графічне симуляційне програмування (наприклад, у середовищі Visual Components). Воно дозволяє створити віртуальну копію комірки (цифровий двійник), відпрацювати алгоритм, перевірити його на наявність логічних помилок та механічних зіткнень, і лише після цього завантажити на реального робота без простою обладнання. Крім того, сучасні коботи (зокрема Franka Panda)

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

підтримують керування в режимі реального часу через інтерфейси C++, що дозволяє адаптувати траєкторію на льоту на основі даних із зовнішніх систем. [23]

Майбутнє галузі лежить у площині об'єктно-орієнтованого програмування завдань, де інженер завантажує 3D-моделі деталей та вказує кінцеву мету, а система самостійно розраховує оптимальну кінематичну траєкторію. Також активного розвитку набувають методи інтуїтивного програмування із застосуванням віртуальної реальності.

1.3.3 Програмування ПЛК

Для уніфікації розробки програмного забезпечення промислової автоматизації та забезпечення незалежності від конкретного виробника обладнання було впроваджено міжнародний стандарт ІЕС 61131-3 (в Україні адаптований як ДСТУ ІЕС 61131-3). Цей стандарт регламентує архітектуру ПЛК та визначає п'ять базових мов програмування, які поділяються на графічні та текстові:

- Список інструкцій (IL / AWL) - текстова мова низького рівня, що базується на синтаксисі асемблера.
- Релейно-контактні схеми (LD / KOP) - графічна мова, яка візуально імітує класичні креслення електричних релейних ланцюгів.
- Функціональні блокові діаграми (FBD / FBS) - графічне програмування за допомогою візуальних блоків логіки.
- Послідовні функціональні схеми (SFC / AS) - мова графоаналітичного типу, що ідеально підходить для опису покрокових станів процесу.
- Структурований текст (ST) - текстова мова високого рівня (подібна до Pascal чи C), орієнтована на реалізацію складних математичних алгоритмів.

Для розв'язання специфічних завдань виконавчого рівня (наприклад, високочастотної обробки аналогових сигналів із тензодатчиків чи оптичних RGB-датчиків кольору), ПЛК все частіше доповнюються мікроконтролерними платформами (наприклад, Arduino). Останні виконують роль підпорядкованих

					<i>ДП.МА2202.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

інтелектуальних вузлів, що здійснюють первинну фільтрацію сигналів і передають очищені цифрові дані на ПЛК. [22]

Програмування ПЛК Siemens

Програмування зазвичай здійснюється у середовищі STEP 7, яке є частиною платформи TIA Portal. Ця платформа забезпечує комплексний підхід до автоматизації та поєднує в одному інтерфейсі середовище для програмування ПЛК, розробки інтерфейсів, конфігурації промислових мереж та налаштування частотних перетворювачів.

Головною перевагою TIA Portal є використання єдиної бази даних. Це означає, що змінні, створені в програмі ПЛК, стають доступними для використання в інших точках системи, наприклад на панелі оператора. Завдяки цьому забезпечується високий рівень гнучкості та модульності програмного коду, що є критично важливим для створення адаптивних систем автоматизації зі складною логікою взаємодії.

Основними мовами програмування є LAD (проста та інтуїтивно зрозуміла графічна мова, що дозволяє легко створювати робочі програми та зручно відслідковувати їх покрокову роботу) та SCL (текстова мова, що використовується для роботи зі складними математичними обчисленнями та масивами даних). [23]

Програмування Arduino

Для програмування мікроконтролерів Arduino використовується фірмове середовище Arduino IDE. Воно дозволяє повною мірою використовувати функції плати та містить все необхідне для роботи. З цього допомогою можна зчитувати дані з чипа, писати та завантажувати програмний код, додавати необхідні бібліотеки для роботи із зовнішніми модулями та в режимі реального часу передавати та отримувати дані через комунікаційний порт.

Arduino програмується мовою C++ з використанням спеціального ядра. Вона дозволяє працювати як з низькорівневими операціями (пряме керування регістрами пам'яті, бітові зсуви), так і використовувати об'єктно-орієнтований підхід. Це дає змогу реалізовувати складні математичні алгоритми, які важко написати релейною логікою ПЛК[19]

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Програмування Franka Emika Panda

Колаборативний робот це складна технологічна система, яка розрахована на виконання задач різного рівня складності. Для забезпечення універсальності, програмування може відбуватись різними способами. Візуальне програмування, яке є досить інтуїтивним та відбувається через веб-інтерфейс під назвою Desk. Керуюча програма в ньому складається з окремих функціональних блоків, які відповідають за певні базові дії : захоплення об'єкта, його переміщення, відпускання тощо.

Одним з найпопулярніших є навчання шляхом ручної демонстрації. Можна вручну задавати роботу координати та просторові позиції, прив'язувати ключові точки та виконання на них певних дій. Оператор фізично направляє руку робота в потрібне місце та вказує дії, які потрібно виконати. Система запам'ятовує це та потім може відтворювати ці рухи автоматично або ж знайти оптимальні траєкторії для виконання тих самих дій.

Також є можливість низькорівневого програмування для тестування складних алгоритмів або машинного навчання. Є можливість підключати Robot Operating System та сторонні програми для симуляцій такі як Matlab та Simulink. [25]

Таблиця 1.3.1 порівняння програмних функцій

	Середовище програмування	Мова програмування	Переваги
Siemens	TIA Portal (STEP 7)	LAD; SCL	Гнучкість, інтуїтивність та універсальність
Arduino	Arduino IDE	C++	Багато можливостей
Franka Emika Panda	Desk; Franka Control Interface	Візуальне та фізичне програмування	Універсальність та варіативність

1.3.4 Комунікація та Піраміда Автоматизації

Сучасне виробниче підприємство функціонує як єдиний інформаційний простір, структуру якого класично описують моделлю «піраміди автоматизації»:

- Нижній рівень (рівень процесу та робочого поля): містить первинні датчики, мікроконтролери та виконавчі механізми, які взаємодіють з фізичним середовищем.
- Рівень управління: забезпечується промисловими контролерами (ПЛК), що виконують алгоритми реального часу.
- Рівень оперативного управління: включає системи диспетчеризації та збору даних (SCADA), а також системи управління виробничими процесами (MES).
- Верхній рівень: базується на системах планування ресурсів підприємства (ERP). [24]

Для забезпечення безперервного обміну даними між усіма компонентами піраміди використовуються промислові мережі. Традиційні виконавчі шини функціонують за жорстким принципом, де головний пристрій (ПЛК) ініціює комунікацію, надсилаючи запити підпорядкованим пристроям (датчикам, приводам), які лише відповідають на них. [25]

Сьогодні відбувається глобальний перехід від класичних промислових шин до протоколів на базі індустріальних мереж. Це дозволяє нівелювати межі між рівнями піраміди, легко об'єднуючи виконавче обладнання безпосередньо з керуючими системами компанії, забезпечуючи зв'язок від датчика до сервера та гарантуючи миттєвий обмін великими масивами даних для синхронізації роботи складних систем, що включають ПЛК, мікроконтролери та робототехніку.

Висновок до розділу 1

У цьому розділі проведено комплексний аналіз глобальних тенденцій розвитку сучасної промисловості та обґрунтовано безальтернативність переходу підприємств до концепції Індустрії 4.0 шляхом глибокої автоматизації робочих

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

процесів. Такий вектор еволюції виробництва є єдиним оптимальним шляхом для компаній, що прагнуть залишатися конкурентоспроможними на динамічному ринку, який вимагає високого рівня кастомізації продукції та мінімізації впливу людського фактора. В ході дослідження було детально розглянуто існуючі інженерні рішення та найпопулярніші апаратні платформи, зокрема здійснено порівняльний аналіз програмованих логічних контролерів (ПЛК) та мікроконтролерів, а також визначено класи сучасних промислових роботів і колаборативних маніпуляторів. Окрім опису їхніх конструктивних особливостей та специфічних сфер застосування, значну увагу приділено архітектурі їхньої інформаційної взаємодії в межах піраміди автоматизації та різноманітним підходам до програмування апаратного забезпечення.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКЕ ПРОЄКТУВАННЯ

Даний розділ дипломного проєкту створений для опису технічної частини, від якої залежить успішна реалізація проєкту зі створення лабораторного стенда. Він містить необхідні розрахунки для підбору та сам детальний підбір компонентів, які будуть використані в подальшому. Від характеристик окремих складових частин будуть залежати можливості всього готового проєкту. Правильно підібрані компоненти зможуть забезпечити та надійну роботу стенда та виконання всіх закладених у нього функцій протягом тривалого часу.

Всі подальші розрахунки будуть проводитись зі значним запасом, оскільки використання більш потужних компонентів забезпечить універсальність та збереже можливість модернізації стенда в майбутньому.

2.1 Логіка роботи системи

Така система є універсальною та підійде для сортування різних виробів чи заготовок у процесі виробництва. На рисунку (Рис. 2.1) показано послідовність пересування виробу по лінії сортування, а також блок-схема алгоритму (Рис. 2.2). Для прикладу розглянемо сортування пластикових корпусів для повербанків після лиття: для перевірки потрібно визначити їх масу, оскільки може виникати непролив і такі деталі стають непридатними для подальшого використання. Після запуску системи, ПЛК Siemens подає сигнал на котушку Y1. Циліндр Ц1 (2) висувається та виштовхує один корпус з бункера (А) й повертається назад. Він потрапляє на площадку (Б), де датчик (3) визначає його колір для підрахунку кількості виробів певного кольору. Після цього циліндр Ц2 (4) виштовхує корпус в зону захоплення (В) маніпулятором Franka Emika Panda (1). Коли оптичний датчик 1 (5) подає сигнал, що деталь у потрібному місці, ПЛК посилає сигнал про початок виконання першого циклу на контролер робота. Маніпулятор захоплює об'єкт та переставляє його на ваговий майданчик (Г). Дані з тензодатчика надходять на плату Arduino. Якщо маса вкладається у встановлені межі, то мікроконтролер подає дозволяючий сигнал на ПЛК. Він у свою чергу посилає сигнал роботу для виконання другого циклу. Маніпулятор захоплює виріб з вагового майданчика і переносить на конвеєр

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

(Д), який транспортує перевірений корпус на умовний склад. Конвеєр запускається тільки після спрацювання оптичного датчика 2 (9). Якщо ж деталь легша або важча ніж потрібно, вмикається повітряна форсунка Ф1 (7) та здуває бракований корпус з вагового майданчика на жолоб (Е) по якому він потрапляє в кошик для браку. Потім маніпулятор захоплює наступну деталь та переносить на ваговий майданчик. Потім цикл повторюється спочатку.

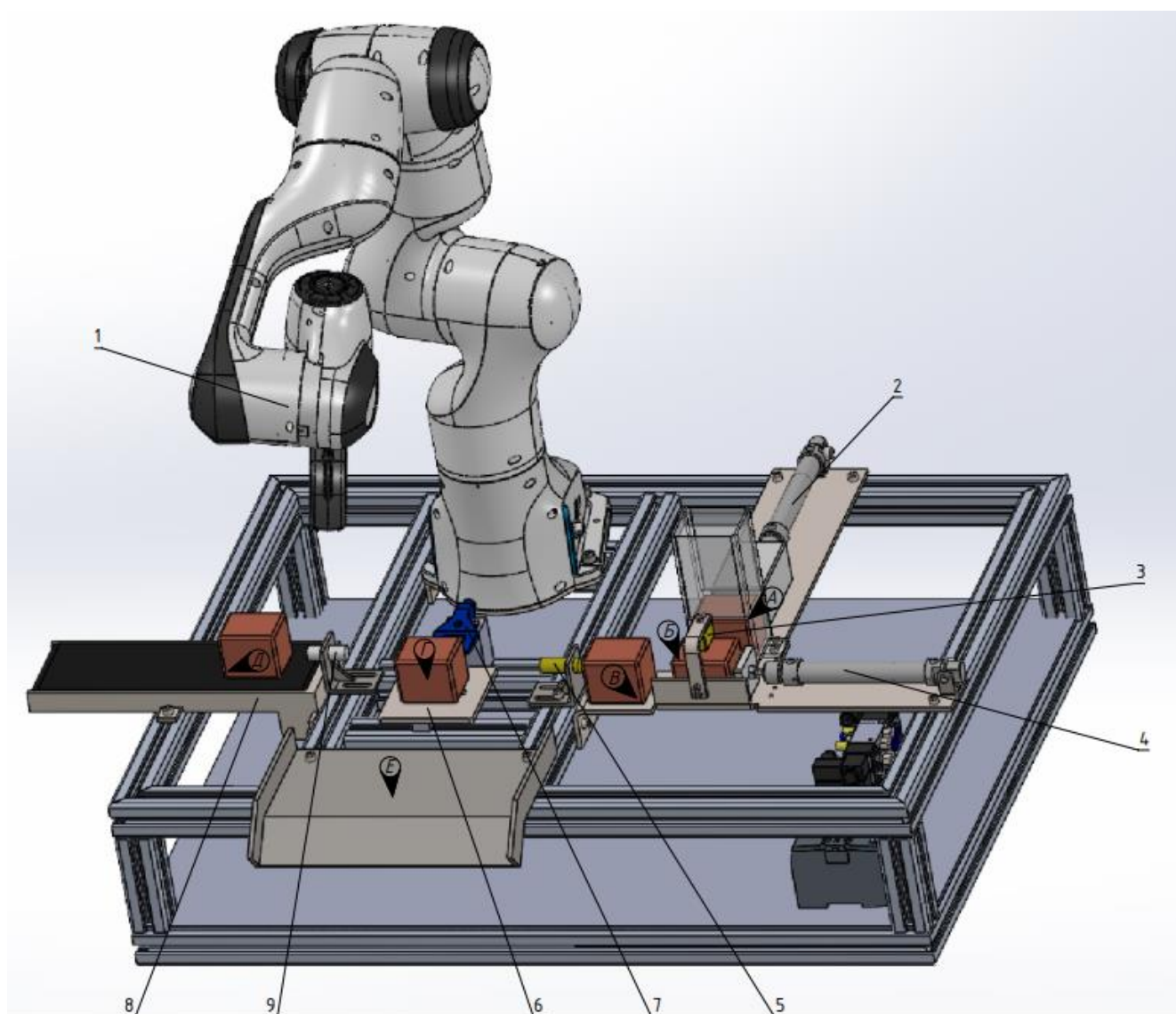


Рис. 2.1 Загальний вигляд стенда

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП.МА2202.00.000 ПЗ

Арк.

29



Підчас статичного розрахунку визначаються розміри елементів пневмоциліндра [13]: D , d , d_y – діаметр поршня, діаметр штока, діаметр приєднувальних отворів. Прийmemo робочий тиск у системі $p = 0,5$ МПа (5 бар); Коефіцієнт тертя ковзання (деталь по металу) $f = 0,15$.

Визначаємо для горизонтального переміщення:

2.2.2 Визначення розрахункового діаметра поршня (D)

Пневмоциліндр виступає в ролі транспортуючого приводу, а отже навантаження діє по всій довжині ходу.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot P_t \cdot (1 + k_T)}{\pi \cdot \chi_p \cdot p_M}},$$

де, $p_m = 0,5$ МПа (принятый тиск);

X_p – з табл. 2.1;

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

k_T – з табл. 2.2.

Табл.2.1. Значення параметрів навантаження χ_p [45]

p_m	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
χ_p	0,25...0,	0,3...0,6	0,35	0,4	0,45..0,88

Табл.2.2. Значення коефіцієнта k_T [45]

P	до 0,6	0,6...6,0	6...25	25...60
k_m	0,5...0,2	0,2...0,12	0,12...0,08	0,08..0,055

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,47 \cdot (1 + 0,5)}{3,1415 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 10^6}} = \sqrt{\frac{8,82}{785398}} \approx 0,0033 \text{ м (3,3 мм)}.$$

Оскільки отримане значення дуже мале, з міркувань підвищення міцності та жорсткості, прийmemo діаметр $D=20$ мм.

2.2.3 Визначення діаметру штока (d)

Діаметр штока визначається залежно від діаметра поршня:

$$d = (0,25 \dots 0,32) \cdot D = 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ мм}.$$

Прийmemo стандартний діаметр $d = 8$ мм.

2.2.4 Розрахунок умовного проходу (d_y)

Для забезпечення заданого очікуваного часу спрацювання $t_0 = 0,4$ с при ході $s = 0,1$ м та рекомендованій середній швидкості потоку у лінії підводу $w_c = 17$ м/с використаємо формулу :

$$d_y = \sqrt{\frac{D^2 \cdot s}{w_c \cdot t_0}} = \sqrt{\frac{0,02^2 \cdot 0,1}{17 \cdot 0,4}} = 0,0024 \text{ м (2,4 мм)}.$$

Отже, мінімальний необхідний діаметр проходу пневмоапаратури і трубопроводів $d_y = 2,5$ мм.

2.3 Динамічний розрахунок пневмоприводу двосторонньої дії

Динамічний розрахунок виконується з метою визначення часу підготовчого періоду, часу руху поршня та перевірки відповідності кінематичних характеристик приводу заданому технічному завданню за умов горизонтального переміщення заготовки [16]. Розрахункова схема пневмоприводу показана на рис. 2.3.

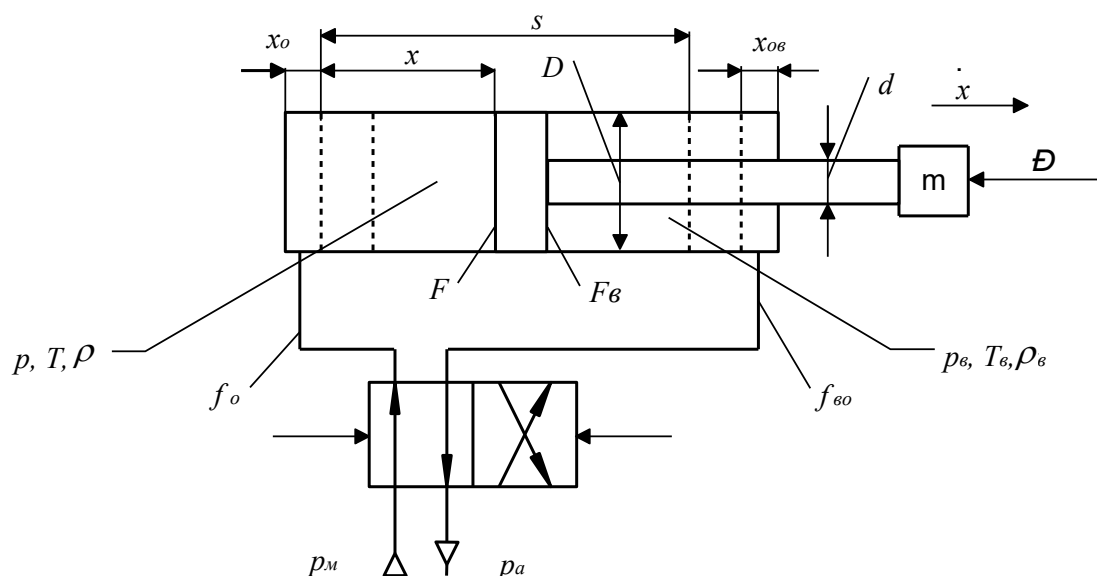


Рис. 2.3. Розрахункова схема пневмоприводу [45]

2.3.1 Визначення геометричних та об'ємних характеристик приводу

Для обраного пневмоциліндра (діаметр поршня $D = 0,02$ м, діаметр штока $d = 0,008$ м, хід $s = 0,1$ м) фактичні робочі площі поршня в поршневій F_1 та штоковій F_2 порожнинах становлять:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot 0,02^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$F_2 = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{3,1416 \cdot (0,02^2 - 0,008^2)}{4} = 2,64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Об'єм сполучної трубки довжиною $l = 0,5$ м та внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 2,5$ мм обчислюється як:

$$V_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} \cdot l = \frac{3,1416 \cdot 0,0025^2}{4} \cdot 0,5 = 2,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Початкові об'єми поршневої V_{01} та штокової V_{02} порожнин визначаються з урахуванням мертвого об'єму циліндра (приймається на рівні 5% від робочого об'єму порожнини $V_{\text{раб}} = F_1 \cdot s$) та приведенного об'єму трубопроводів. Коефіцієнт

приведення розподіленого об'єму до зосередженого для порожнини наповнення становить $k_v = 1$:

$$V_{\text{зав}} = 0,05 \cdot F_1 \cdot s = 0,05 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 = 1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

$$V_{01} = V_{\text{зав}} + k_v \cdot V_{\text{тр}} = 1,57 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 2,45 \cdot 10^{-6} = 4,02 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Максимальний повний об'єм робочої порожнини наприкінці ходу штока:

$$V_{1.\text{max}} = V_{01} + F_1 \cdot s = 4,02 \cdot 10^{-6} + 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1 = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

2.3.2 Визначення пропускної здатності та ефективної площі перерізу пневмолінії

Ефективна площа перерізу лінії підведення стисненого повітря f_e визначається через площу поперечного перерізу гнучкого трубопроводу $f_{\text{тр}}$ з урахуванням середнього коефіцієнта витрати для цангової апаратури $\mu = 0,3$:

$$f_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4} = \frac{3,1416 \cdot 0,0025^2}{4} = 4,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$f_e = \mu \cdot f_{\text{тр}} = 0,3 \cdot 4,91 \cdot 10^{-6} = 1,47 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

2.3.3 Розрахунок часу підготовчого періоду ($t_{\text{п}}$)

Зусилля опору рушанню з урахуванням сили тертя заготовки ($m = 1 \text{ кг}$, $f = 0,15$) дорівнює:

$$P_{\text{ст}} = 1,47 \text{ Н.}$$

Абсолютний тиск рушання в поршневій порожнині (за умови, що в протилежній штоковій порожнині тиск початково дорівнює атмосферному $p_a = 0,1 \text{ МПа}$):

$$p_{1.\text{р}} = \frac{P_{\text{ст}} + p_a \cdot F_2}{F_1} = \frac{1,47 + 10^5 \cdot 2,64 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 10^{-4}} = 88758 \text{ Па} \approx 0,0888 \text{ МПа}$$

Оскільки розрахований абсолютний тиск рушання $p_{1.\text{р}}$ виявився меншим за атмосферний ($0,0888 < 0,1 \text{ МПа}$), це свідчить про те, що за рахунок диференціала площ поршня ($F_1 > F_2$) природне атмосферне зусилля вже перевищує силу тертя заготовки. Рушання поршня відбувається миттєво після спрацювання розподільника. З урахуванням інерції золотника апарата приймаємо:

$$t_{\text{п}} = 0,005 \text{ с.}$$

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

2.3.4 Розрахунок часу руху поршня (t_p)

Для аналізу динаміки використовується безрозмірний конструктивний параметр N :

$$N = \frac{f_e \cdot p_{\text{м.абс}}}{m \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{k}{R \cdot T}},$$

де $p_{\text{м.абс}} = 0,6$ МПа (абсолютний тиск магістралі); $k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К); $T = 293$ К.

$$\sqrt{\frac{k}{R \cdot T}} = 0,00408 \text{ с/м.}$$

$$N = \frac{1,47 \cdot 10^{-6} \cdot 0,6 \cdot 10^6}{1 \cdot 0,1} \cdot 0,00408 = 8,82 \cdot 0,00408 = 0,036.$$

Оскільки параметр динаміки $N \leq 0,5$, даний привід відноситься до систем із великою пропускною здатністю відносно рухомої маси. За вільного (нерегульованого) витікання повітря поршень розгониться занадто швидко через велику робочу площу циліндра 20 мм:

$$F_{\text{висув}} = F_1 \cdot p_{\text{м}} = 3,14 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5 \cdot 10^6 = 157 \text{ Н.}$$

$$t_{\text{р.теор}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot s}{F_{\text{висув}} - P_{\text{ст}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 0,1}{157 - 1,47}} = \sqrt{0,00128} \approx 0,036 \text{ с.}$$

2.3.5 Визначення параметрів регулювання швидкості (Розрахунок дроселювання)

Необхідний час руху поршня для забезпечення технічного завдання становить:

$$t_p = t_0 - t_{\text{п}} = 0,4 - 0,005 = 0,395 \text{ с}$$

Теоретичний час вільного руху (0,036 с) значно менший за необхідний за регламентом роботи лінії (0,395 с). Для стабілізації швидкості та уникнення жорстких ударів необхідно застосувати дроселювання вихлопу.

Необхідний середній протитиск у штоковій порожнині $p_{2.\text{сер}}$ визначається з рівняння балансу динамічних сил:

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$F_{\text{висув}} - P_{\text{ст}} - p_{2.\text{сер}} \cdot F_2 = 0.$$

$$157 - 1,47 - p_{2.\text{сер}} \cdot 2,64 \cdot 10^{-4} = 0.$$

$$155,53 = p_{2.\text{сер}} \cdot 2,64 \cdot 10^{-4}.$$

$$p_{2.\text{сер}} = \frac{155,53}{2,64 \cdot 10^{-4}} = 589128 \text{ Па} \approx 0,589 \text{ МПа (абсолютний)}.$$

Переводячи в надлишковий манометричний тиск:

$$p_{2.\text{ізб}} = 0,589 - 0,1 = 0,489 \text{ МПа (4,89 бар)}.$$

Висновок динамічного розрахунку: пневмоциліндр з діаметром поршня 20 мм має високий запас потужності. Для реалізації точного часу висування штока (0,4с) на вихлопній лінії циліндра встановлюється регульований дросель, налаштований на створення робочого протитиску 4,89 бар. Це гарантує плавну, стабільну та безпечну роботу механізму виштовхування заготовок у зону дії кобота.

2.4 Підбір пневматичного обладнання

Пневматичне обладнання (циліндри пневматичні, розподільники, дроселі та форсунки пневматичну) підбираємо відповідно до пневматичної схеми (Рис. 2.4)

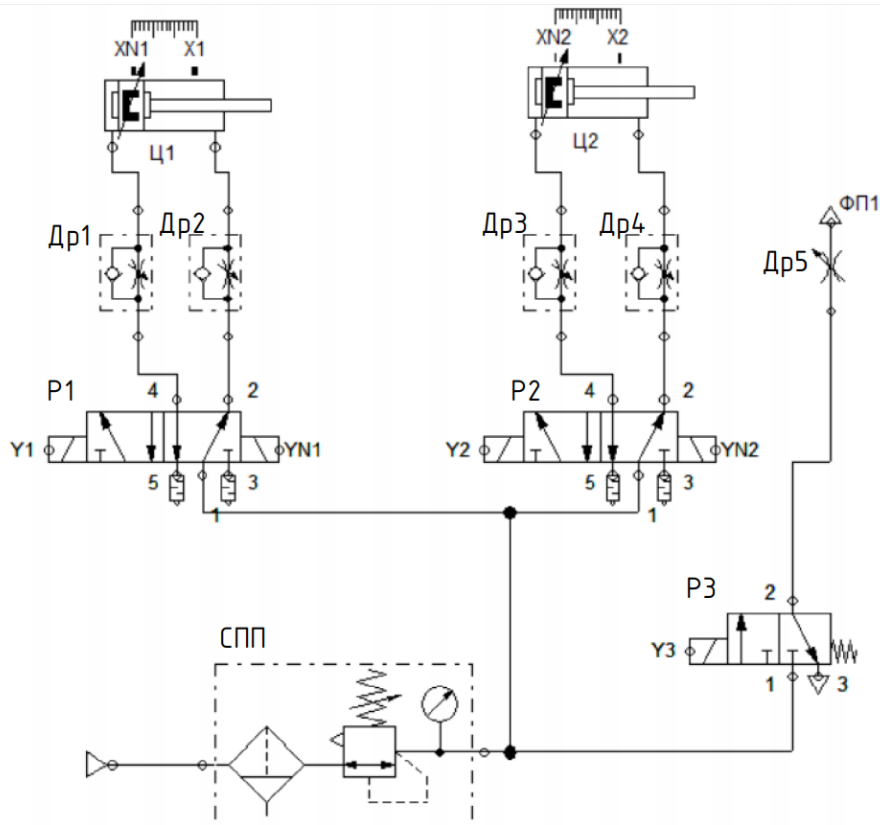
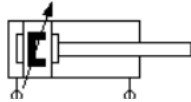


Рис. 2.4. Схема пневматична

Під розміри, які ми отримали в результаті розрахунків, підходить міні пневмоциліндр з серії ISO 6432 від компанії METAL WORK. Серійний номер – 1130200100CN [27] (Табл. 2.3)

Табл. 2.3 характеристики пневмоциліндра

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Хід штока, мм	100
Діаметр поршня, мм	20
Різьба штоку	M8
Максимальний робочий тиск, бар	10
Демпфування	Регульоване пневматичне демпфування з обох сторін
Тип дії	Двосторонньої дії
Визначення положень	Магніт на поршні для роботи з зовнішніми магнітними датчиками
Теоретичне зусилля при прямому ході (при 6 бар), N	188,5

Визначимо витрату стисненого повітря одним циліндром за один цикл.

Об'єм прямого ходу, $V_{\text{пр}}$:

$$V_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 20^2}{4} \cdot 100 = 31400 \text{ мм}^3 = 0,314 \text{ л},$$

де D – діаметр поршня;

L – хід поршня.

Об'єм зворотнього ходу, $V_{\text{зв}}$:

$$V_{\text{зв}} = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot (20^2 - 8^2)}{4} \cdot 100 = 26376 \text{ мм}^3 = 0,264 \text{ л},$$

де d – діаметр штока.

Об'єм за один цикл - $V_{\text{цикл}}$:

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

$$V_{\text{цил}} = V_{\text{пр}} + V_{\text{зв}} = 0,314 + 0,264 = 0,578 \text{ л.}$$

Для скидання деталей, які не підходять по вазі, використовуватиметься повітряна форсунка «Гребінець» АА-727-15-PVC [29] (Табл. 2.4)

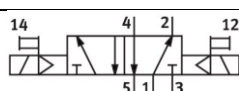
Табл. 2.4 характеристики повітряної форсунки АА-727-15-PVC

Характеристика	Значення
Пневматичне підключення	G1/4
Витрата повітря (при 6 бар), л/хв	816
Максимальний робочий тиск, бар	7

Обираємо пневматичну апаратуру з каталогу Festo [28]:

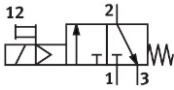
- Пневморозподільник для керування пневмоциліндрами - VUVS-LK20-B52-D-G18-1C1-S (Табл. 2.5).

Табл. 2.5 характеристики пневморозподільника VUVS-LK20-B52-D-G18-1C1-S

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Функція клапана	5/2 бістабільний
Діаметр пневматичних портів	G1/8
Спосіб приведення в дію	Електричний
Робоча напруга, В	24
Робочий струм, А	0,1
Робочий тиск, бар	1,5...8
Номінальна витрата, л/хв	550

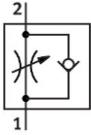
- Пневморозподільник для керування пневматичною форсункою MFH-3-1/4-24-EX (Табл. 2.6)

Табл. 2.6 характеристики пневморозподільника MFH-3-1/4-24-EX

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Функція клапана	3/2 моностабільний
Діаметр пневматичних портів	G1/8
Спосіб приведення в дію	Електричний
Робоча напруга, В	24
Робочий струм, А	0,19
Робочий тиск, бар	1,5...8
Номінальна витрата, л/хв	800

- Дросель вбудований в штуцер GRLA-M5-QS-4-D (Табл. 2.7). Вони будуть використовуватись для налаштування швидкості руху усіх циліндрів, а також регулювання сили потоку повітряної форсунки.

Табл. 2.7 характеристики дроселя GRLA-M5-QS-4-D

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Номінальний потік, л/хв	110
Діаметр пневматичних портів	G1/8, 4мм
Спосіб приведення в дію	Електричний
Робоча напруга, В	24
Робочий тиск, бар	0,2...10
Номінальна витрата, л/хв	550

Розрахуємо загальну витрату стисненого повітря системою для формування вимог до компресора, з яким буде використовуватись стенд.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Нехай за хвилину система виконує 10 повних циклів. Припустимо, що в 4 з них використана пневматична форсунка. Її вмикаємо імпульсом на 0,5 с. Розрахуємо витрату стисненого повітря за один цикл без форсунки:

$$V_{\text{цикл 1}} = 2 \cdot V_{\text{цил}} = 2 \cdot 0,578 = 1,156 \text{ л}$$

Розрахуємо витрату стисненого повітря за один цикл 3 форсункою:

$$V_{\text{цикл 2}} = 2 \cdot V_{\text{цил}} + \frac{V_{\text{ф}}}{120} = 2 \cdot 0,578 + \frac{816}{120} = 7,956 \approx 8 \text{ л}$$

Отже теоретична витрата стисненого повітря системою:

$$V = 6 \cdot V_{\text{цикл 1}} + 4 \cdot V_{\text{цикл 2}} = 6 \cdot 1,156 + 4 \cdot 8 = 38,9 \approx 40 \text{ л/хв}$$

Отже, для нормальної роботи системи необхідний компресор, який може забезпечити постійний тиск не менше 6 бар та продуктивність близько 40 літрів. Також пневматика вимагає хорошої якості стисненого повітря, тому після компресора повинен стояти блок підготовки стисненого повітря. Наприклад Festo MSB4-FRC. Він містить фільтр–вологівідділювач, який прибирає з повітря зайве мастило та вологу, а також тверді частинки. Після них стоїть лубрикатор, який розпиляє невелику дозу мастила, яка необхідна для роботи пневмоциліндрів та розподільників.

2.5 Розрахунок гільзи пневмоциліндра на міцність

Метою розрахунку є перевірка міцності стінки гільзи обраного пневмоциліндра під дією максимального внутрішнього тиску стисненого повітря. Гільза розраховується як товстостінна або тонкостінна циліндрична оболонка.

Вихідні дані для розрахунку

- Внутрішній діаметр гільзи: $D = 20 \text{ мм}$ ($0,02 \text{ м}$).
- Товщина стінки гільзи (стандартна для пневмоциліндрів серії ISO 6432): $\delta = 1,5 \text{ мм}$ ($0,0015 \text{ м}$).
- Матеріал гільзи: Алюмінієвий деформований сплав Д16Т (або аналог EN AW-6063-T6, що є стандартом для пневматики).
- Границя плинності матеріалу: $\sigma_T = 270 \text{ МПа}$.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

- Максимальний робочий тиск у системі: для запасу надійності приймаємо максимальний тиск, який може видати цеховий компресор $p_{max} = 1,0$ МПа (10 бар), хоча робочий тиск становить 0,6 МПа.

Визначення допустимого напруження. Допустиме напруження для матеріалу гільзи $[\sigma]$ визначається за формулою[12]:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{[n]},$$

де $[n]$ - нормативний коефіцієнт запасу міцності. Для посудин під тиском і пневмоапаратури приймаємо $[n] = 3$.

$$[\sigma] = \frac{270}{3} = 90 \text{ МПа.}$$

Перевірка умови тонкостінності. Оболонка вважається тонкостінною, якщо відношення товщини стінки до внутрішнього діаметра задовольняє умову $\frac{\delta}{D} \leq 0,1$.

$$\frac{\delta}{D} = \frac{1,5}{20} = 0,075.$$

Оскільки $0,075 < 0,1$, гільзу можна розраховувати за формулою Ламе для тонкостінних циліндрів без суттєвої похибки.

Розрахунок фактичних напружень Під дією внутрішнього тиску в стінках гільзи виникає плоский напружений стан. Найбільшими є тангенціальні (кільцеві) напруження σ_t , які намагаються розірвати трубу вздовж[12]:

$$\sigma_t = \frac{p_{max} \cdot D}{2 \cdot \delta}.$$

$$\sigma_t = \frac{1,0 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2 \cdot 0,0015} = 6666667 \text{ Па} \approx 6,67 \text{ МПа.}$$

Поздовжні (осьові) напруження σ_l , що діють на розрив гільзи по її довжині (через тиск повітря на кришки циліндра), вдвічі менші за тангенціальні:

$$\sigma_l = \frac{p_{max} \cdot D}{4 \cdot \delta} = 3,33 \text{ МПа.}$$

Згідно з енергетичною теорією міцності (IV теорія), еквівалентне напруження $\sigma_{екв}$ обчислюється як:

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma_t^2 - \sigma_t \cdot \sigma_l + \sigma_l^2}.$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{6,67^2 - 6,67 \cdot 3,33 + 3,33^2} \approx 5,77 \text{ МПа}$$

Висновок щодо міцності: Умова міцності вимагає, щоб найбільше еквівалентне напруження не перевищувало допустимого[12]:

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma].$$

$$5,77 \text{ МПа} \ll 90 \text{ МПа}.$$

Фактичний коефіцієнт запасу міцності становить:

$$n_f = \frac{\sigma_t}{\sigma_{\text{екв}}} = \frac{270}{5,77} \approx 46,8.$$

Розрахунок показує, що міцність гільзи пневмоциліндра забезпечена з 46-кратним запасом. Такі низькі робочі напруження (5,77 МПа) підтверджують, що товщина стінки $\delta = 1,5$ мм обрана виробником не з умов опору розриву від тиску повітря, а з міркувань забезпечення загальної жорсткості конструкції, стійкості до зовнішніх механічних пошкоджень та можливості виконання різьбових або вальцьованих з'єднань із торцевими кришками циліндра.

2.6 Підбір електрообладнання

Саме електроніка відповідає за керування та логіку роботи всієї системи, а центральним компонентом є колаборативний робот. Необхідно підібрати ПЛК, мікроконтролер та набір датчиків, які забезпечать надійну роботу та точність виконання операцій. Підбір електрообладнання (контролери, датчики та виконавчі пристрої) підбираємо відповідно до схеми (Рис. 2.5).

Центральним виконавчим пристроєм буде колаборативний робот від компанії Franka Robotics – franka emika panda [30] (Табл. 2.8).

Додатковою перевагою є наявність датчиків крутного моменту у всіх рухомих суглобах. Це дозволяє дуже точно контролювати зусилля робота. Саме це є основною особливістю коботів. Вони не можуть нашкодити людині, просто не

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

помітивши її. Додаткова сьома вісь дає кінематичну надлишковість. Маніпулятор може огинати перешкоди та хапати об'єкти під різними кутами.

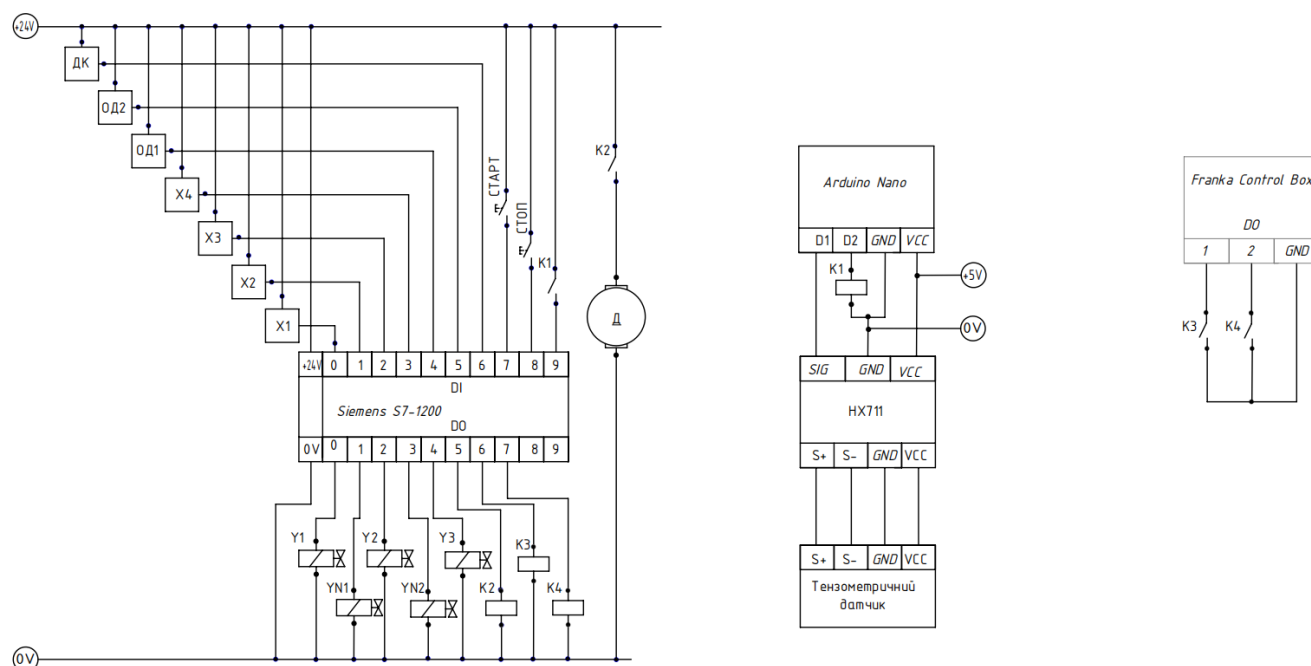


Рис. 2.5 Схема електрична

Табл. 2.8 характеристики кобота franka emika panda

Характеристика	Значення
Кількість ступенів свободи	7
Корисне навантаження, кг	3
Максимальний радіус охоплення, мм	855
Напруга живлення, В	100...240
Повторюваність, мм	0,1
Комунікація	Ethernet (TCP / IP)

Центром керування всієї системи стане ПЛК SIMATIC S7-1200 CPU 1214C [31]. Він живиться від 24В. та має транзисторні цифрові виходи (Табл. 2.9).

Табл. 2.9 характеристики ПЛК SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	24
Кількість цифрових входів	14
Кількість цифрових виходів	10
Максимальний струм на один вихід, А	0,5
Струм живлення, А	1,5

Оскільки розподільники та конвеєр живляться від 24 вольт то нема сенсу використовувати живлення ПЛК від 220В.

Струм споживання котушок пневматичних розподільників становить 0,1...0,19А, що не перевищує допустимий струм на кожен цифровий вихід ПЛК, який становить 0,5А, можна зробити висновок: нема необхідності використання додаткових реле для керування розподільниками. Проте, для увімкнення електродвигуна конвеєра треба поставити додаткове реле SRD-24VDC-SL-C.

Для обробки даних з тензометричного датчика та подальшої відправки сигналів на ПЛК, використаємо дешевий та дуже поширений мікроконтролер Arduino Nano ESP32 ABX00083 [33] (Табл. 2.10).

Табл. 2.10 характеристики Arduino Nano ESP32 ABX00083.

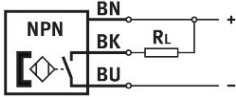
Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	6...21
Напруга портів, В	3,3
Кількість цифрових входів/виходів	14
Кількість аналогових входів	8
Виходів з ШИМ	5
Максимальний струм на один вихід, А	0,04
Струм живлення, мА	30

Завдяки великій кількості входів та виходів, у майбутньому можна значно розширити можливості стенда та додати нові цікаві функції.

Для транспортування деталей в зону подальшої обробки використаємо міні-конвеєр стрічковий 100x500 мм. Він живиться від 24 В та обертається зі швидкістю до 160 об/хв.

Для контролю кінцевих положень пневмоциліндрів використаємо магнітні безконтактні вимикачі Festo SMT-10M-NS-24V-E-2,5-L-OE (Табл. 2.11). Вони будуть встановлені на зовнішній поверхні циліндрів та спрацювуватимуть від магніта, вбудованого в поршень [34].

Табл. 2.11 характеристики безконтактного вимикача
SMT-10M-NS-24V-E-2,5-LOE

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Напруга живлення, В	5...30
Максимальна потужність перемикання, W	1,5
Індикація	Жовтий світлодіод при спрацюванні

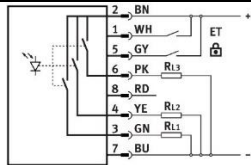
Для контролю наявності деталі в точці захоплення маніпулятором, використаємо оптичний безконтактний датчик M12JG-30N1-B-NPN-O (Табл. 2.12).

Табл. 2.12 характеристики оптичного вимикача M12JG-30N1-B-NPN-O

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Напруга живлення, В	10...30
Максимальна відстань спрацювання, М	20
Споживаний струм, А	0,2

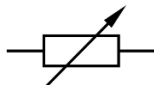
Колір деталі визначатимемо за допомогою датчика кольору Festo SOEC-RT-Q50-PS-S-7L. Він зможе розпізнати колір кожної заготовки і в подальшому можна буде порахувати їх кількість чи сортувати за кольором (Табл. 2.13).

Табл. 2.13 характеристики датчика кольору Festo SOEC-RT-Q50-PS-S-7L

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Напруга живлення, В	10...30
Розмір світлової плями, мм	4
Споживаний струм, А	0,1

Тензометричний датчик являє собою резистор зі змінним опором. Опір змінюється залежно від деформації датчика, а деформація залежить від прикладеної маси. Використаємо датчик CAS BCL 3 (Табл. 2.14).

Табл. 2.14 характеристики тензометричного датчика CAS BCL 3

Характеристика	Значення
Умовне позначення	
Напруга живлення, В	10...15
Опір, Ом	400
Загальна похибка, %	0,03

Тензодатчик не можна напряму підключити до мікроконтролера, оскільки зміна напруги на датчику занадто мала і він просто не зможе її зафіксувати. Для вирішення цієї проблеми треба використати аналого цифровий перетворювач із вбудованим підсиленням. Наприклад НХ711. Він підсилює аналоговий сигнал з тензодатчика та перетворює на цифровий, який уже без проблем зможе зчитати Arduino.

Для транспортування деталей на склад оберемо міні конвеєрну стрічку JGB37-520 (Табл. 2.15)

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Табл. 2.15 характеристики конвеєра JGB37-520

Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	24
Номінальний момент, Н	0,5
Струм живлення, А	0,4
Швидкість обертання, об/хв	100

Підберемо блоки живлення для електронної частини. Для цього необхідно врахувати споживаний струм усіх компонентів, які він живитиме:

$$A = A_{\text{ПЛК}} + A_{\text{МК}} + 3A_{\text{розп}} + A_{\text{дв}} = 1,5 + 0,3 + 0,2 + 0,4 = 2,4 \text{ А.}$$

Також варто врахувати споживання датчиків і втрати у дротах, тому візьмемо блок живлення на 5 А.

Для живлення системи (ПЛК Siemens та всіх підключених до нього елементів) оберемо блок живлення від Siemens - SIMATIC S7-1200 PM1207 (Табл. 2.16), а також окремий блок живлення для мікроконтролера та його датчиків - MEANWELL DDR-15G-5 (Табл. 2.17).

Табл. 2.16 характеристики блока живлення SIMATIC S7-1200 PM1207

Характеристика	Значення
Вихідна напруга, В	24
Напруга живлення, В	110/220
Вихідний струм, А	5
Потужність, Вт	120

Табл. 2.17 характеристики блока живлення MEANWELL DDR-15G-5

Характеристика	Значення
Вихідна напруга, В	5
Напруга живлення, В	110/220
Вихідний струм, А	3
Потужність, Вт	15

Висновок до розділу 2

У цьому розділі проведене інженерне проектування макету системи, яка може здійснювати контроль продукції, а саме: сортування по кольору, підрахунок зрізків різних кольорів, а також відсіювання браку за масою. Було розраховано та підібрано пневмоциліндр, проведено підбір іншого необхідного пневматичного обладнання: розподільників, регулюючих елементів. Проведено розрахунок витрати стисненого повітря системою для визначення необхідних характеристик компресора, який зможе живити пневматичну частину стенда.

Також підібраний колаборативний робот-маніпулятор та необхідний ПЛК й мікроконтролер. Зроблено підбір усіх датчиків та додаткових компонентів, які необхідні для їх коректної роботи.

Розроблена пневматична схема, а саме підключення стисненого повітря до розподільників, а також їх підключення до виконавчих пристроїв, таких як пневматична форсунка та пневмоциліндри. Також складена схема підключення електрообладнання: підключення до контролера магнітних датчиків, котушок розподільників, датчика кольору, привода конвеєра через відповідне реле та оптичного датчика. Також підключення тензOMETричного датчика до Arduino через плату перетворювач і підключення між собою ПЛК, мікроконтролера та блока керування коботом.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КРОНШТЕЙНА

Цей розділ присвячено аналізу конструкції деталі та побудові технологічного процесу, оптимального за швидкістю та собівартістю виготовлення деталі. Аналіз будемо проводити для деталі «Кронштейн», яка виконує функцію кріплення датчика до рами станку і повинна забезпечити жорстку фіксацію та можливість точно позиціонувати датчик на своєму місці. Виготовлення включає в себе підбір заготовки, розробку маршруту та типів обробки деталі, а також розрахунок вартості.

3.1 Завдання на розробку технологічного процесу

Назва деталі	- «Кронштейн» (рис. 3.1).
Службове призначення	- Деталь є елементом конструкції навчального станку для вивчення роботизованих мехатронних систем. Вона призначена для кріплення датчика до рами і повинна забезпечити жорстку фіксацію та чітке позиціонування, а також дотримання перпендикулярності базових поверхонь. Великого силового навантаження не несе.
Матеріал	- Сталь 20 .
Замовлення	- 2 шт .

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

При обробці даної деталі необхідно забезпечити перпендикулярність площини посадки датчика та площини прилягання кронштейна до рами, а також паралельність осі отвору для кріплення датчика та площини прилягання кронштейна до рами. Це необхідно для забезпечення паралельності осі датчика до поверхні та вертикальність його чутливої площини. Від позиціонування датчика залежить точність та чутливість його спрацювання.

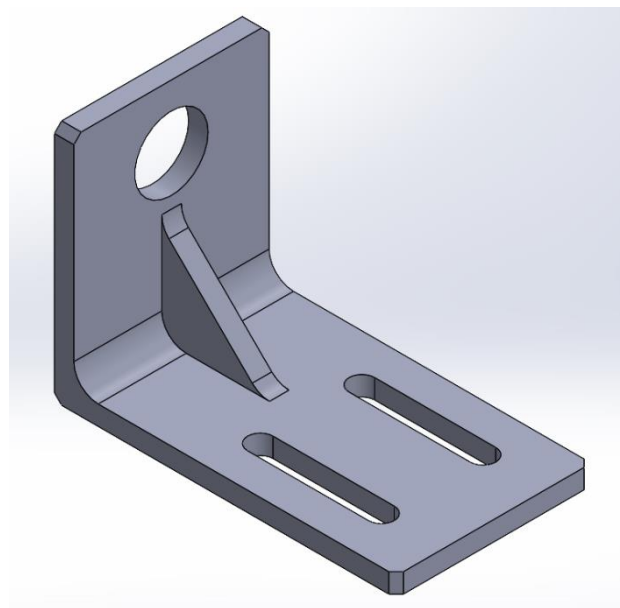


Рисунок 3.1 Модель деталі

Оскільки деталь не зазнає великих навантажень та не піддається впливу тертя, вимоги до якості обробки поверхонь не високі. Площина, якою кронштейн прилягає до рами та площина прилягання опорної поверхні датчика повинні мати шорсткість $Ra6.3$ мкм. Для всіх інших оброблюваних поверхонь буде достатньою шорсткість поверхні $Ra12.5$ мкм.

Найточніші розміри даної деталі $\varnothing 15H9$, всі інші поверхні обробляються за 12-им квалітетом.

3.2 Вибір заготовки

Деталі будуть вготовлятися методом фрезерування. Початкова проєктна висота деталі становила 50 мм, а ще треба врахувати припуск на обробку. В ході підбору заготовки, стало зрозуміло, що найближчий по розміру квадрат 50x50 мм. Для економії матеріалу, а отже і грошей, доцільно трохи зменшити розміри деталі для забезпечення припуску. Після змін габарити деталі стали (40x49x70). Враховуючи їх та припуски на обробку, ми візьмемо прокат - квадрат сталевий (сталь 20) 50x50 мм.

Будемо нарізати заготовки довжиною по 80 мм. Закупка – 1 пог. м. Ціна – 1254 грн. + 180 грн. доставка компанією «Нова пошта».

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

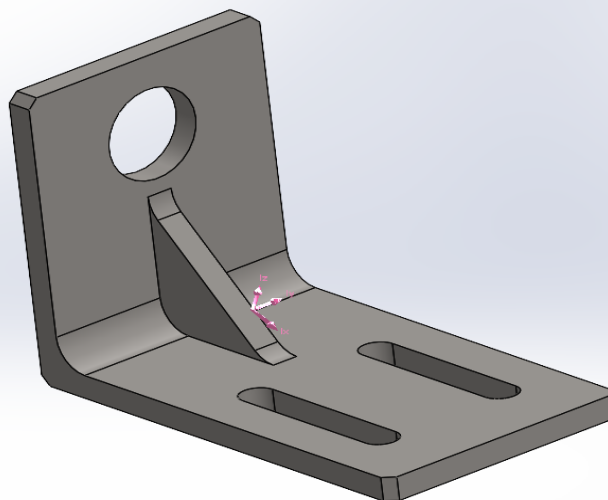
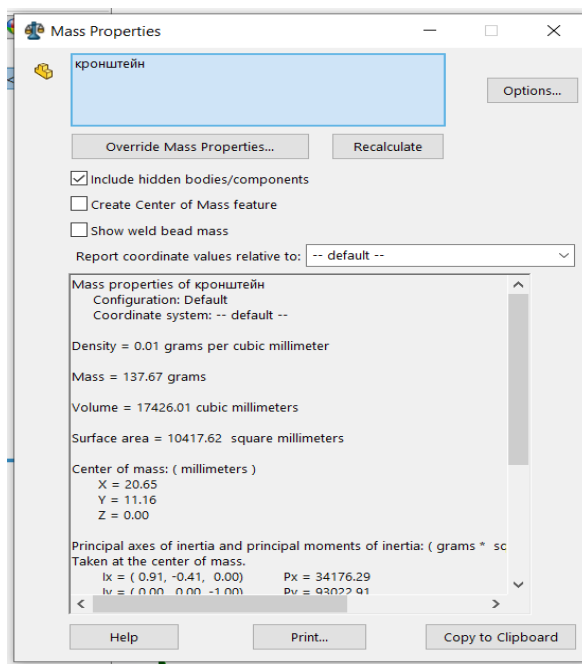


Рисунок 3.2 - 3D модель деталі «Кронштейн» (визначено масу – 138 грам)

3.3 Розробка маршрутного технологічного процесу

Конструкцію деталі можна розділити на сукупність типових геометричних фігур, які об'єднані загальним службовим призначенням деталі. Типовими елементами конструкції є: циліндричні та прямі внутрішні поверхні та сукупність площин. Для виготовлення деталі необхідно поєднувати обробку максимально великої кількості площин за одну установку заготовки. Це дозволить зекономити час та витрати на виробництво.

Для опису маршруту оброблення деталі необхідно ідентифікувати поверхні (рис. 3.3).

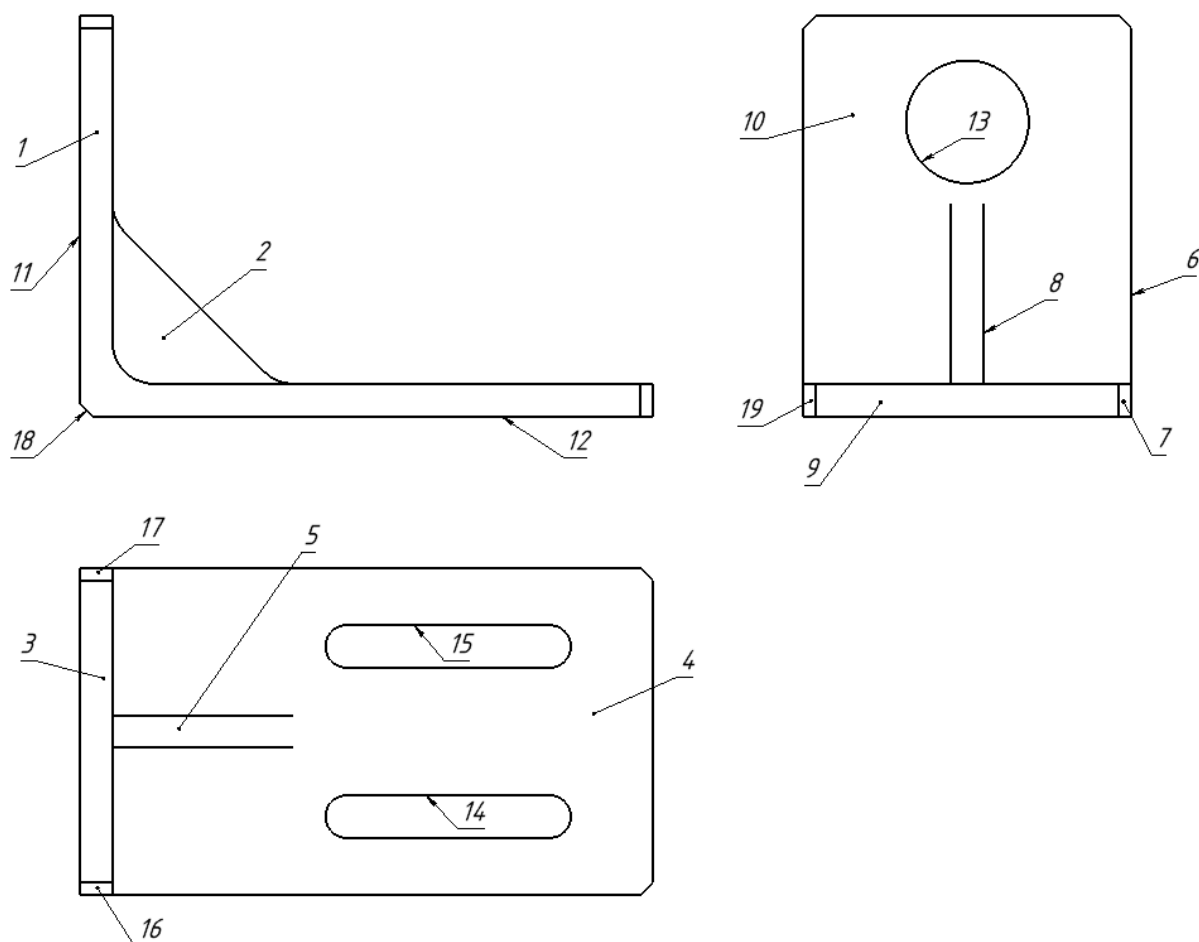


Рисунок 3.3 – Нумерація поверхонь деталі

Таблиця 1. Типові технологічні послідовності оброблення поверхонь деталі

Н аз ва по ве рх ні	Характеристики якості поверхонь за креслеником		Типова технологічна послідовність оброблення поверхні	Характеристики якості поверхонь після оброблення	
	Точні сть розмі рів ІТ	Парам етр шорст кості Ra, мкм		Точність розмірів ІТ	Пара метр шорст кості Ra, мкм
1	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
2	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
3	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
4	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
5	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
6	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
7	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5
8	12	12,5	Фрезерування чорнове	12	15
			Фрезерування чистове	12	12,5

9	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5
10	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5
11	12	6,3	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 6,3
12	12	6,3	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 6,3
13	Н9	6,3	Центрування Свердління	9 Н9	15 6,3
14	12	6,3	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 6,3
15	12	6,3	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 6,3
16	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5
17	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5
18	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5
19	12	12,5	Фрезерування чорнове Фрезерування чистове	12 12	15 12,5

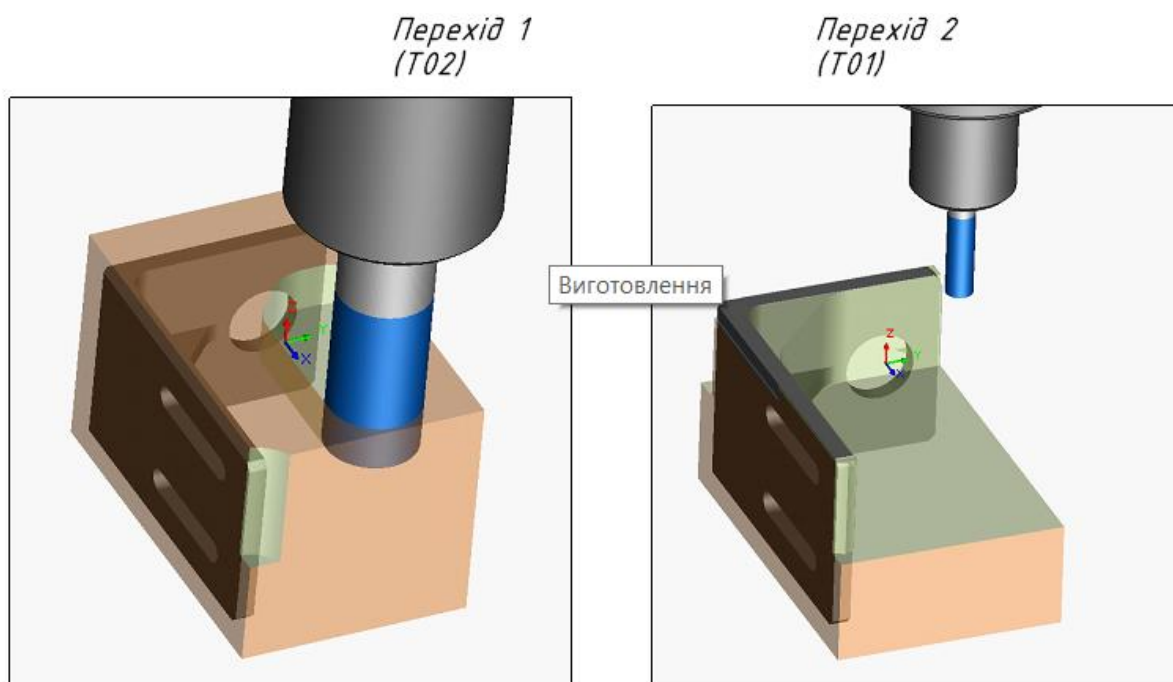
Для виконання обробки деталі буде використано Haas Super Mini Mill - це надкомпактний вертикально-фрезерний ЧПК-верстат для обмежених площ, який відрізняється від базової моделі значно вищою швидкістю: шпинделем на 10000 об/хв та прискореними холостими ходами до 30,5 м/хв. Незважаючи на малі розміри, він побудований на жорсткій чавунній станині, використовує повноцінний промисловий ВТ 40 і стандартно оснащений автоматичним магазином на 10 інструментів, що робить його ідеальним вибором для швидкісної обробки дрібних серійних деталей з алюмінію, пластику та сталі (рис. 3.4)



Рисунок 3.4 Haas Super Mini Mill

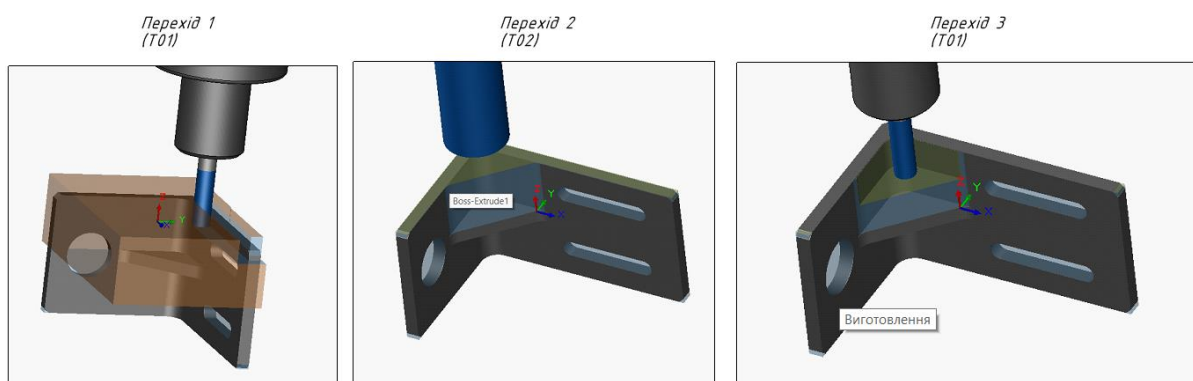
					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

1- Фрезерна



Чорнове (фреза 20 мм.), а потім чистове (фреза 6 мм) оброблення поверхонь: 1, 2, 5 і частково 10 та 4.

2- Фрезерна

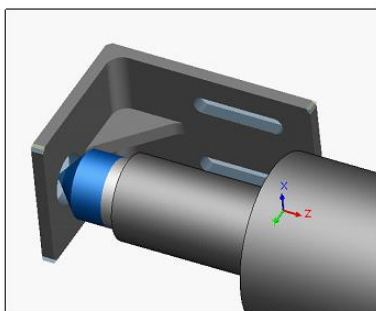


Чорнове та чистове вифрезировування поверхонь 4 та 10 (фреза 6мм); Чистова обробка поверхні 6 (фреза 20мм); чорнове та чистове фрезерування поверхні 8 (фреза 6 мм).

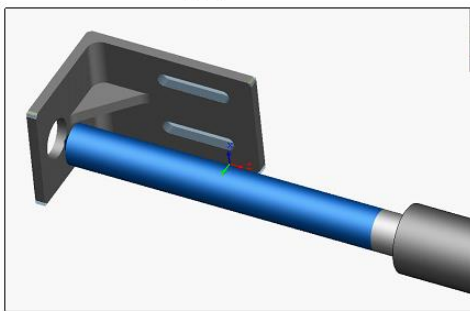
					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

3- Свердлильна та фрезерна

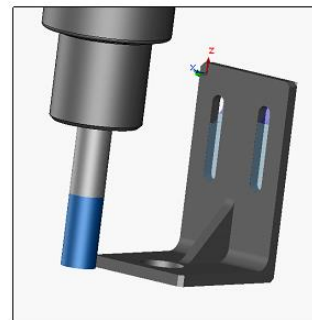
Перехід 1
(T03)



Перехід 2
(T04)



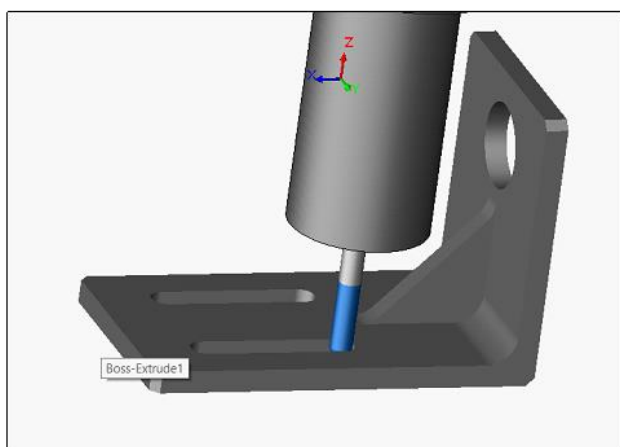
Перехід 3
(T05)



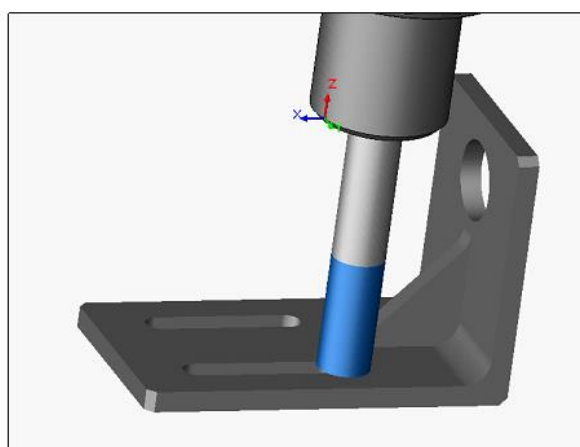
Центрування та свердління отвору 13 та чистова обробка поверхонь 3, 16, 17.

4- Фрезерна

Перехід 1
(T06)



Перехід 2
(T05)



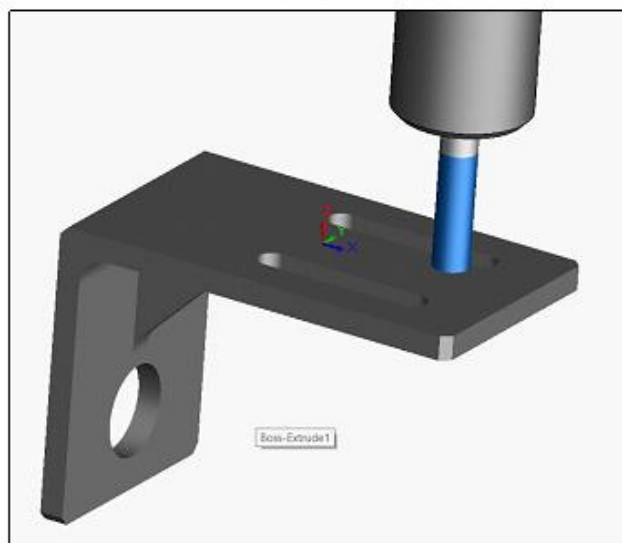
Вифрезировування отворів 14, 15; чорнова та чистова обробка поверхонь 7, 9, 19.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

5,6- Фрезерна

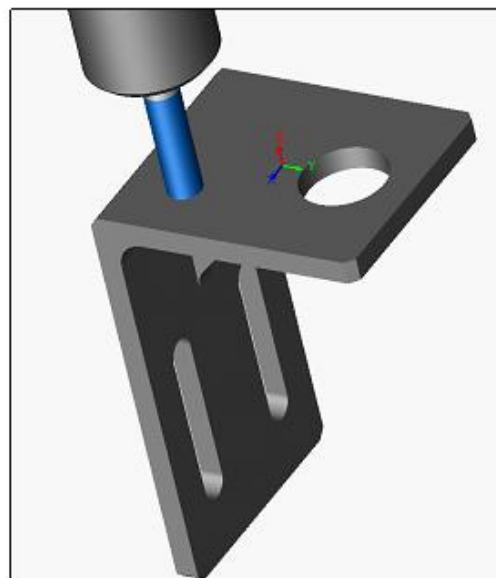
Операція 5

Перехід 1
(T05)



Операція 6

Перехід 1
(T05)



Чистова обробка поверхонь 11 та 12

3.4 Вибір різального інструменту. Розрахунок режимів різання

Визначаємо режими різання за каталогами та рекомендаціями наданими виробниками інструментів [9,8,10]:

WDO-15D solid carbide deep twist drill bit

VHM Werks-norm Typ TLP 140° 30° 15xD DIN 6535 HA TiAlN i Vc/fz

- With optimised shank diameter tolerance, suitable for use in shrink-fit holders
- Cutting material: solid carbide, WDI™-coated**
- Cutting edge tolerance:
 - Ø3 mm -0.005 to -0.024
 - Ø3.1-6 mm -0.01 to -0.032
 - Ø6.1-10 mm -0.015 to -0.04
 - Ø10.1-12 mm -0.02 to -0.05
- High-performance drill bit for cost-efficient manufacturing of deep bores up to 15xD with no step
- Optimum chip removal due to special cutting geometry and large chip spaces
- Pilot hole recommended**

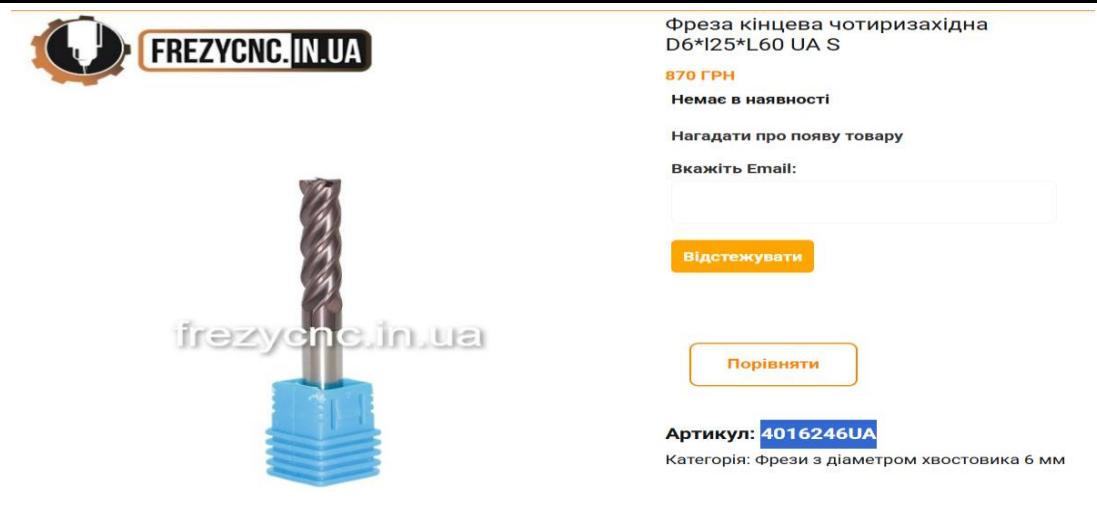
material	● very well suited ○ well suited	steel < 700 N/mm²	steel 700-1000 N/mm²	steel 1000-1400 N/mm²	stainless steel austenitic	stainless steel duplex	cast iron GG/GTS	cast iron GG	titanium alloys	superalloys Fe/Ni-Co-based < 30 Hz	superalloys Fe/Ni-Co-based ≥ 30 Hz	aluminium < 8% Si	aluminium ≥ 8% Si	copper Cu alloy	graphite GFR/CFR/thermo	hardened steel < 55 HRC	hardened steel ≥ 55 HRC
		60-125	60-125	60-125	40-80	40-80	60-125	50-80									

Cutting speed Vc m/min. Please adjust these guidelines according to clamping operation and machine set-up.

D	D1	L	L1	Feed f	art.no.	€
mm	mm	mm	mm	steel < 1000 N/mm² mm/rev		
3.0	3	105	55	0.06	111516 0030	167,10

Для зручності, всі дані заносимо у звітну таблицю:

Таблиця 3.2. Режими різання рекомендовані виробниками інструментів.

Операція	Перехід	Інструмент	Глибина різання	Подача	Частота обертання	Швидкість різання
			h [мм]	F [мм/об]	N [об/хв]	V [мм/хв]
001	02; 03; 04	Фреза кінцева D=6мм D6*L25*L60 UA	5	0.05	9500	470
						
	01	Фреза кінцева D=20мм D20*L40*L82 UA	20	0.07	1000	72

REZYCNC.IN.UA

Фреза кінцева чотиризахідна
D20*L40*L82 UA S

10730 ГРН € в наявності



- 1 +

Додати в кошик

Порівняти

Артикул: 40120408UA

Категорія: Фрези з діаметром хвостовика
20мм

002	01; 03; 04	Фреза кінцева D=6мм D6*L25*L60 UA	5	0.05	9500	470
	02	Фреза кінцева D=20мм D20*L40*L82 UA	20	0.07	1000	72
003	01	Свердло центрувальне SD502- D10*L45*90° UA	2	0.28	2980	215
REZYCNC.IN.UA Свердло твердосплавне центрувальне D10*L45*90° UA 1740 ГРН € в наявності - 1 + Додати в кошик Порівняти Артикул: D104590UA Категорія: Свердла центрувальні						
	02	Свердло d15*D16*175*L125 UA	4	0.28	2540	215

Арк.

59

ДП.МА2202.00.000 ПЗ

Змн. Арк. № докум. Підпис Дата

 FREZYCNC.IN.UA  Свердло твердосплавне d15*D16*I75*L125 UA 4160 ГРН Немає в наявності Нагадати про появу товару Вкажіть Email: Відстежувати Порівняти Артикул: D1516713UA					
03; 04	Фреза кінцева D=10мм D10*I30*L75 UA S	2.5	0.2	5000	500
  Фреза кінцева двозахідна D10*I30*L75 UA S 3010 ГРН € в наявності - 1 + Додати в кошик Порівняти Артикул: 20110307UA					
01	Фреза кінцева D=4мм R220.74-0100-09-10	1	0.5	1274	400
004	 Фреза кінцева чотиризахідна d4*D6*I15*L60 950 ГРН € в наявності - 1 + Додати в кошик Порівняти Артикул: 8053982				
02; 03	Фреза кінцева D=10мм D10*I30*L75 UA S	2.5	0.2	5000	500

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

005	01	Фреза кінцева D=10мм D10*130*L75 UA S	2.5	0.2	5000	500
006	01	Фреза кінцева D=10мм D10*130*L75 UA S	2.5	0.2	5000	500

3.5 Оснащення операцій

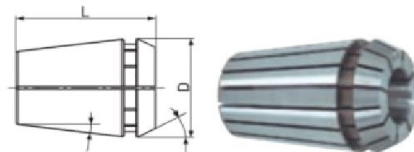
Для реалізації технологічно процесу було обрано за каталогами інструментальні, верстатні та вимірювальні пристрої [8,9,10].

Цанги для фрез, свердл та зенкерів :

ER collets, 8 µm

DIN
6499-B

- Collapse of 1 mm (for ER11; 0.5 mm for clamping diameters of 1 to 2 mm)
- True-running accuracy 8 µm



Individual

Ø mm	ER11 4008E D = 11.5 mm L = 18 mm ort.no. €	ER16 426E D = 17 mm L = 27.5 mm ort.no. €	ER25 430E D = 26 mm L = 34 mm ort.no. €	ER32 470E D = 33 mm L = 40 mm ort.no. €	ER40 472E D = 41 mm L = 46 mm ort.no. €
1	433210 0010 17,10	433211 0010 15,90			
1.5	433210 0015 17,10				
2	433210 0020 17,10	433211 0020 15,90	433213 0020 16,70		
2.5	433210 0025 17,10				
3	433210 0030 17,10	433211 0030 15,90	433213 0030 16,70	433214 0030 17,10	433215 0030 22,10
3.5	433210 0035 17,10				
4	433210 0040 17,10	433211 0040 15,90	433213 0040 16,70	433214 0040 17,10	433215 0040 22,10
4.5	433210 0045 17,10				
5	433210 0050 17,10	433211 0050 15,90	433213 0050 16,70	433214 0050 17,10	433215 0050 22,10
5.5	433210 0055 17,10				
6	433210 0060 17,10	433211 0060 15,90	433213 0060 16,70	433214 0060 17,10	433215 0060 22,10
6.5	433210 0065 17,10				
7	433210 0070 17,10	433211 0070 15,90	433213 0070 16,70	433214 0070 17,10	433215 0070 22,10
8		433211 0080 15,90	433213 0080 16,70	433214 0080 17,10	433215 0080 22,10
9		433211 0090 15,90	433213 0090 16,70	433214 0090 17,10	433215 0090 22,10
10		433211 0100 15,90	433213 0100 16,70	433214 0100 17,10	433215 0100 22,10
11			433213 0110 16,70	433214 0110 17,10	433215 0110 22,10
12			433213 0120 16,70	433214 0120 17,10	433215 0120 22,10
13			433213 0130 16,70	433214 0130 17,10	433215 0130 22,10
14			433213 0140 16,70	433214 0140 17,10	433215 0140 22,10
15			433213 0150 16,70	433214 0150 17,10	433215 0150 22,10
16			433213 0160 16,70	433214 0160 17,10	433215 0160 22,10
17				433214 0170 17,10	



					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Оправки (виходячи з того, що цанга вибирається із серії ER, вибираємо оправку із цього списку) :

ATORN® ER collet chuck, nickel-plated and pre-balanced

- For DIN 6499 ER collets
- Alloyed case-hardened steel with a core tensile strength of min. 950 N/mm², case-hardened to HRc 60 ± 2 (HV 700 ± 50), case depth 0.8 mm ± 0.2 mm
- Nickel-plated
- Pre-balanced to G 2.5 at 25,000 rpm
- With Balluff chip bore
- Taper angle tolerance quality < AT3 in accordance with DIN 7187 and DIN 2080, max. true-running accuracy < 0.005 mm
- Supplied with clamping nut

- ER16 / 426E* tool holding fixtures supplied with hexagonal nut

DIN 69893 type A (HSK-A)

- Internal coolant supply
- When machining with internal coolant supply, a coolant transfer pipe with art.no. 431011... should be used

Shank	Clamping range mm	for collets	A mm	D mm	art.no.	€
HSK 63	1 - 10	ER16 *	100	32	431119 6310	125,-
HSK 63	1 - 10	ER16 *	160	32	431119 6410	162,-
HSK 63	2 - 16	ER25	100	42	431119 6316	125,-
HSK 63	2 - 16	ER25	160	42	431119 6416	166,-
HSK 63	2 - 20	ER32	100	50	431119 6320	130,-
HSK 63	2 - 20	ER32	160	50	431119 6420	171,-
HSK 63	3 - 26	ER40	120	63	431119 6326	139,-
HSK 63	3 - 26	ER40	160	63	431119 6426	178,-

4179

article with bold price = on stock

2016 / 2017 GB

prices in Euro, VAT excluded

40-65

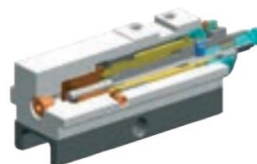
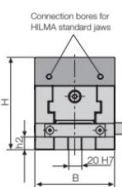
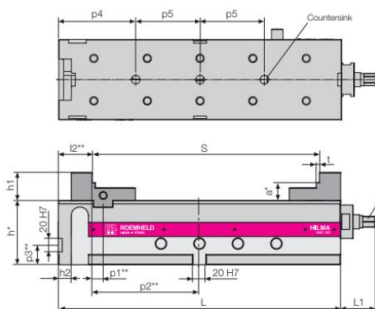
Nickel-plated and pre-balanced
to G 2.5 at 25,000 rpm



Лещата для затиску заготовки :

ROEMHELD KNC NC high-pressure machine vice

- KNC type, mechanical-hydraulic
- For the toughest requirements
- Fully encapsulated spindle and power transmission, reliable protection against chips
- With stepped indexable jaws as standard, smooth rear side, with connection bores for almost all HILMA clamping jaw systems
- Desired clamping range can be roughly pre-selected via socket pin
- Locking device for mechanically clamping sensitive workpieces (optional accessories)
- All-steel design with internal slide guide
- 20 H7 cross slots for horizontal clamping



Арк.

ДП.МА2202.00.000 ПЗ

62

Змн. Арк. № докум. Підпис Дата

Type	Jaw width mm	Clamp force kN	Crank radius mm	L mm	Clamp width mm	Clamp width S1 mm	Weight kg	art.no.	€
Standard	100	25	80	300	230	140	17	457080 0100	1.993,-
Standard	125	40	106	440	354	240	35	457080 0125	2.199,-
Standard	160	50	125	540	436	300	72	457080 0160	2.902,-
Universal	100	25	80	300	230	140	17	457080 1100	2.292,-
Universal	125	40	106	440	354	240	35	457080 1125	2.570,-
Universal	160	50	125	540	436	300	72	457080 1160	3.264,-

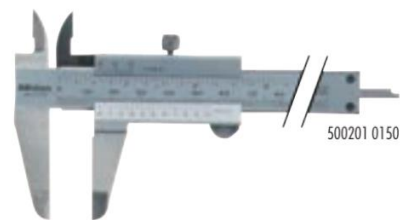
Вимірювальні пристрої :

Locking screw on top

- 500201 0152 *with round depth gauge, Ø 1.9 mm

Measurement range mm	Jaw length mm	Vernier mm/inch	art.no.	€	Calibration art.no.	€
150	40	0.05/-	500201 0151	29,-	070101 0001	7,25
150	40	0.05/-	* 500201 0152	44,-	070101 0001	7,25
150	40	0.05 x 1/128 inch	500201 0150	29,-	070101 0001	7,25
200	50	0.05 x 1/128 inch	500201 0200	74,-	070101 0001	7,25
300	64	0.05 x 1/128 inch	500201 0300	178,-	070101 0002	14,-
150	40	0.02 x 1/1000 inch	500203 0150	55,-	070101 0001	7,25
200	50	0.02 x 1/1000 inch	500203 0200	79,-	070101 0001	7,25
300	64	0.02 x 1/1000 inch	500203 0300	196,-	070101 0002	14,-
150	40	0.02/-	500204 0150	34,-	070101 0001	7,25
200	50	0.02/-	500204 0200	57,-	070101 0001	7,25

5102



Висновок до розділу 2

Витрата часу: використавши програму для аналізу ж-коду, можна з'ясувати, що на обробку однієї деталі йде близько 20 хвилин. До цього часу треба додати час витрачений на перезатискання заготовки: 6 разів по 3 хвилини = 18 хвилин. В результаті, виготовлення 2 деталей займе $2 \cdot (20+18) \approx 80$ хв.

Фінансові витрати: на матеріал витратили 1434 гривні. На інструмент та оснащення витратили : $870+10730+1740+4160+3010+950+850+800+1000+$

$+6500+100000+2500=143360$ грн

Отже виготовлення 2 деталей, з урахуванням закупки необхідного матеріалу та оснастки, обійшлося в $143360+1434=144794$ гривні.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Експлуатація будь-яких технічних засобів завжди супроводжується певними виробничими ризиками, які зумовлені конструктивними характеристиками устаткування, специфікою робочих процесів та умовами зовнішнього середовища. Основною метою розділу «Охорона праці» є виявлення та детальний аналіз потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть виникнути під час взаємодії оператора з розробленим навчальним стендом. Розуміння цих аспектів дає змогу суттєво оптимізувати безпеку навчального процесу, підвищити його ефективність та мінімізувати ймовірність погіршення здоров'я.

Головне завдання заходів з охорони праці полягає в усуненні причин виробничого травматизму на робочих місцях. У межах даного дипломного проєкту підвищену загрозу становлять рухомі механічні вузли та електромережі змінного струму. Впровадження суворих правил безпеки під час обслуговування конвеєрної лінії та роботизованого маніпулятора не лише запобігає травмуванню, а й позитивно впливає на загальну працездатність персоналу.

Базуючись на вимогах Закону України «Про охорону праці», роботодавець несе відповідальність за створення безпечних умов і гарантування захисту здоров'я працівників під час виконання ними службових обов'язків.

Відповідно до специфіки проєкту, автоматизована лінія об'єднує конвеєрну установку та станцію з колаборативним роботом. Робота цього комплексу забезпечується пневматичною системою, а також електромеханічними приводами, які живляться від стандартної мережі напругою 220 В.

Шкідливими та небезпечними факторами під час роботи зі складальною лінією є:

- Мікроклімат;
- Виробниче освітлення;
- Виробничий шум;
- Ураження електричним струмом;
- Пожежонебезпека;

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

- Можливість потрапляння у поле дії маніпулятора.

4.1 Мікроклімат

Щоб забезпечити комфортні умови праці потрібно контролювати наступні мікрокліматичні показники:

- Температура повітря;
- Вологість повітря;
- Швидкість руху повітря;
- Інтенсивність теплового (інфрачервоного) опромінення; - Температура поверхні.

Робоча зона оператора, що обслуговує складальну лінію, обладнана людсько-машинним інтерфейсом (НМІ). Відповідно до положень ДСН 3.3.6.042-99, ця локація офіційно класифікується як постійне робоче місце, оскільки персонал перебуває тут понад дві години поспіль або більше половини своєї робочої зміни. Згідно із «Санітарними нормами мікроклімату виробничих приміщень» [48], діяльність оператора належить до категорії легких фізичних робіт (категорія Іб). Це зумовлено тим, що трудовий процес передбачає виконання операцій у положенні сидючи чи стоячи з періодичним переміщенням і незначним фізичним навантаженням, при якому енерговитрати організму становлять від 141 до 175 Вт (121–150 ккал/год). Для підтримання нормативних параметрів мікроклімату в цеху передбачено функціонування системи кондиціонування повітря та центрального опалення в зимовий період.[46]

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Табл. 4.1. Оптимальні параметри мікроклімату

Параметр	Холодний період року	Теплий період року
Температура повітря, С	21-23	22-24
Відносна вологість повітря, %	60-40	60-40
Швидкість руху повітря, м/с	0.1	0,2

4.2 Виробниче освітлення

Робота оператора збиральної лінії відноситься до робіт середньої точності та 4го розряду зорових робіт із мінімальним розміром об'єкта 0,51,0мм. Відповідно до ДБН В2.5-25:2018 освітлення має становити 200лк [47].

Розрахунок системи загального освітлення для використання точкових джерел світла:

$$E_p = \frac{F_L \cdot n \cdot N \cdot \eta}{sk_3z}$$

де, F_L – світловий потік лампи, 3000 лм;

E_p – нормована освітленість робочої поверхні, лк;

$S = 1$ – площа установки що освічується в m^2 ;

k_3 – коефіцієнт запасу що враховує запиленість приміщень та зменшення світлового потоку в процесі використання джерела світла, для громадських приміщень складає 1,5; z – коефіцієнт нерівномірності освітлення 1,1; n – кількість ламп у світильнику 2;

N – кількість світильників;

η – коефіцієнт використання світлового потоку для кімнат з білим покриттям 0,6-0,7 – обрано 0,65.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

$$N = \frac{sk_3z \cdot E_p}{F_{\text{л}} \cdot n \cdot \eta} = \frac{1 * 1.5 * 1.1 \cdot 200}{3000 \cdot 2 \cdot 0,65} = 0,085$$

Для освітлення площі над конвеєром потрібна 1 лампа, обрано лампу

LED T8 з світловим потоком близько 3000Лм та колірною температурою 4000-5000K (нейтрально біле світло). Також для встановлення інших світильників рекомендовано встановлювати їх із кроком не більше ніж 2 метри для уникнення тіней.

4.3 Виробничий шум

У процесі експлуатації стенда генерується акустичне випромінювання, основними джерелами якого виступають рухомі компоненти системи: приводи конвеєра, роликові механізми напрямних кареток та сервомотори, інтегровані в шарніри колаборативного маніпулятора. Зафіксований еквівалентний рівень звукового тиску в робочій зоні оператора варіюється в межах $L = 30...60$ дБА. 3.3.6.037-99 [44].

4.4 Ураження електричним струмом

Згідно з класифікацією чинних Правил улаштування електроустановок (ПУЕ-2017), спроектований автоматизований комплекс належить до категорії приміщень із підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Електроживлення стенда здійснюється від стандартної однофазної мережі з напругою 220 В та частотою 50 Гц. Експлуатація обладнання категорично заборонена у разі пошкодження або відсутності захисного контуру заземлення.

Відповідно до санітарно-гігієнічних нормативів, гранично допустиме значення струму, що може протікати через тіло людини у штатному (нормальному) режимі роботи, суворо лімітоване: не більше 0,3 мА для змінного струму та до 1 мА для постійного.

З метою гарантування надійної електробезпеки персоналу розроблено комплекс організаційно-технічних рішень:

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

- Застосування надійної діелектричної ізоляції всіх струмопровідних елементів комплексу з використанням сертифікованих матеріалів.
- Систематичний моніторинг стану електрообладнання та проведення планово-попереджувальних ремонтів.
- Обов'язкове проходження персоналом відповідних інструктажів та перевірки знань з питань електробезпеки.

Для превентивного захисту від аварійних ситуацій (коротких замикань чи перевантажень) електросистема стенда оснащена апаратурою автоматичного захисту (автоматичними вимикачами) та надійною системою заземлення неструмопровідних металевих частин, які миттєво реагують на будь-які відхилення у роботі мережі.

4.5 Пожежонебезпека

В проєкті передбачена система зв'язку та оповіщення, системи порошкового та пінного пожежогасіння, та первинні засоби пожежогасіння. До первинних засобів пожежогасіння відносяться: вогнегасники, пожежний інвентар та пожежний інструмент.

У будівлі присутні евакуаційні виходи, встановлені автоматичні системи виявлення пожеж, сигналізації та аварійного відключення світла.

Основні причини виникнення пожежі:

- Використання несправних або пошкоджених електроприладів;
- Використання електроприладів з відкритими нагрівальними елементами;
- Несправність електричних мереж;
- Порушення електротехнічних правил.

У приміщенні з установкою розміщено план евакуації з приміщення у випадку виникнення пожежі. План доведено до кожного співробітника.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Висновки до розділу 4

У розділі охорони праці було детально проаналізовано робоче середовище автоматизованої складальної лінії та визначено ключові фактори ризику для персоналу. Головну увагу приділено електробезпеці під час обслуговування силового обладнання, зокрема роботизованого маніпулятора, приводів конвеєра та шаф керування. Для захисту працівників від ураження струмом передбачено комплексні технічні рішення: впровадження системи захисного заземлення, встановлення пристроїв захисного відключення (ПЗВ) та чіткий графік перевірки цілісності ізоляції дротів.

З огляду на специфіку електрообладнання, окремо оцінено ризики виникнення пожеж через можливі короткі замикання або перевантаження ліній. На основі цього визначено оптимальні типи вогнегасників, місця їх розташування, розроблено план евакуації з робочої зони та графік інструктажів для колективу.

Також розраховано параметри виробничого середовища:

- **Захист від шуму:** оскільки приводи та механізми лінії створюють шум понад 50 дБ, впроваджено використання протишумних навушників або вкладишів, а також оптимізовано графік змін із перервами для відпочинку.

- **Освітлення:** виконано інженерний розрахунок штучного освітлення, визначено точну кількість і потужність світлодіодних світильників та схему їх монтажу. Це дозволило усунути зони затінення, забезпечити відмінну видимість для точних складальних операцій і знизити ризик травматизму.

Завдяки реалізації всіх запропонованих заходів умови праці на дільниці повністю відповідають чинним нормативним стандартам, що гарантує безпечну та безперебійну роботу всього роботизованого комплексу.

Здоров'я людини це найцінніший ресурс і ми повинні в першу чергу цінувати його і звертати увагу на умови праці та мікроклімат у приміщенні. Особливо при тривалій роботі в ньому. Збереження власного здоров'я – повинно бути першочерговим пріоритетом кожної людини протягом усього життя.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У ході виконання дипломного проєкту було здійснено розробку та комплексне проєктування навчально-демонстраційного стенда для тестування взаємодії гетерогенних промислових систем. Цей комплекс поєднує в собі передові інженерні рішення в галузі робототехніки, мехатроніки, сенсорних технологій та промислової автоматизації, повністю відповідаючи сучасній концепції Індустрії 4.0.

На першому етапі було проведено детальний аналіз сучасного ринку та аналіз тенденцій розвитку виробництв і систем промислової автоматизації. На основі проведених теоретичних досліджень було спроектовано апаратну структуру автоматизованого стенда, яка включає:

- настільний стрічковий конвеєр для транспортування об'єктів маніпулювання;
- колаборативний робот Franka Emika Panda для виконання просторових переміщень;
- промисловий логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200, як головний обчислювальний центр керування лінією;
- периферійний інтелектуальний вузол на базі мікроконтролера Arduino Nano ESP32 для обробки даних тензодатчика;
- розгалужену сенсорну підсистему, яка включає промисловий датчик кольору Festo, оптичні датчики Omron та тензометричний датчик маси з 24-бітним модулем АЦП HX711;
- виконавчий пневматичний механізм на базі циліндра та розподільної апаратури Metal Work Pneumatic.

Далі було складено структурну схему та описано послідовність виконання дій системою для формування розуміння логіки роботи системи та принципів її проєктування, збирання та експлуатації.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

На наступному етапі був проведений пневматичний розрахунок необхідних компонентів та підбір електричного та пневматичного обладнання, яке задовольнятиме отримані параметри.

На четвертому етапі було зроблено повну 3Д модель стенду для візуалізації та кращого розуміння його будови. Ще були складені пневматична схема підключення обладнання та електросхема, яка поєднує всі три контролери в одну систему.

На п'ятому етапі було складено повний детальний технологічний процес виготовлення кронштейна для кріплення оптичного датчика. Він включає в себе розгляд 3Д моделі, вибір матеріалу та заготовки, підбір інструменту та оснащення й побудова послідовності обробки заготовки.

Наостанок проведено аналіз проблем та потенційних небезпек, які можуть виникнути в процесі експлуатації обладнання. Розроблено рекомендації для тих хто буде взаємодіяти зі стендом для захисту їх здоров'я та життя.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Історія промисловості в Україні // Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Історія_промисловості_в_Україні (дата звернення: 01.06.2026).
2. Трегуб В. М. Автоматизація виробничих процесів. Київ, 2015. 345 с.
3. Промислова революція // Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Промислова_революція (дата звернення: 15.05.2026).
4. Базові технології Індустрії 4.0 // Науково-практична конференція КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: <https://confmanagement-proc.kpi.ua/article/view/329464> (дата звернення: 25.05.2026).
5. Ромашко О. М. Інтернет речей та кіберфізичні системи у сучасному виробництві / О. М. Ромашко [та ін.] // Вісник машинобудування. 2021. № 4. С. 45–52.
6. Штучний інтелект та машинне навчання в робототехніці // Robotics & Automation News. URL: <https://roboticsandautomationnews.com/> (дата звернення: 20.05.2026).
7. Ткач М. В. Цифрові двійники: віртуальне моделювання виробничих систем. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 120 с.
8. Технології 3D-друку: порівняння видів FDM, SLA і SLS // LBL-Corp. URL: <https://lbl-corp.com/blog/tekhnolohii-druku-3d-prynteriv-porivniannia-vydiv-fdm-sla-i-sls/> (дата звернення: 18.05.2026).
9. Коваленко В. І. Гнучкі автоматизовані виробничі системи : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 215 с.
10. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і моделювання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 113 с.
11. Guide to industrial robots // EVS Int. URL: <https://www.evsint.com/uk/guide-to-industrial-robots/> (дата звернення: 15.05.2026).
12. Писаренко Г. С., Квітко О. Л., Уманський Е. С. Опір матеріалів. Київ : Вища школа, 1993. 655 с.

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

13. SCARA robots applications // EVS Int. URL: <https://www.evsint.com/uk/scara-robots-applications-scara-robot-is-very-suitable-in-which-kind-of-operation/> (дата звернення: 03.06.2026).
14. Differences between Cartesian, Six-axis and SCARA robots // EVS Int. URL: <https://www.evsint.com/uk/differences-between-cartesian-six-axis-and-scara-robots/> (дата звернення: 03.06.2026).
15. Franka Emika Panda 7-axis articulated arm // Smart Institute. URL: <https://smartinstitute.ca/equipment-devices/franka-emika-panda-7-axis-articulated-arm/> (дата звернення: 03.06.2026).
16. Носко С. В. Проектування гідро- та пневмоприводів. Курс лекцій. Частина 1. Проектування пневмоприводів : навч. посіб. / уклад. С. В. Носко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 111 с.
17. SIMATIC S7-1200 Controllers // Siemens. URL: <https://www.siemens.com/uk-ua/products/simatic/s7-1200-g2/> (дата звернення: 03.05.2026).
18. Гідроприводи та гідропневмоавтоматика : підручник / В. О. Федорець, М. Н. Педченко, В. Б. Струтинський [та ін.] ; за ред. В. О. Федорця. Київ : Вища школа, 1995. 463 с.
19. Палагін О. В. Мікроконтролери: архітектура та програмування. Київ : Наукова думка, 2020. 310 с.
20. Мікроконтролери серії Microchip Technology ATmega // Космодром. URL: <https://kosmodrom.ua/news/mikrokontroleri-seriji-microchip-technology-atmega-v-nayavnosti-na-skladi-elektronnih-komponentiv-u-harkovi.html> (дата звернення: 05.06.2026).
21. Мікроконтролери та компоненти електроніки // DIY Shop. URL: <https://diyshop.com.ua/ua/microcontroller> (дата звернення: 05.06.2026).
22. Raspberry Pi Foundation // Official Website. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (дата звернення: 05.06.2026).
23. PLC vs Microcontroller Comparison Guide // PLC Programming. URL: <https://plcprogramming.io/blog/plc-vs-microcontroller-comparison-guide> (дата звернення: 05.06.2026).

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

- 24.ДСТУ ІЕС 61131-3:2014. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування (ІЕС 61131-3:2013, IDТ). Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.
- 25.Automation Pyramid and Industrial Networks // ІАТІ. URL: <https://ijatr.polban.ac.id/ijatr/article/view/103> (дата звернення: 05.06.2026).
- 26.Пупена О. М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизації : навч. посібник. Київ : Ліра-К, 2021. 412 с.
- 27.Соколов О. І. Гідро- та пневмоприводи верстатів і роботизованих комплексів : навч. посібник. Харків : НТУ «ХП», 2018. 280 с.
- 28.Буслов В. К. Проектування об'ємних пневмоприводів : конспект лекцій. Київ : НТУУ «КП», 2006. 108 с.
- 29.Metal Work Pneumatic ISO 6432 Mini Cylinders Series 113 // Metal Work. URL: <https://www.metalwork.it/> (дата звернення: 10.05.2026).
- 30.Festo MFH, VUVS and GRLA Pneumatic Valves // Festo Catalogue. URL: <https://www.festo.com/cat/> (дата звернення: 10.05.2026).
- 31.Festo Air Nozzles and Vacuum Technology // Festo Support Portal. URL: <https://www.festo.com/net/SupportPortal/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 32.Franka Emika Panda Collaborative Robot Datasheet // Franka Emika. URL: <https://www.franka.de/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 33.SIMATIC S7-1200 Controllers and PM1207 Power Supply // Siemens AG. URL: <https://www.siemens.com/uk-ua/products/simatic/s7-1200-g2/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 34.SIMATIC S7-1200 Programmable controller System Manual // Siemens AG. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf (дата звернення: 05.06.2026).
- 35.Arduino Nano ESP32 ABX00083 Datasheet // Arduino Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 36.Festo SMT-10M Proximity Sensor and SOEC-RT Color Sensor // Festo Catalogue. URL: <https://www.festo.com/cat/> (дата звернення: 05.06.2026).

					ДП.МА2202.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

- 37.M12JG-30N1-B-NPN-O Photoelectric Sensor Specifications // Industrial Automation Sensors. URL: <https://www.ia.omron.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 38.CAS BCL Load Cell Technical Manual // CAS Corporation. URL: <https://www.globalcas.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 39.HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter Datasheet // Avia Semiconductor. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf (дата звернення: 05.06.2026).
- 40.MEAN WELL DDR-15 Series DIN Rail Power Supply // MEAN WELL. URL: <https://www.meanwell.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 41.Mini Belt Conveyors for Automation // Robot Pi Shop. URL: <https://robotpishop.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 42.Довідник технолога-машинобудівника : у 2-х т. / під ред. А. М. Дальського. Київ : Техніка, 2010.
- 43.Haas Super Mini Mill Vertical Machining Center // Haas Automation. URL: <https://www.haascnc.com/uk/machines/vertical-mills/mini-mills/models/sminimill.html> (дата звернення: 05.06.2026).
- 44.Різальний інструмент та фрези твердосплавні // Каталог FrezyCNC. URL: <https://frezycnc.in.ua/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 45.ATORN ER collet chucks and tooling systems // ATORN Tooling Catalogue. URL: <https://www.hahn-kolb.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 46.Mitutoyo Vernier Caliper and Measuring Instruments // Mitutoyo Catalogue. URL: <https://www.mitutoyo.com/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 47.Roemheld / Hilma KNC NC machine vices // Roemheld Gruppe. URL: <https://www.roemheld-gruppe.de/> (дата звернення: 05.06.2026).
- 48.Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ.
- 49.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.
- 50.ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 128 с.

					<i>ДП.МА2202.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

51.ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999.

52.Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Київ : Міненерговугілля України, 2017.

					<i>ДП.МА2202.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		