

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

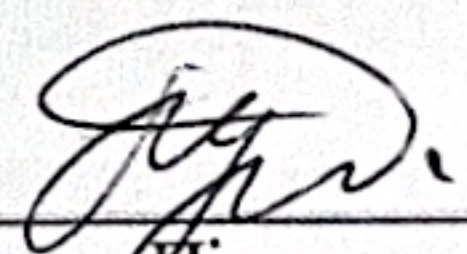
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка стенду для імітації безпечної  
роботи діляниці з роботом  
маніпулятором

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Освітня програма Робототехнічні та мехатроні системи галузі

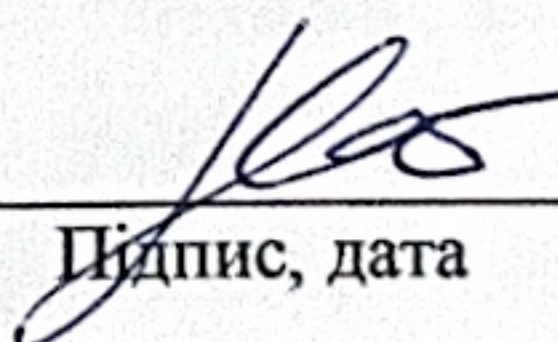
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу група РМ-21-1

  
Підпис

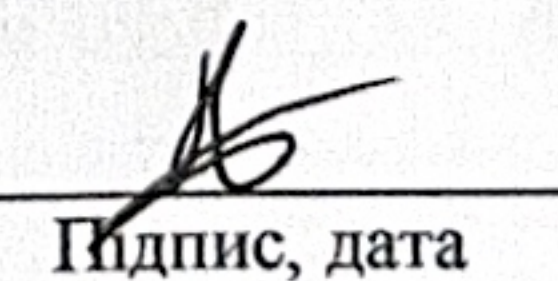
Ю.Б Гуменюк  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

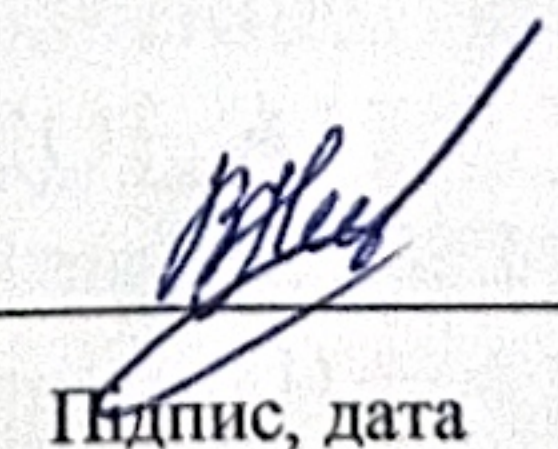
д.т.н, проф. М.Є Скиба  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

к.т.н, ст. викл. С.І. Пундик  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

к.т.н, доцент В.С Неймак  
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Рівень вищої освіти перший (бакалавр)  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Освітня програма Робототехнічні та мехатроні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

2 . 02 . 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гуменюк Юрій Богданович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка стенду для імітації безпечної роботи дільниці з роботом маніпулятором

Керівник роботи Скиба Микола Єгорович д.т.н., проф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 . 02 . 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи на кафедру 2 06.25

3. Вихідні дані до роботи характеристики робота маніпулятора та конвеєрної стрічки

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Теоретичні основи організації безпеки в роботизованих системах.

2. Конструктивне проектування та моделювання навчального стенду. 3. Оцінка міцності конструкції методом аналітичного та комп'ютерного моделювання.

Висновки. Перелік джерел посилань.

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

1. Класифікація промислових роботів(ДО1, А1). 2. Типи запобіжних пристроїв

(ДО2, А1). 3. Маніпулятор Niryu One Simplifie (B31, A1). 4. Конвеєр (B32, A1).

5. Двері стенду (СК1, А1). 6. Зборка стенду (B3, A1).

### 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

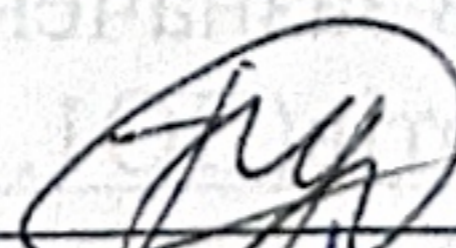
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

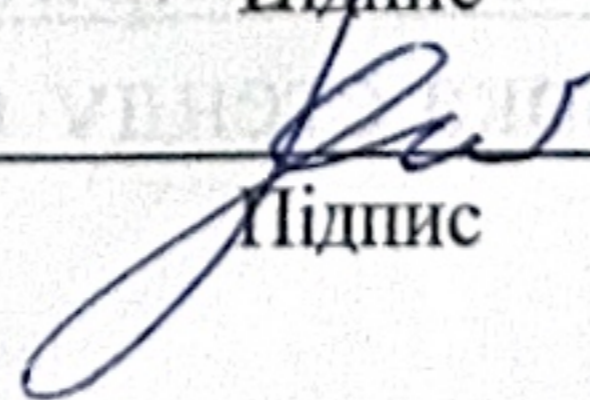
### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд теоретичних основ організації безпеки в роботизованих системах		
2. Розробка креслень стенду		
3. Розрахунок міцності конструкції		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент(ка)

Керівник роботи

  
Підпис

  
Підпис

Ю.Б Гуменюк

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

М.Є Скиба

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Рівень вищої освіти перший (бакалавр)  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування  
Освітня програма Робототехнічні та мехатроні системи галузі

## АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Гуменюк Юрій Богданович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

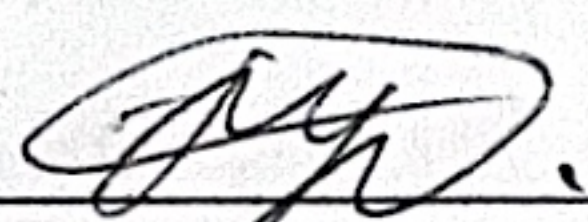
Тема роботи Розробка стенду для імітації безпечної роботи дільниці з роботом маніпулятором

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента \_\_\_\_\_

2. Обсяг магістерської роботи: креслень 6 арк, сторінок записки 62

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

У першому розділі досліджено теоретичні основи безпеки в роботизованих системах, зокрема розвиток автоматизації, функціональна безпека при роботі з маніпуляторами та технічні характеристики робота Nigo One Simplifié. У другому розділі подано конструктивну частину: вибір матеріалів, побудова каркасу, розміщення елементів безпеки та організація робочого простору. У третьому розділі зроблена оцінка міцності конструкції шляхом аналітичного й комп'ютерного моделювання, аналізу напружень та визначення коефіцієнта запасу міцності. Здійснено складальне креслення та зібрання всіх частин конструкції. Описано окремі елементи конструкції та розроблено загальне креслення виробу

Підпис студента 

" 2 " 06 20 25 р.


### РІШЕННЯ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ:

Протокол 5 від 30 06 20 25 р.

Оцінка роботи ЕК 5,0/A

Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес

Особливі відмітки —

Технічний секретар 

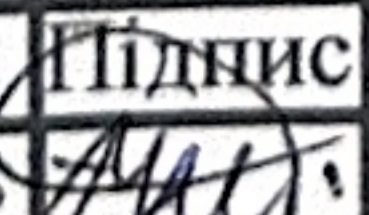
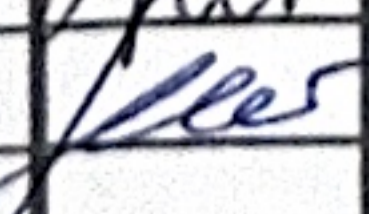
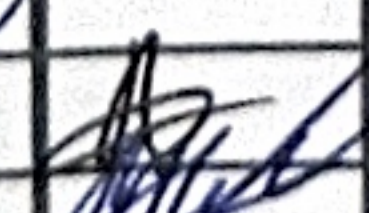

Підпис

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 30 " 06 20 25 р.

## Зміст

	стор.
Вступ .....	5
1. Теоретичні основи організації безпеки в роботизованих системах.....	8
1.1. Розвиток промислової автоматизації та робототехніки .....	8
1.2. Засоби забезпечення функціональної безпеки при роботі з маніпуляторами .....	13
1.3. Структура та функціональні можливості Niryu One Simplifié .....	18
Висновок до першого розділу .....	21
2. Конструктивне проектування та моделювання навчального стенду .....	22
2.1. Вибір конструкційної основи та матеріалів .....	22
2.2. Елементи безпеки .....	23
2.3. Елементи кріплення.....	27
2.4. Організація робочого простору для робота та конвеєрної системи .....	29
2.5. Побудова каркасу стенду з профілю 30×30 мм .....	30
2.6. Розробка вузлів кріплення дверей, замків, завіси.....	31
2.7. Розміщення маніпулятора Niryu One Simplifié та конвеєра.....	34
Висновок до другого розділу .....	36
3. Оцінка міцності конструкції методом аналітичного та комп'ютерного моделювання.....	37
3.1. Аналітичний розрахунок.....	37
3.2. Програмний розрахунок .....	44
3.3. Аналіз напружень і визначення коефіцієнта запасу міцності.....	51
Висновок до третього розділу.....	52
Висновки .....	53
Перелік джерел посилань .....	54
Додатки .....	.....

БРМА 25.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Розробив Гуменюк Ю.Б.		
		Перевірив Скиба М.Є		
		Реценз.		
		Н.контр. Пундик С.І		
		Затверд. Неймак В.С		
Розробка стенду для імітації безпечної роботи дільниці з роботом маніпулятором			Літера	Аркуш
			4	62
ХНУ гр. РМ-21-1				

## Вступ

Сучасна індустрія швидко змінюється завдяки впровадженню автоматичних та робототехнічних систем, переходячи від ручних методів до інтегрованих систем з мінімальним втручанням людини. Важливими елементами таких систем є промислові роботи-маніпулятори, які застосовуються для складальних, транспортних, зварювальних, пакувальних операцій тощо. Зі зростанням автоматизації особливо актуальним стає питання безпеки при роботі з роботами.

Безпека спільної роботи людини і робота критична, адже порушення алгоритмів або просторового розташування можуть спричинити аварії, травми або пошкодження обладнання. Тому міжнародні стандарти, як ISO 10218-1, ISO 10218-2 і ISO/TS 15066, визначають вимоги до проєктування і експлуатації роботизованих систем у колаборативному середовищі. Велику роль відіграють методи функціональної безпеки — використання апаратних і програмних засобів виявлення аномалій, аварійної зупинки, логіки безпечного керування та зонування робочого простору.

Вивчення безпечної інтеграції роботів у виробництво потребує практичної бази для відтворення реальних сценаріїв, тестування алгоритмів та методів захисту, а також моделювання аварій. Такий стенд формує професійні компетенції і слугує засобом дослідження засобів захисту й автоматизованого моніторингу стану систем.

Метою роботи є розробка стенду для імітації безпечної роботи з роботом-маніпулятором, інтеграція апаратно-програмних засобів контролю та відповідність вимогам безпеки, з можливістю використання у навчальних лабораторіях і дослідженнях. Обрано робота Niryo One Simplifié, який завдяки модульній конструкції зручний для демонстрацій та адаптації.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Основні завдання: аналіз теоретичних основ безпеки; вивчення конструкції маніпулятора; вибір матеріалів і елементів для стенду; проектування каркасу, робочої зони з урахуванням безпеки; створення САД-моделі; аналітичний і програмний розрахунок міцності; обґрунтування практичної доцільності конструкції. Методи дослідження включають аналіз нормативної документації, комп'ютерне моделювання, інженерні розрахунки навантажень, порівняння конструктивних рішень, системний підхід і моделювання сценаріїв з врахуванням функціональної безпеки.

Об'єкт дослідження — роботизована дільниця з маніпулятором, конвеєром, робочою зоною і допоміжними конструкціями.

Практична цінність полягає у використанні стенду як навчального комплексу для студентів технічних спеціальностей і тестового середовища для перевірки алгоритмів безпечної взаємодії у реальному чи напівреальному часі. Модульність конструкції дозволяє адаптувати стенд під різні типи роботів та розширювати його додатковими датчиками, камерами, контролерами.

Структура роботи включає три розділи: теоретичний (безпека в робототехніці, характеристики Niryu One), конструктивний (вибір матеріалів, каркас, елементи безпеки та організація простору) і аналітичний (оцінка міцності через моделювання, аналіз напружень, запас міцності). Роботу завершують висновки, список літератури і додатки з кресленнями та розрахунками.

Таким чином, дипломна робота спрямована на створення універсального стенду для вивчення, моделювання і забезпечення безпечної експлуатації роботизованих систем у навчальних і промислових умовах.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

# 1. Теоретичні основи організації безпеки в роботизованих системах

## 1.1 Розвиток промислової автоматизації та робототехніки

Використання роботів у промисловості розпочалося трохи більше ніж п'ятдесят років тому — це зовсім незначний період з точки зору історії, проте сьогодні важко уявити сучасне виробництво без автоматизованих конвеєрів і металевих роботизованих маніпуляторів. [20].

Сучасні промислові роботи стали значно розумнішими та більш універсальними, ніж їхні попередники. Вони здатні скорочувати виробничий цикл і раціональніше використовувати ресурси. Сьогодні роботизовані системи можна налаштувати так, що зранку вони виконують одну задачу, а до кінця зміни — зовсім іншу. Така гнучкість особливо цінна на виробництвах із невеликими обсягами та різноманітними технологічними операціями.

Попит на промислову робототехніку постійно зростає. За даними Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics), у світі наразі функціонує рекордна кількість — 2,7 мільйона промислових роботів. Це на 12 % більше порівняно з попереднім роком, що свідчить про стійке зростання галузі. Саме тому дана тема дослідження є надзвичайно актуальною. Очікується, що промислові роботи відіграватимуть ключову роль в автоматизації, забезпечуючи значний економічний ефект. За даними опитувань, 88 % респондентів планують збільшити інвестиції у сферу промислової робототехніки, що повністю відповідає тенденціям, зафіксованим у звітах IFR за останні роки. Основними причинами активного інвестування є прагнення знизити виробничі витрати, підвищити гнучкість технологічних процесів та покращити ефективність праці.

Промислові роботи зазвичай класифікують за двома основними критеріями. Перший — це тип управління. Напівавтономні роботи виконують дії строго відповідно до задалегідь заданої програми.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Вони, як правило, не мають сенсорів, не здатні самостійно змінювати свою поведінку та потребують участі оператора для корекції або контролю. Повністю автономні роботи, навпаки, функціонують без постійної участі людини. Завдяки вбудованим алгоритмам вони можуть адаптувати свої дії до змін у середовищі та самостійно вносити корективи під час роботи. Такі роботи зазвичай повністю покривають свою робочу зону на виробничій лінії, ефективно замінюючи ручну працю.

Другий критерій класифікації — сфера застосування. Сучасні промислові роботи використовуються для виконання таких завдань, як фарбування, зварювання, складання, палетування, пакування, маркування, контроль якості, випробування продукції та обробка матеріалів.

Серед поширених типів індустріальних роботів варто виділити декартові або порталні роботи. [3]. Вони мають прямокутну конфігурацію й оснащені трьома лінійними осями, по яких здійснюється рух завдяки призматичним з'єднанням. Деякі моделі додатково обладнані обертовим зап'ястям, що забезпечує додаткову маневреність. Завдяки своїй конструктивній простоті й гнучкості в налаштуванні, декартові роботи активно використовуються в різних галузях промисловості. Вони підходять для виконання таких операцій, як завантаження та розвантаження матеріалів, складання й розбирання компонентів, обробка матеріалів, нанесення клею, а також робота з ядерними речовинами.

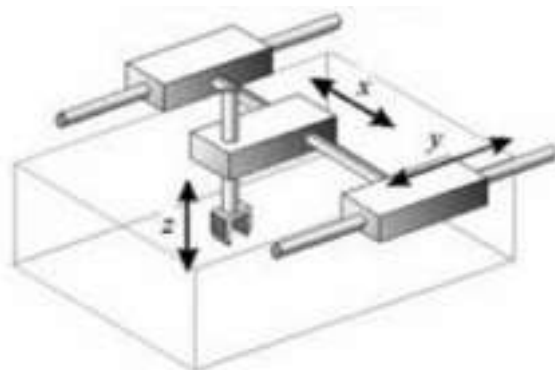


Рисунок 1.1 - Декартовий робот

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис						

*БРМА 25.00.00.000 ПЗ*

Роботи типу SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm — вибірково-гнучкий монтажний робот) мають робочу зону у формі тора та побудовані з двох паралельних з'єднань, які дозволяють рухатися в одній вибраній площині. Вертикально розташовані обертові осі забезпечують вертикальну стабільність, тоді як виконавчий орган, закріплений на кронштейні, виконує горизонтальні переміщення. SCARA-роботи призначені переважно для виконання бокових рухів, тому найчастіше застосовуються в складальних операціях. У порівнянні з циліндричними та декартовими роботами, SCARA-маніпулятори забезпечують вищу швидкість і спрощене впровадження в робочі процеси (рис. 1.2).

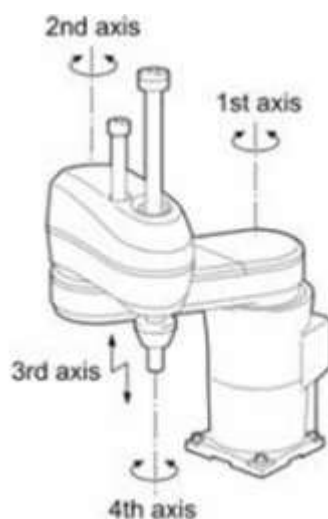


Рисунок 1.2 - Робот SCARA

SCARA-роботи застосовуються в таких процесах, як обробка напівпровідникових пластин, пакування продукції, палетування, а також для автоматизованого завантаження обладнання.

Шарнірні роботи, за своєю конструкцією, нагадують людську руку, що забезпечує їм високу гнучкість при роботі як на горизонтальних, так і на вертикальних площинах (рис. 1.3). Їх компактний дизайн і висока швидкість переміщення сприяють підвищенню загальної продуктивності та забезпечують

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



Завдяки цим можливостям, роботи з циліндричною конфігурацією широко застосовуються в процесах лиття під тиском, автоматизованому завантаженні й розвантаженні обладнання, а також при нанесенні покриттів.

Серед сучасних тенденцій розвитку промислової робототехніки можна виділити кілька ключових напрямів. Перш за все, активно розвивається сегмент безпечних колаборативних роботів — коботів.

Якщо традиційні промислові маніпулятори найчастіше використовувалися в автомобільній промисловості та виконували одне завдання на конвеєрі, то коботи мають більш гнучку функціональність. Вони можуть легко переналаштуватися на нові завдання, що раніше виконувалися людьми. До переваг коботів належать не лише багатофункціональність і адаптивність, а й доступна ціна та короткий період окупності. Водночас, на відміну від класичних роботів, коботи спроектовані з урахуванням безпеки людини, що дозволяє їм працювати поруч із працівниками без необхідності фізичних бар'єрів.

Ще одним важливим напрямом розвитку є використання систем машинного зору. В умовах автоматизованого виробництва часто необхідна висока точність розпізнавання та позиціонування об'єктів. [8]. У цьому випадку цифрові камери фіксують зображення заготовок у робочій зоні, програмне забезпечення обробляє отриману інформацію, після чого робот виконує відповідні дії. Машинний зір дозволяє автоматизувати процес контролю складання, здійснювати підрахунок об'єктів, вимірювати параметри деталей та виконувати інші точні завдання. [2].

Не менш значущою є інтеграція технологій штучного інтелекту та машинного навчання, які надають роботам здатність до самонавчання, аналізу середовища й адаптивного реагування на зміни. [14]. Завдяки цьому промислові роботи поступово переходять від заздалегідь запрограмованих сценаріїв до більш автономної поведінки, що розширює сфери їхнього застосування.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Поряд із технічним прогресом виникає потреба в забезпеченні кібербезпеки. Хоча основна увага зазвичай зосереджується на фізичній безпеці взаємодії людини й робота, не менш важливо захистити інформаційне середовище, у якому працюють ці пристрої. Часто роботи мають доступ до Інтернету, наприклад, для оновлення програмного забезпечення, що відкриває потенційні ризики кібератак. Недостатній рівень захисту внутрішніх мереж підприємств також може створити загрозу. [1].

Тому сьогодні спостерігається тенденція до розвитку й зміцнення кіберзахисту у сфері промислової автоматизації.

У підсумку, аналізуючи основні типи промислових роботів, зокрема декартові, SCARA, шарнірні та циліндричні, можна зробити висновок, що вони виконують здебільшого рутинні, небезпечні або некваліфіковані завдання. Це, з одного боку, може призвести до скорочення чисельності персоналу на окремих виробництвах, а з іншого — значно зменшує ризик травматизму серед працівників. Розглянуті типи роботів є найбільш поширеними у міжнародній промисловій практиці, а виявлені тенденції відображають динамічний розвиток галузі сучасних систем промислової робототехніки.

## 1.2 Засоби забезпечення функціональної безпеки при роботі з маніпуляторами

Основним чинником, який визначає доцільність впровадження роботизованих комплексів у виробництво, є досягнення економічної вигоди від їх застосування. Для цього необхідно обґрунтовано вирішити весь спектр завдань на всіх етапах впровадження. Ефективне використання роботизованих систем має вирішальне значення для сучасної промисловості, оскільки позитивно впливає на продуктивність, якість продукції, безпеку праці та загальну конкурентоспроможність підприємств. Застосування таких комплексів сприяє кращому використанню виробничих ресурсів і підвищенню

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



Інтелектуальні системи управління, такі як ERP, MES і SCADA, [13] забезпечують контроль виробництва в реальному часі.

Широко впроваджуються й адитивні технології, зокрема 3D-друк, який спрощує виготовлення прототипів та деталей.

Особливу увагу приділяють екологічній стійкості: підприємства зменшують споживання ресурсів, впроваджують технології зниження викидів, переходять на відновлювані джерела енергії та використовують замкнуті цикли виробництва для мінімізації відходів.

Глобалізація та децентралізація також впливають на промисловість. Завдяки хмарним технологіям можливе дистанційне управління виробництвом, а виробничі ланцюги стають гнучкішими й здатними швидко реагувати на зміни ринку. Зростає й попит на масове виробництво з елементами індивідуалізації для задоволення потреб конкретних споживачів.

Детальний перелік параметрів і функцій роботизованих систем подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Перелік параметрів і функцій роботизованих систем

Параметр	Опис
Ефективність	Відображає рівень продуктивності, оптимального використання ресурсів і мінімізації витрат при досягненні поставлених цілей у виробничих процесах
Коштовність	Оцінка загальних фінансових витрат на впровадження, обслуговування та модернізацію технологій, включаючи роботизовані системи та автоматизацію
Якість	Відповідність продукції або процес за встановленими стандартами та вимогами, що забезпечує надійність, довговічність і конкурентоспроможність товарів
Роботизовані системи	Автоматизовані технологічні комплекси, що використовують роботів для виконання виробничих завдань з



Ці числові показники наведені для загального уявлення про потенційні переваги впровадження роботизованих систем у виробництво приладів. [6]. Конкретні результати можуть відрізнятись залежно від особливостей виробництва, ступеня автоматизації та використаних технологій.

Використання роботів у виробництві суттєво підвищує ефективність, знижує витрати та покращує якість продукції. Попри необхідність початкових інвестицій, у довгостроковій перспективі роботизація виправдовує себе завдяки зростанню продуктивності, зменшенню кількості браку й оптимізації витрат.

Таким чином, сучасна індустріалізація трансформує традиційні виробничі процеси, роблячи їх розумнішими, більш ефективними, автоматизованими та екологічно безпечними.

Впровадження новітніх технологій допомагає підприємствам зберігати конкурентоспроможність, оперативно реагувати на зміни ринку та підвищувати якість продукції, що в підсумку сприяє розвитку світової економіки.

Засоби функціональної безпеки під час роботи з роботизованими маніпуляторами відіграють ключову роль у забезпеченні надійної та безпечної взаємодії між людиною і технічними засобами в умовах сучасного виробництва. Роботизовані системи, зокрема маніпулятори, виконують широкий спектр складних завдань з високою точністю і швидкістю, що, водночас, підвищує рівень потенційного ризику при порушенні їх роботи або при втручанні оператора. Функціональна безпека охоплює комплекс апаратних і програмних заходів, спрямованих на запобігання небезпечним ситуаціям і мінімізацію шкоди в разі їх виникнення. [17]. Принцип захисту в таких системах ґрунтується на багатоетапному моніторингу стану пристроїв, реалізації функцій аварійної зупинки, контролю логіки виконання операцій та дотриманні параметрів безпечного простору роботи. Основним елементом такого захисту є програмовані логічні контролери (ПЛК) з підтримкою

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

безпечних протоколів, які відстежують усі сигнали від сенсорів, світлових бар'єрів, вимикачів та інших пристроїв. [5]. У разі виявлення порушення алгоритму, перевищення меж швидкості, навантаження чи вторгнення людини в робочу зону, система негайно виконує зупинку маніпулятора відповідно до заздалегідь визначених сценаріїв. Ефективне запобігання аварійним ситуаціям також забезпечується за рахунок використання динамічного моделювання ризиків, зонування робочої області, встановлення фізичних бар'єрів, застосування сенсорів присутності, інтегрованих модулів діагностики та регулярної перевірки працездатності засобів захисту. [11]. Надзвичайно важливою є інтеграція апаратного і програмного рівнів, що дозволяє створити гнучкі й адаптивні системи реагування на потенційні загрози.

Контроль доступу до системи, авторизація користувачів, обмеження доступу до конфігурації, ведення журналу подій та дистанційне відстеження параметрів роботи також є невід'ємними складовими функціональної безпеки. Застосування міжнародних стандартів, таких як ISO 10218-1 та ISO 10218-2, регламентує вимоги до проєктування, експлуатації та технічного обслуговування промислових роботів, встановлює межі безпечної відстані, швидкості, сили контакту, а також вимоги до систем з аварійною зупинкою та функцій самодіагностики.

Додатково, стандарт ISO/TS 15066, орієнтований на колаборативну робототехніку, визначає допустимі межі фізичної взаємодії між людиною та роботом, враховуючи параметри тиску, контакту і часу впливу, що особливо актуально при застосуванні роботів у спільному з людьми робочому просторі. Дотримання цих стандартів дозволяє не лише знизити ризики травмувань, а й забезпечити високу ефективність та надійність роботизованих систем у виробничому середовищі. [16].

### 1.3 Структура та функціональні можливості Niryo One Simplifie

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Niryo One Simplifie — це спрощена версія навчального робота Niryo One, створена для ознайомлення з основами робототехніки, автоматизації та програмування. Конструктивно робот побудований на базі шести ступенів свободи, що дозволяє йому виконувати широкий спектр рухів, наближених до дій справжніх промислових маніпуляторів. Його структура складається з рухомих з'єднань, сервоприводів, бази, маніпулятора та змінного захоплювача, що дозволяє працювати з різними об'єктами. Завдяки модульній конструкції, користувач може змінювати або модернізувати окремі компоненти, а використання 3D-друку робить пристрій легким, доступним і зручним для навчання.



Рисунок 1.5 - Niryo One Simplifie

У функціональному плані Niryo One Simplifie підтримує керування через спеціальне програмне забезпечення, веб-інтерфейс або зовнішні пристрої — зокрема через Arduino чи Raspberry Pi. Він сумісний із популярними мовами програмування, такими як Python, та підтримує інтерфейс ROS (Robot Operating System), що дозволяє вивчати складні алгоритми керування, зворотну кінематику, машинне бачення та інші аспекти сучасної

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

робототехніки. Робот може навчатися послідовності дій, відтворювати їх, а також бути інтегрованим у моделювання виробничих процесів. Завдяки відкритому програмному середовищу та доступній документації, він є чудовим інструментом для викладання та самостійного вивчення, оскільки дозволяє досліджувати основи автоматизації у реальних умовах без необхідності використання дорогого промислового обладнання.

Niryo One Simplifié поєднує простоту апаратної реалізації з широкими можливостями програмного налаштування, що робить його ефективним засобом для навчання, прототипування та експериментів у сфері робототехніки.

Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу користувача, Niryo One Simplifié дозволяє легко створювати та запускати програми, навіть тим, хто не має попереднього досвіду в програмуванні.

Це особливо важливо для освітніх закладів, де учні та студенти можуть зосередитися на вивченні основ автоматизації та логіки процесів без необхідності глибокого занурення в технічні деталі на початкових етапах. Робот підтримує режим "навчання через демонстрацію", коли користувач фізично переміщує маніпулятор у потрібні позиції, а пристрій запам'ятовує їх для подальшого відтворення. Такий підхід робить процес навчання більш наочним і зрозумілим.

Ще однією важливою особливістю Niryo One Simplifié є можливість симуляції віртуального середовища, що дозволяє тестувати програми до їхнього запуску на реальному обладнанні. Це підвищує безпеку та ефективність навчального процесу. Окрім того, робот підтримує інтеграцію з візуальними середовищами програмування, як-от Blockly або Scratch, що значно розширює його застосування в початковій технічній освіті. [7].

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

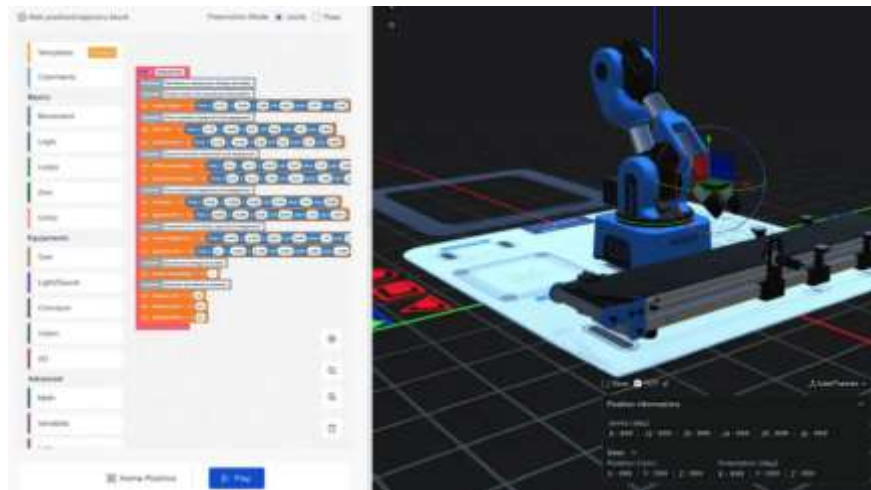


Рисунок 1.6 - Niryo One Simplifii у поєднанні з середовищем Blockly

У наукових і дослідницьких цілях Niryo One Simplifii використовується для розробки алгоритмів керування, експериментів із комп'ютерним зором, моделювання логістичних та виробничих процесів.

Також він є платформою для вивчення принципів колаборативної робототехніки, оскільки дозволяє моделювати взаємодію людини та машини в умовах невеликих лабораторій чи навчальних класів. Усе це робить Niryo One Simplifii ефективним засобом для підготовки фахівців нової технічної генерації, готових до роботи з сучасними автоматизованими системами.

#### Висновок до першого розділу

У першому розділі було розглянуто ключові аспекти, що стосуються розвитку промислової автоматизації та впровадження робототехнічних систем, зокрема в контексті забезпечення їхньої безпечної експлуатації. Проаналізовано тенденції розвитку сучасної промислової робототехніки, зокрема впровадження колаборативних роботів, систем машинного зору та штучного інтелекту, що суттєво підвищують ефективність виробництва, але водночас вимагають нових підходів до організації безпеки.

Особливу увагу приділено засобам функціональної безпеки під час роботи з роботизованими маніпуляторами. Розглянуто принципи їх захисту,

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

методи запобігання аварійним ситуаціям, важливість інтеграції апаратних і програмних засобів контролю, а також дотримання міжнародних стандартів безпеки, таких як ISO 10218 і ISO/TS 15066. Окремий підпункт присвячено структурі та функціональним можливостям навчального робота Nipro One Simplifié. Проаналізовано його конструктивні особливості, програмні інтерфейси та освітню цінність, а також потенціал для моделювання сценаріїв безпечної взаємодії людини з машиною в умовах навчального чи дослідницького середовища.

## 2. Конструктивне проектування та моделювання навчального стенду

### 2.1. Вибір конструкційної основи та матеріалів

Основою для створення навчального стенду є просторовий каркас, зображений на рисунку 2.1, виконаний у вигляді жорсткої рами з металевих профілів. У конструкції використано алюмінієвий сплав марки АД31Т5. [15]. Цей матеріал широко застосовується у машинобудуванні, при створенні навчальних та промислових стендів, зокрема завдяки зручності у збиранні та можливості багаторазового монтажу й демонтажу окремих елементів.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



можливості швидкої заміни чи модифікації, що особливо важливо в навчальному процесі, де часто виникає потреба у переналаштуванні системи.

Таким чином, вибір розмірів каркасу стенду є результатом технічного обґрунтування, спрямованого на досягнення функціональності, ергономічності, безпеки та довговічності.

## 2.2. Елементи безпеки

Важливою складовою забезпечення безпечної експлуатації навчального стенду є використання датчика світлової завіси безпеки. Світлова завіса відома своєю високою надійністю та низькими витратами на обслуговування. Вона характеризується швидким часом реагування, забезпечує стабільну роботу обладнання та знижує ризик нещасних випадків у виробничих умовах. Незалежно від того, чи застосовується вона в автоматизованих виробничих лініях, роботизованих операціях або для захисту обладнання підвищеної небезпеки, дана система є оптимальним рішенням для підвищення рівня безпеки та ефективності роботи навчального обладнання. Використання такого датчика допомагає не лише попередити травми, але й зменшує час простою обладнання завдяки оперативному виявленню порушень безпеки. [19]. Завдяки цьому підвищується загальний рівень продуктивності і забезпечується безперервність робочих процесів.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики датчика світлової завіси безпеки GTRIC LC40-12NP2. [10].

Висота захисту	1560 мм
Відстань між оптичними осями	40 мм
Робоча напруга	Постійний струм 24 В ± 20%
Опір ізоляції	≥100 МОм
Час відгуку	<10 мс

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



та чутливості, пристрій ефективно інтегрується в навчальні комплекси, дозволяючи моделювати реальні сценарії промислової безпеки й наочно демонструвати принципи захисту оператора під час роботи з обладнанням.



Рисунок 2.2 - Датчик світлової завіси безпеки GTRIC LC40-12NP2

Також, для забезпечення безпеки експлуатації навчального стенду важливу роль відіграє магнітний захисний датчик PSEN ma1.4a-50 виробництва компанії Pilz. [9]. Цей пристрій є складовим елементом системи захисту й виконує функцію контролю доступу або положення механізмів, запобігаючи несанкціонованому втручанню в зону підвищеної небезпеки.

Датчик виконаний у квадратному корпусі висотою 18 мм, обладнаний 4-контактним штекером типу M8, що забезпечує зручне підключення до системи керування.

Пристрій відповідає ступеню захисту IP6K9K, що свідчить про його високу стійкість до впливу пилу та вологи, дозволяючи експлуатувати його в умовах підвищеної складності.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



Рисунок 2.3 – Електромагнітний замок PSEN ma1.4a-50

Датчик функціонує на основі магнітного принципу дії, що означає використання постійного магніту для виявлення присутності або положення об'єкта. У конструкції датчика передбачено дві нормально розімкнуті пари контактів — тобто контакти залишаються відкритими у звичайному стані і замикаються лише при спрацюванні. [12].

Це рішення забезпечує додатковий рівень надійності в системах безпеки, адже дозволяє організувати резервування або подвійний контроль сигналів, що особливо важливо для критичних застосувань, де недопустимі помилкові спрацювання чи відмова пристрою. Датчик характеризується відстанню спрацювання у 10 мм, тобто він здатен точно реагувати на об'єкти, що наближаються до нього на таку відстань.

Це дозволяє ефективно контролювати положення рухомих частин обладнання, наприклад дверей, кришок чи захисних кожухів, і вчасно реагувати на їх зміщення. Завдяки такій чутливості пристрій надає стабільні та точні сигнали для обробки в системі автоматизації або безпеки.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Таблиця 2.2 - Технічні параметри електромагнітного замка PSEN ma1.4a-50

Принцип датчика	магнітний.
Класифікація за EN 60947-5-3	PDDb
Напруга живлення (V)	24 V
Тип напруги живлення U1	Постійний струм
Кабельні лінії	LiY11Y 4 x 0,25 мм <sup>2</sup>
Тип з'єднання	M8, 4-контактний, штирьовий
Клас захисту	IP6K9K
Навколишня температура	-10 - 55 °C
Номінальний рівень вологості	Відн. вол. 93% 40 °C

### 2.3. Елементи кріплення

У конструкції навчального стенду, який моделюється як демонстраційна платформа для вивчення принципів функціонування електромеханічних систем, важливу роль відіграють елементи кріплення. Серед них особливе місце займають кутові кріплення, які виконують функції з'єднання плоских частин корпусу під прямими або заданими кутами, забезпечуючи жорсткість, стабільність і точне позиціонування елементів конструкції у просторі. На основі представлених графічних матеріалів було змодельовано деталі кутового кріплення, що мають раціональну геометричну форму, адаптовану до умов монтажу на горизонтальні й вертикальні поверхні, а також дозволяють ефективно інтегрувати деталі у різні типи конструкцій.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

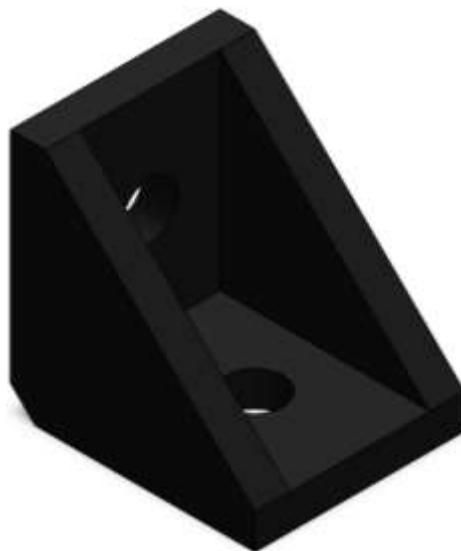


Рисунок 2.4 — Тривимірна модель кутового кріплення

Кутові кріплення виготовляються, як правило, із міцного полімерного матеріалу, що забезпечує достатній запас міцності, стійкість до механічного зносу і впливу зовнішніх чинників.

Основною особливістю цього елемента є його відповідність габаритним розмірам світлової завіси та профілю, що забезпечує універсальність та сумісність з більшістю стандартних датчиків даного типу.

Додатковою перевагою використання таких елементів кріплення є можливість багаторазового монтажу та демонтажу без втрати геометричної точності та міцності з'єднання. Це особливо важливо для навчальних цілей, оскільки стенд не є постійною конструкцією, і потребує багаторазового збирання, налаштування та модифікацій залежно від конкретного завдання або теми, що вивчається.

Кріплення датчика світлової завіси, є складовою частиною загальної системи безпеки стенду. Воно забезпечує стабільне і надійне кріплення, яке мінімізує можливість випадкового звільнення або зміщення датчика під час роботи.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

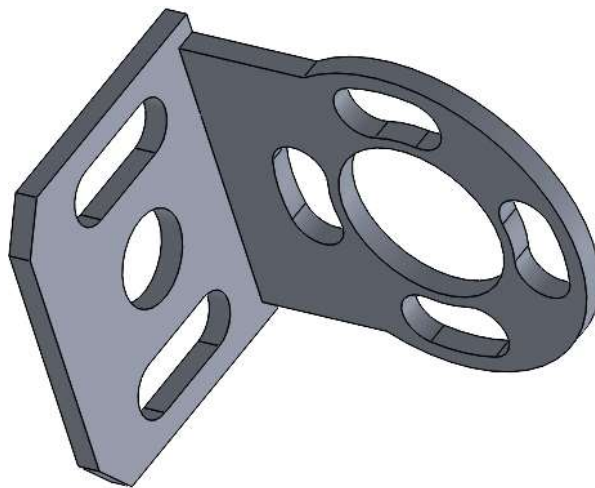


Рисунок 2.5 – 3D-модель елемента кріплення датчика світлової завіси безпеки

Вибір правильних кріпильних рішень має суттєвий вплив на надійність, довговічність і ефективність роботи системи, тому його детальне проектування та узгодженість з технічними вимогами є ключовими аспектами успішної реалізації проекту розробки стенду.

#### 2.4. Організація робочого простору для робота та конвеєрної системи

Робочий простір для робота-маніпулятора і конвеєра організований у компактному режимі. Ближче до світлової завіси розміщено механізм конвеєра, який виконує транспортування заготовок або деталей до робочої зони для обробки або збірки, далі за ним розташований маніпулятор. Конвеєр фіксується до площини за допомогою спеціальних ніжок та гвинтів, які забезпечують точне позиціонування відносно отворів на площині каркасу. Маніпулятор прикріплений до перехідних частин з профілю 20x60 зображених на рисунку 2.6, а ті в свою чергу кріпляться до пазів площини каркасу стенду.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис						

*БРМА 25.00.00.000 ПЗ*

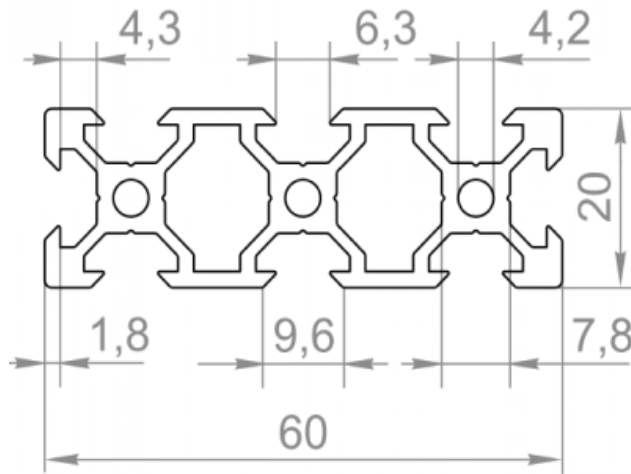


Рисунок 2.6 – Креслення верстатного профілю 20x60

Розташування робота-маніпулятора виділено так, щоб він міг працювати без обмежень у просторі, виконуючи операції з високою точністю, з врахуванням його обертальних і поступальних рухів. Розміри робочої зони оптимізовані для забезпечення максимальної ефективності рухів робота.

Передбачена можливість швидкого внесення змін у розташування або конфігурацію системи без необхідності руйнувати структуру або витратити додаткові матеріальні ресурси.

Важливо відзначити, що організація робочого простору враховує можливість інтеграції з додатковими системами автоматизації, моніторингу та управління. Це дозволяє створити єдине керуюче середовище, яке координує роботу робота, конвеєра та систем безпеки.

## 2.5. Побудова каркасу стенду

Конструктивною основою стенду - є алюмінієвий профіль з перерізом 30×30 мм, форма якого детально зображена на рисунку 2.7. Такий тип профілю є стандартним у модульних конструкціях і широко застосовується у створенні лабораторного та виробничого обладнання, завдяки своїй універсальності, міцності та простоті у збиранні.



## 2.6. Розробка вузлів кріплення дверей, замків, завіси

Частина, що виконує функцію кріплення дверної рами до основного каркасу стенду, реалізована петлями які складаються з трьох частин. Їхня геометрія продумана таким чином, щоб забезпечити міцну фіксацію і безпечне відкривання дверей.

Передбачені отвори для закріплення гвинтами, що дозволяє швидко і зручно проводити монтаж і демонтаж вузла. Вона має достатню жорсткість і міцність, щоб витримувати механічні навантаження при частому відкриванні і закриванні дверей, а також при можливих ударах або вібраціях. Крім того, ця частина обладнана фіксуючим елементом, що запобігає випадковому сповзанню або розсуванню, забезпечуючи стабільність у роботі.

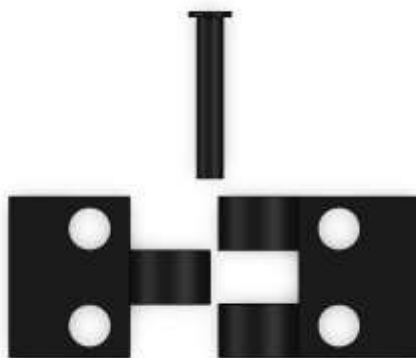


Рисунок 2.8 – 3-D моделі вузла кріплення дверей, що складається з трьох частин



Рисунок 2.9 - Вигляд вузла кріплення дверей на конструкції у SolidWorks

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Об'єднання трьох частин у єдину конструкцію дозволяє досягти високої міцності і надійності у роботі. Застосування такого вузла кріплення здатне гарантувати довгострокову експлуатацію без необхідності частих ремонтних робіт і замін. Крім того, конструкція передбачає можливість регулювання положення дверей у процесі експлуатації, що полегшує їх відкривання і забезпечує безпечний доступ до внутрішніх компонентів стенду, включаючи датчики та аварійні механізми. Таке рішення також сприяє підвищенню рівня безпеки і мінімізує ризики випадкових травм чи ушкоджень під час роботи стенду.

Важливою перевагою є можливість швидко й легко проводити ремонт або технічне обслуговування, оскільки конструкція передбачає простоту розбірки і збирання без використання складної інструменту. Крім того, застосування сучасних матеріалів і технологій обробки дозволяє підвищити зносостійкість вузла і знизити його вагу, що сприяє більш комфортному експлуатаційному процесу і зменшенню навантажень на монтажні конструкції стенда.

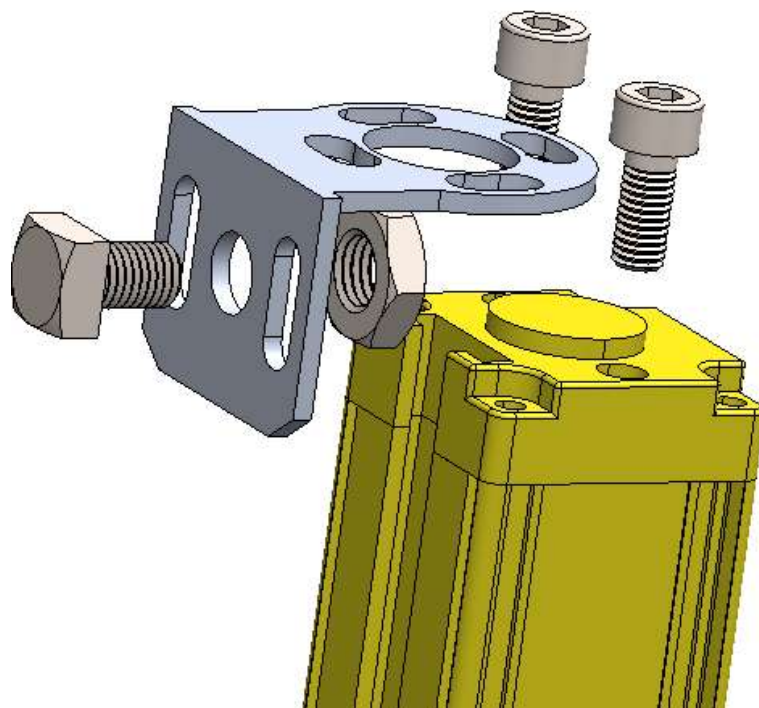


Рисунок 2.10 - Вигляд вузла кріплення світлової завіси у SolidWorks

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис						

*БРМА 25.00.00.000 ПЗ*

Далі варто розглянути важливе питання розробки та конструктивного оформлення вузла кріплення світлової завіси, який є одним із ключових елементів системи безпеки на навчальному стенді для імітації роботи ділянки з роботами-маніпуляторами. На представленому рисунку 2.11 зображено тривимірне моделювання вузла, що дозволяє детально проаналізувати його конструктивні особливості та зручність монтажу. Основною ідеєю є створення універсального та міцного кріплення, яке забезпечує надійну фіксацію датчика світлової завіси у потрібному положенні для своєчасного реагування системи безпеки при порушенні меж робочої зони.

Кріпильна пластина містить отвір під болти з квадратною шляпкою, що забезпечує швидку та міцну фіксацію.

Так само у неї передбачені отвори для регулювання положення датчика, що дозволяє налаштувати його точне розташування залежно від вимог до меж роботи та урахування специфіки виробничого процесу.

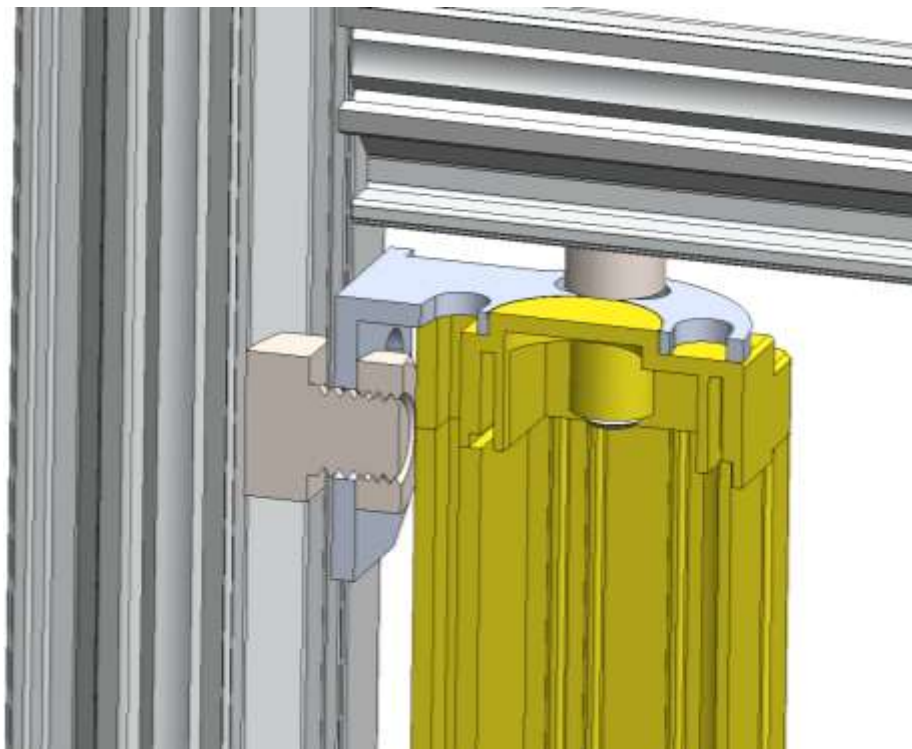
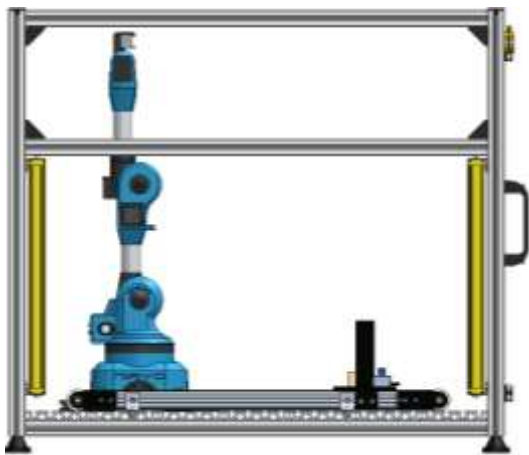


Рисунок 2.11 – Вигляд у розрізі вузла кріплення світлової завіси до конструкції

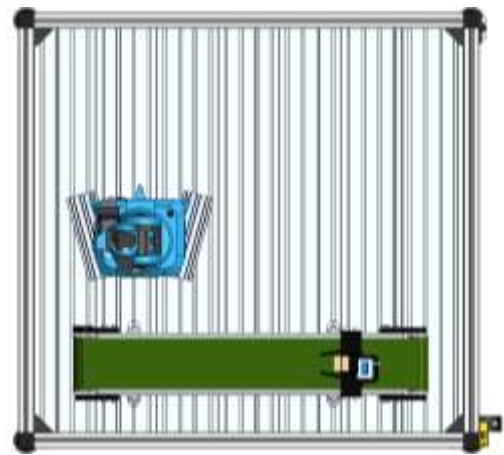
					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## 2.7. Розміщення маніпулятора Niryo One Simplifie та конвеєра

Маніпулятор встановлений у передній частині стенду, що дозволяє йому мобільно виконувати операції з обробки об'єктів на робочій області. На рисунку 2.12 видно, що маніпулятор закріплений на платформах з профілю 20x60, яка фіксується до площини каркасу, що забезпечує стабільність. Схема розміщення показана у графічній частині роботи [БРМА 25.00.00.000 ВЗ]



а) фронтальний вигляд з установки



б) вигляд зверху

Рисунок 2.12 - Розміщення маніпулятора та конвеєрної стрічки у робочій зоні стенду

Конвеєр, розташований перед маніпулятором, виконує функцію транспортування об'єктів до робочої зони та їх вивантаження після обробки, що видно з малюнків, де він закріплений паралельно робочій поверхні і має відповідні механізми для переміщення продукції.

У підсумку, таке розміщення дозволяє максимально використовувати простір стенду для забезпечення безпечної та ефективної роботи системи у рамках імітації роботи безпечної ділянки з роботом-маніпулятором.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

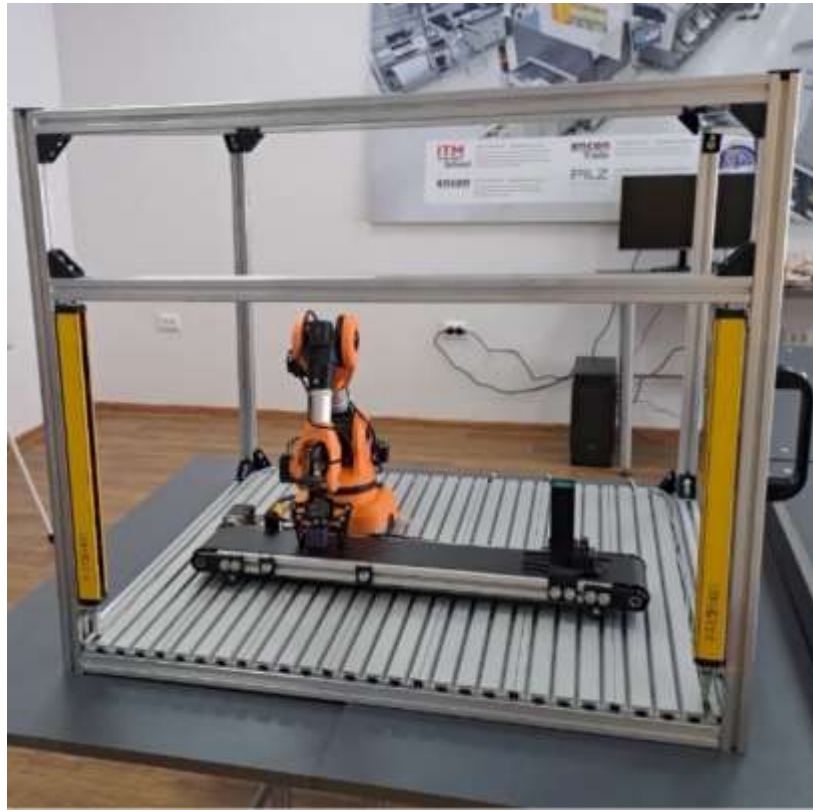


Рисунок 2.13 – Вигляд стану наживо

#### Висновок до другого розділу

В процесі написання розділу 2 дипломної роботи було проведено конструктивне проектування та моделювання навчального стану. Зокрема, було обрано відповідну конструкційну основу та матеріали, що забезпечують міцність і довговічність всієї системи та елементи безпеки, з метою захисту оператора та запобігання нещасним випадкам під час експлуатації стану. [18]. Також було розроблено елементи кріплення, для надійної фіксації всіх компонентів конструкції та забезпечення їх стабільності під час роботи.

Розміщення маніпулятора та конвеєра було виконано з урахуванням оптимального використання простору. У цілому, проектування та моделювання дозволили створити надійний, безпечний та функціональний навчальний стенд, що може використовуватись для імітації роботи діляниць з

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

робототехнікою та для підготовки фахівців у галузі автоматизації та робототехніки.

### 3. Оцінка міцності конструкції методом аналітичного та комп'ютерного моделювання

#### 3.1. Аналітичний розрахунок

Для перевірки міцності конструкцій рами навчального стенду, що може піддаватися частим перевезенням та непередбачуваним навантаженням, буде виконаний розрахунок на міцність. Цей розрахунок базуватиметься на принципах балок, що входять до складу конструкції стенду. Було здійснено два види розрахунків: аналітичний та програмний. Для програмного розрахунку використовувалось програмне забезпечення SolidWorks, після чого результати обох методів були порівняні.

Згідно з аналітичним методом, буде виконаний розрахунок балки для демонстрації методології обчислень, оскільки програмний метод дозволяє отримати більш наочні та швидкі результати. Розглянемо методику розрахунку напруженого стану балки, що працює в умовах чистого згину. При чистому згині в поперечному перерізі балки виникає тільки згинальний момент, а поперечна сила  $Q = 0$ . Приклади чистого згину показані на рис. 3.1.

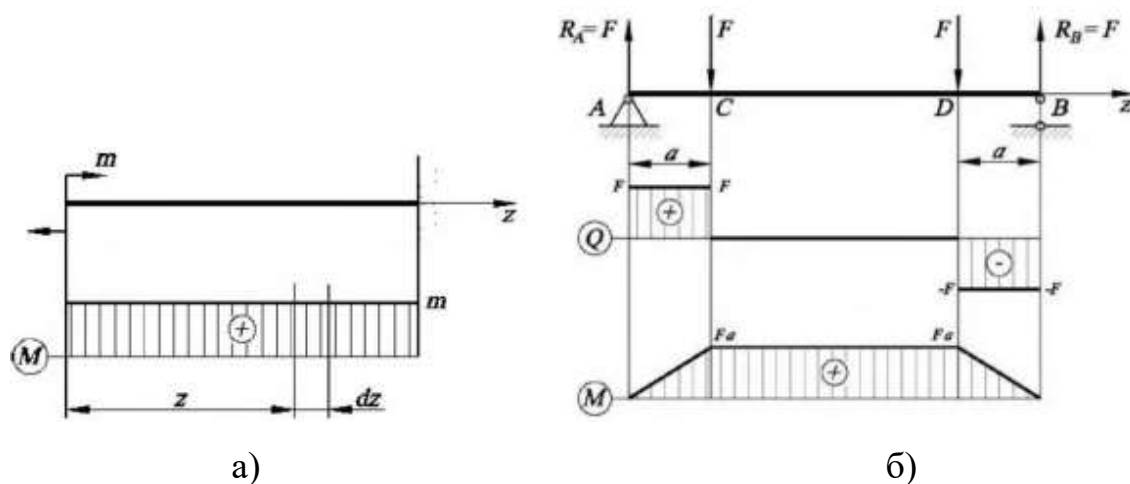
В балці, зображеній на рис. 3.1, а, чистий згин виникає в усіх поперечних перерізах, для схеми рис. 3.1, б - тільки на ділянці CD між прикладеними силами. Момент  $M$  є інтегральною величиною, яка представляє собою суму моментів елементарних зусиль, що виникають в поперечному перерізі.

Оскільки величина напруження  $\sigma$  змінюється по площі перерізу, для оцінки міцності і жорсткості балки необхідно встановити закон розподілу напружень в перерізі балки. Розглянемо характер деформації балки на прикладі моделі, що виготовлена з легко деформуючого матеріалу, наприклад,

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

з гуми. На бокові грані моделі нанесемо ортогональну сітку поздовжніх та поперечних ліній. Після прикладання зовнішніх моментів спостерігається викривлення поздовжніх і поворот поперечних ліній, які залишаються прямолінійними.

Частина поздовжніх волокон по одну сторону від осі балки видовжуються, а інші скорочуються.



а - Епюра 1; б - Епюра 2

Рисунок 3.1 – Епюри чистого згину

За результатами описаної картини деформування можна зробити припущення, які покладені в основу інженерної теорії згину:

1. Поперечні перерізи при чистому згині не викриваються, а тільки повертаються на деякий кут. Ця гіпотеза має назву гіпотези плоских перерізів (гіпотеза Бернуллі);
2. Поздовжні волокна викривляючись вільно видовжуються чи скорочуються незалежно від сусідніх (не натискають одне на одного);
3. В середині балки знаходиться нейтральний шар, волокна якого викривляючись не змінюють своєї довжини;
4. Матеріал деформується за законом Гука.

$$\sigma = E\varepsilon.$$

(3.1)

Виділимо з балки двома поперечними перерізами елемент довжиною  $dz$  (рис. 3.2). Після деформації елемента поперечні перерізи повернуться на кут  $d\theta$ .

Волокно  $n - m$ , яке розміщене в нейтральному шарі, викривиться (радіус кривизни  $r$ ), але не змінить своєї довжини  $dz$ .

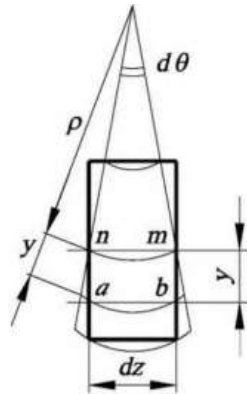


Рисунок 3.2 – Напрямок деформації у перерізі

$$\widetilde{nm} = \rho d\theta = \overline{nm} = dz.$$

(3.2)

Довільно розташоване волокно  $ab$  перетворить на дугу:

$$\widetilde{ab} = (\rho + y)d\theta.$$

(3.3)

і видовжується на величину:

$$\widetilde{ab} - \overline{ab} = (\rho + y)d\theta - \rho d\theta = yd\theta.$$

(3.4)

Відносна деформація волокна  $ab$ :

$$= \frac{\widetilde{ab} - \overline{ab}}{\overline{ab}} = \frac{yd\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho}.$$

(3.5)

Арк.

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Змн. Арк. № докум. Підпис

За законом Гука (3.1):

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{y}{\rho}$$

(3.6)

Отже, напруження змінюється по висоті перерізу за лінійним законом ( $\sigma$  пропорційне  $y$ ). Використовувати формулу (3.6) в інженерних розрахунках неможливо з двох причин: невідомий радіус кривизни  $\rho$ ; невідоме положення нейтрального шару, від якого відраховується ордината  $y$ . Конкретизуємо формулу (3.6).

Розглядаємо елемент балки, що працює в умовах чистого згину (рис. 3.3).

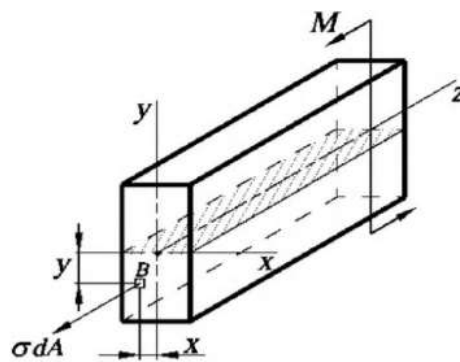


Рисунок 3.3 – Показ сил що діють в балці

В лівому перерізі вказано елементарне зусилля  $\sigma \cdot dA$ , що діє в довільній точці B ( $x, y$ ). В правому перерізі діє згинальний момент  $M = m$ , який визначається як сума моментів елементарних зусиль.

Використовуємо рівняння рівноваги:

$$\sum Z = 0.$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис						

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

$$\int_A \sigma dA = 0.$$

З урахуванням (3.6):

$$\int_A \sigma dA = \int_A E \frac{y}{\rho} dA = \frac{E}{\rho} \int_A y dA = 0. \quad (3.7)$$

Оскільки  $\frac{E}{\rho} \neq 0$ , то

$$\int_A y dA = S_x = 0.$$

Статичний момент  $S_x$  дорівнює нулю відносно центральних осей. Отже, нейтральна вісь  $x$  є центральною віссю перерізу.

Друге рівняння рівноваги має вигляд:

$$\begin{aligned} \sum m_y &= 0; \\ \int_A \sigma dAx &= 0; \\ \int_A E \frac{y}{\rho} x dA &= \frac{E}{\rho} \int_A xy dA = \frac{E}{\rho} I_{xy} = 0. \end{aligned} \quad (3.8)$$

З одержаного виразу можна отримати висновок, що:

$$I_{xy} \int_A xy dA = 0.$$

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Відцентровий момент інерції дорівнює нулю відносно головних осей. Отже, оці  $x$ ,  $y$  є головними. Таким чином, нейтральна вісь  $x$  є головною центральною віссю перерізу. Використовуємо третє рівняння рівноваги:

$$\sum m_x = 0;$$

$$\int_A \sigma dAy - M = 0;$$

$$\int_A \frac{E}{\rho} y \cdot y \cdot dA = \frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA = \frac{E}{\rho} I_x = M;$$
(3.9)

Або

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_x}.$$
(3.10)

Добуток  $EI_x$ , що входить у знаменник, називається жорсткістю балки. Вираз (3.10) можна трактувати як запис закону Гука для згину, що кривизна пропорційна згинальному моменту.

З виразів (3.6), (3.10) маємо:

$$\sigma = E y \frac{M}{EI_x} = \frac{M y}{I_x}.$$
(3.11)

З виразу (3.11) випливає, що напруження  $\sigma$  від дії згинального моменту змінюється по висоті перерізу за лінійним законом - пропорційне відстані від нейтральної осі. По один бік від нейтральної осі напруження додатне (розтягуюче). по інший від'ємне (стискаюче). Небезпечними є найбільш

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

віддалені від нейтральної осі точки, де виникають максимальні за величиною розтягуючі або стискаючі напруження (рис. 3.4).

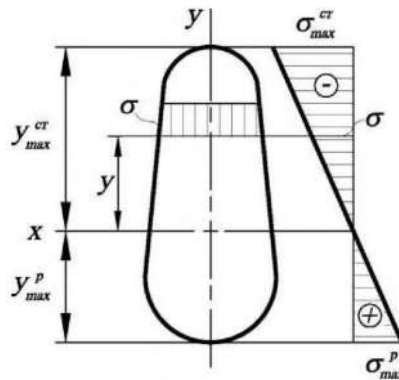


Рисунок 3.4 – Епюра розтягувальних та стискальних напружень

Величину напружень у небезпечних точках обчислюють за формулами:

$$\sigma_{max}^p = \frac{M \cdot y_{max}^p}{I_x}; \quad (3.12)$$

$$\sigma_{max}^{st} = \frac{M \cdot y_{max}^{st}}{I_x}. \quad (3.13)$$

Якщо переріз є симетричним відносно нейтральної осі,  $y_{max}^p = y_{max}^{st}$ , максимальні напруження будуть рівними  $\sigma_{max}^p = \sigma_{max}^{st} = \sigma_{max} = M \frac{y_{max}}{I_x}$ .

Величину  $\frac{I_x}{y_{max}}$  позначають через  $W_x$  і називають моментом опору перерізу:

$$W = \frac{I_x}{y_{max}}. \quad (3.14)$$

Тоді максимальне напруження у випадку симетричного перерізу обчислюється за формулою:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} \quad (3.15)$$

Для обчислення моментів опору прямокутного перерізу (рис. 3.5) використовують формули:

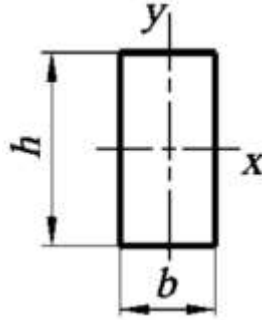


Рисунок 3.5 – Прямокутний переріз

$$W_x = \frac{bh^3}{12 \frac{h}{2}} = \frac{bh^2}{6} \quad (3.16)$$

$$W_y = \frac{bh^3}{12 \frac{h}{2}} = \frac{bh^2}{6} \quad (3.17)$$

Для прокатних профілів  $W$  визначається за таблицями сортуранту.[3]  
Розглянемо методику оцінки міцності балки за нормальними напруженнями.  
Умову міцності балки за нормальними напруженнями можна записати у вигляді:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma] \quad (3.18)$$

Ця умова залежить від виду матеріалу (пластичний чи крихкий) та від форми поперечного перерізу. Розглянемо основні випадки:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

1) Матеріал балки пластичний,  $[\sigma]_p = [\sigma]_{cm} = [\sigma]$ . Раціональним є переріз, симетричний відносно нейтральної осі;

Умова міцності:

$$\sigma_{max} = \frac{|M_{max}|}{W} \leq [\sigma]. \quad (3.19)$$

2) Матеріал балки крихкий  $[\sigma]_{cm} > [\sigma]_p$ .

а) нейтральна вісь не є віссю симетрії;

Умови міцності:

$$\sigma_{max}^p = \frac{|M_{max}| \cdot y_{max}^p}{I_x} \leq [\sigma]_p; \quad (3.20)$$

$$\sigma_{max}^{cm} = \frac{|M_{max}| \cdot y_{max}^{cm}}{I_x} \leq [\sigma]_{cm}. \quad (3.21)$$

б) нейтральна вісь є віссю симетрії.

Умови міцності:

$$\sigma_{max}^{cm} = \frac{|M_{max}|}{W} \leq [\sigma]_p. \quad (3.22)$$

З допомогою умов міцності можна розв'язувати три типи задач:

- перевірка міцності;
- визначення величини допустимого згинального моменту  $[M]$ ;
- підбір розмірів поперечного перерізу, що задовольняють умову міцності. [21].

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Отже проведемо розрахунки. Вхідними умовами є:

$$b = 30 \text{ мм} = 0,030 \text{ м};$$

$$h = 30 \text{ мм} = 0,030 \text{ м}.$$

За формулами 3.16 та 3.17 знаходимо моменти опору  $W$ :

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,030 \cdot 0,030^2}{6} \approx 0,0000045 \text{ м}^3;$$

Знаходимо момент опору  $M$ :

$$\sigma_{\text{доп}} = \frac{\sigma_y}{\gamma} = \frac{250}{1,5} \approx 16,7 \text{ МПа}$$

$$M = \sigma_{\text{доп}} \cdot W = 0,0007515 \text{ Нм}$$

За формулою 3.22 знаходимо моменти опору  $\sigma_{\text{max}}$ :

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{W} = \frac{0,0007515}{0,0000045} \approx 16,7 \text{ МПа}.$$

### 3.2. Програмний розрахунок

Аналіз виконується за допомогою програмного забезпечення SolidWorks Simulation і зосереджується на статичному аналізі. Статика вивчає методи еквівалентних перетворень систем сил та умови рівноваги матеріальних тіл;

Здійснення статичного аналізу полягає у визначенні механічних властивостей об'єктів під час застосування статичного навантаження, яке залишається незмінним протягом часу.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

Попередньо для більш точних розрахунків форма профілю зазнала оптимізації, що видно на рис. 3.6. Також у моделі видалені всі балки, які не впливають на міцність конструкції.

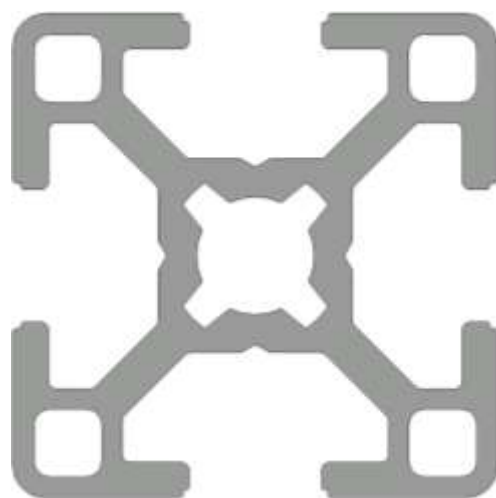


Рисунок 3.6 – Спрощена форма профілю

Процес статичного аналізу проводиться згідно встановлених кроків для забезпечення точності та надійності результатів. Ці кроки включають створення моделі, вибір матеріалу та його властивостей, застосування зовнішніх сил та обмежень, запуск обчислень та аналіз результатів.

Процес статичного аналізу виконується відповідно до наступних кроків:

1. Здійснюємо статичне дослідження. Правою кнопкою миші натискаємо на вкладку "Simulation" натискаємо New Study (Нове дослідження). У вікні PropertyManager далі у розділі General Simulation (Загальне моделювання) натискаємо Static (Статичний). [22].

2. У дереві дослідження Simulation розгортаємо папку моделі і виконуємо наступне:

- натискаємо правою кнопкою миші Solidbody 1 і обираємо Treat as Beam (Розглядати як балку) так само і для наступних Solidbody 2-13;

- натискаємо правою кнопкою миші Joint group (Групу з'єднань) і обираємо Edit (Редагувати);

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

- у вікні менеджера властивостей PropertyManager - Edit Joints (Редагувати з'єднання) в розділі Selected Beams (Обрані балки) натискаємо Calculate (Обчислити). У вікні Results (Результати) відображаються всі з'єднання;

- натискаємо на підтвердження тоді значки балки з'являться в папці моделі, а папка Joint group (Група шарнірів) з'явиться в дереві дослідження Simulation. [22].

3. Встановлюємо матеріал для балки. Правою кнопкою миші натискаємо на іконку "Apply material" у верхній панелі керування на вкладці. Правою кнопкою миші клацаємо на папку моделі і вибираємо Apply Material to All Bodies (Застосувати матеріал до всіх тіл) та призначаємо 1060 Alloy (Алюмінієвий сплав 1060, який схожий до АД31Т5 за характеристиками) із бібліотеки матеріалів SOLIDWORKS. [22].

4. З'єднання визначаються автоматично на кожному місці перетину двох або більш балок (рис. 3.7). Ці автоматично визначені точки кріплення допоможуть у прокладенні закріплень та дій сил на раму. [22].

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



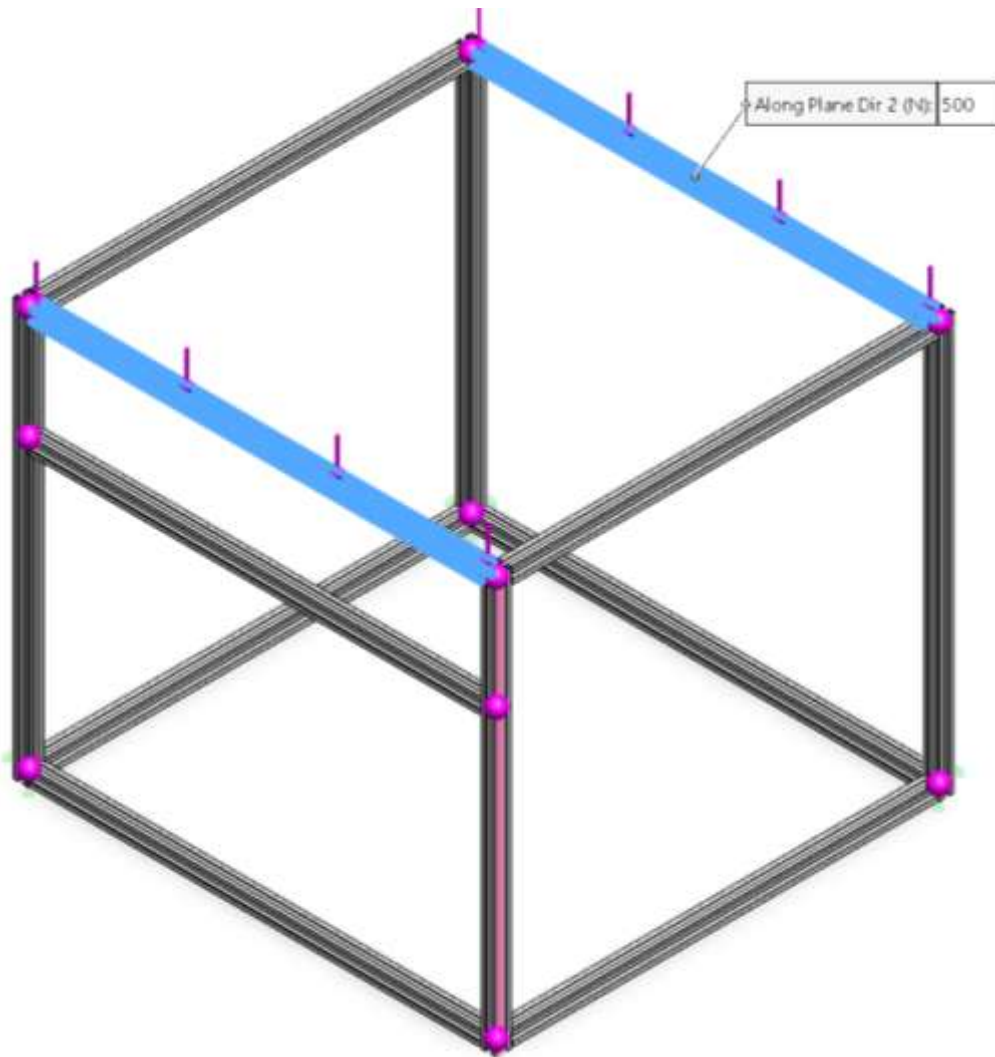


Рисунок 3.8 – Напрямок та місце дії сил

7. Формуємо сітку для розрахунку. Натискаємо правою кнопкою миші на іконку Mesh (Сітка) у дереві дослідження симуляції і вибираємо Create mesh (Створити сітку). Сітка створюється за допомогою математичних розрахунків.

У випадку балкових конструкцій сітка розбивається на сегментовані циліндри (рис. 3.9) для правильного розрахунку. Після розрахунку сітки на верхній панелі вибираємо "Run This Study". Після того, як наші моделі будуть розраховані, отримаємо результати статичного дослідження, які будуть показані на наступних сторінках.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	

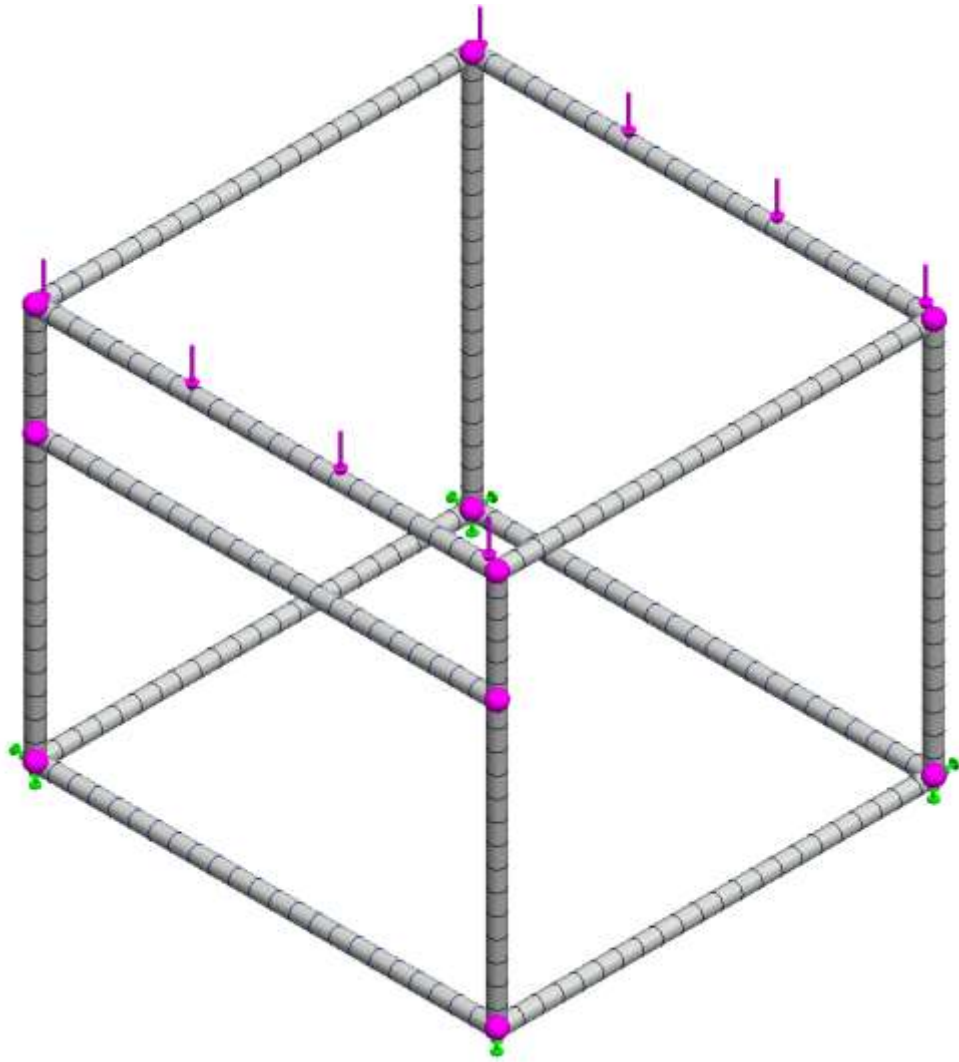


Рисунок 3.9 – Математична сітка моделі рами

Після проведення математичних розрахунків були отримані результати значень максимальних напружень, переміщень та коефіцієнту запасу міцності. Це дозволяє зробити висновок про здатність конструкції витримувати заплановані навантаження без ризику її руйнування чи втрати функціональності.

Об'ємні параметри моделі:

- маса – 3,27 кг;
- об'єм – 0,003 м<sup>3</sup>;
- щільність – 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Результати досліджень:

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

1) Межа текучості (рис. 3.10);

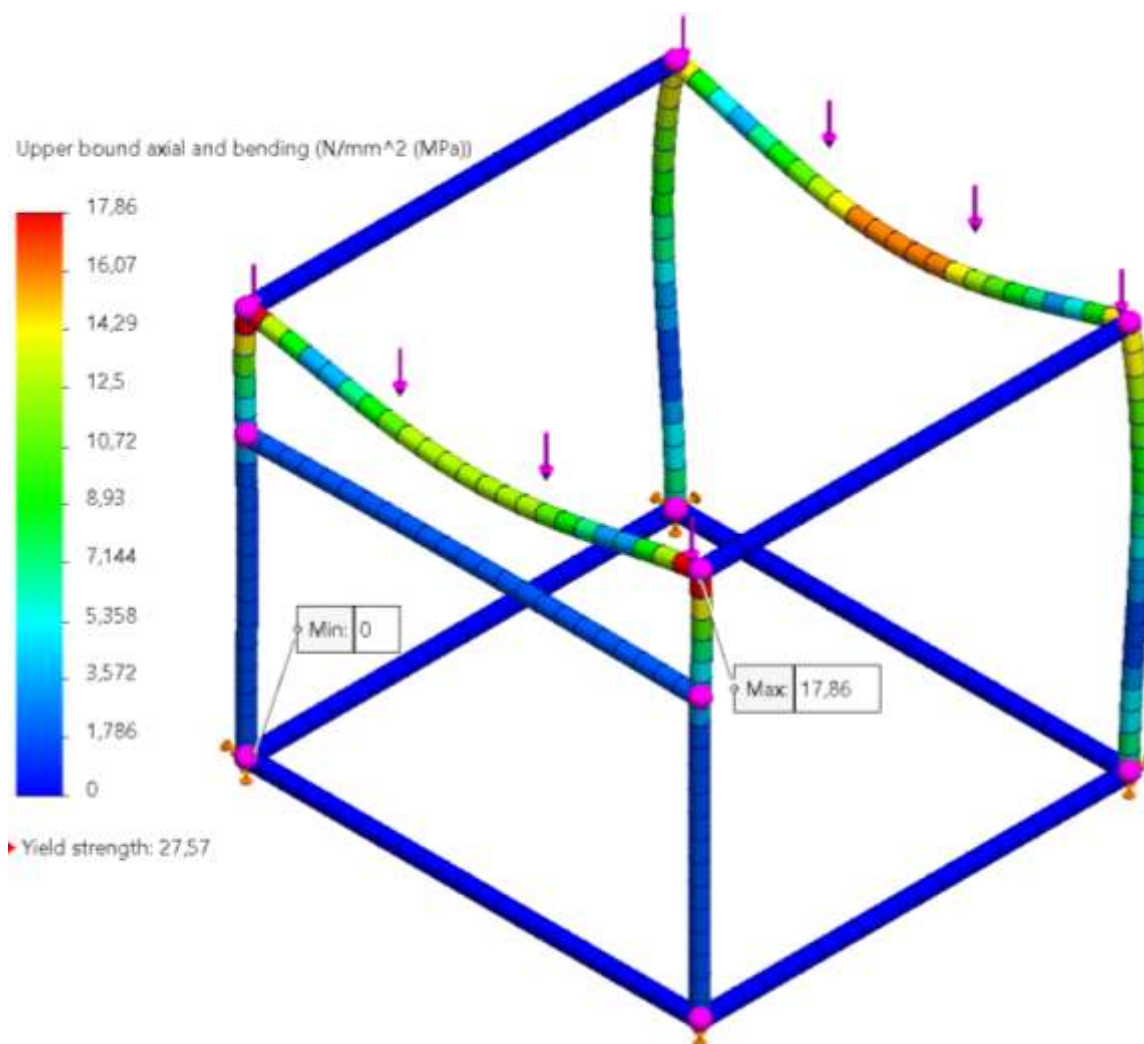


Рисунок 3.10 – Візуалізація границі текучості матеріалу дослідження

Таблиця 3.1 – Значення границь текучості

Макс.	Мін.
17,86 МПа	0 МПа
Елемент: 20	Елемент: 81

2) Переміщення (рис. 3.11);

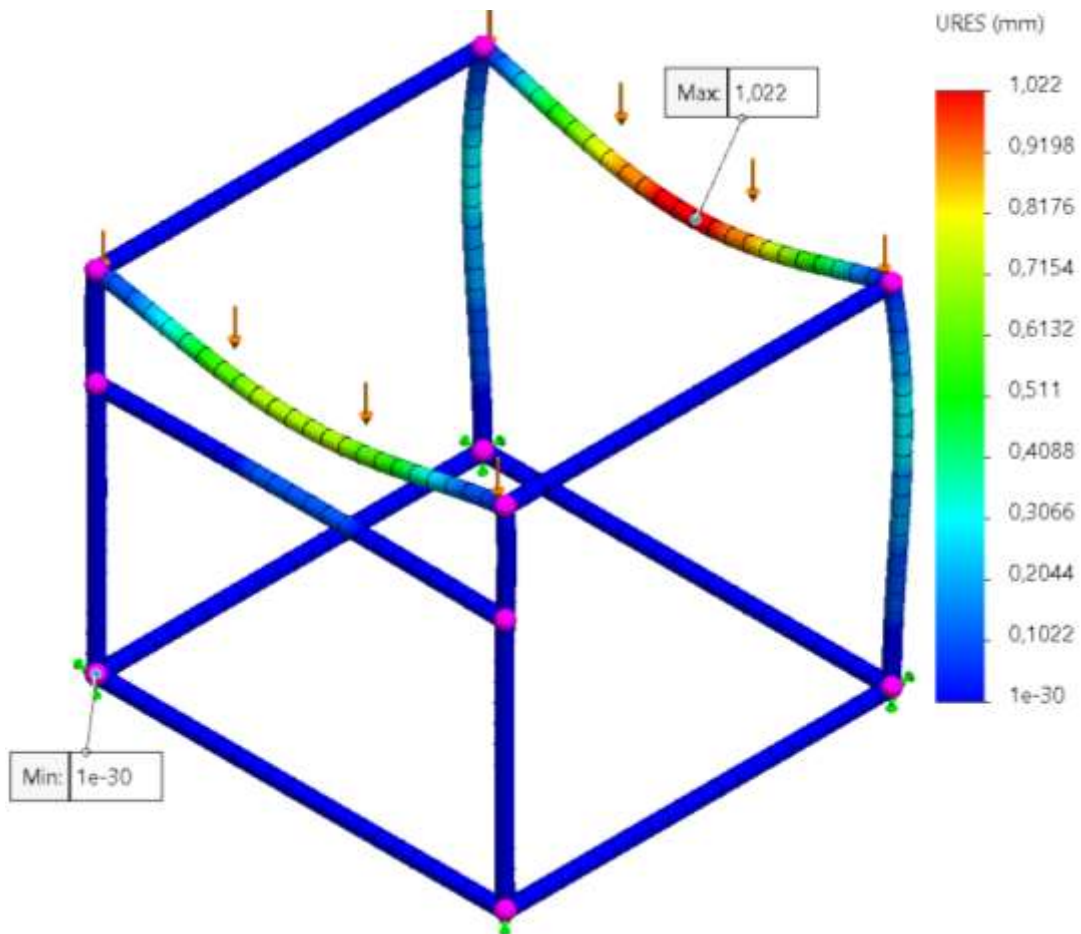


Рисунок 3.11 – Візуалізація руху матеріалу під впливом сили у дослідженні

Таблиця 3.2 – Значення переміщень

Макс.	Мін.
1,022 мм	$1e^{-30}$ мм
Вузол: 201	Вузол: 85

### 3.3. Аналіз напружень і визначення коефіцієнта запасу міцності

#### 3) Коефіцієнт запасу міцності (рис. 3.12).

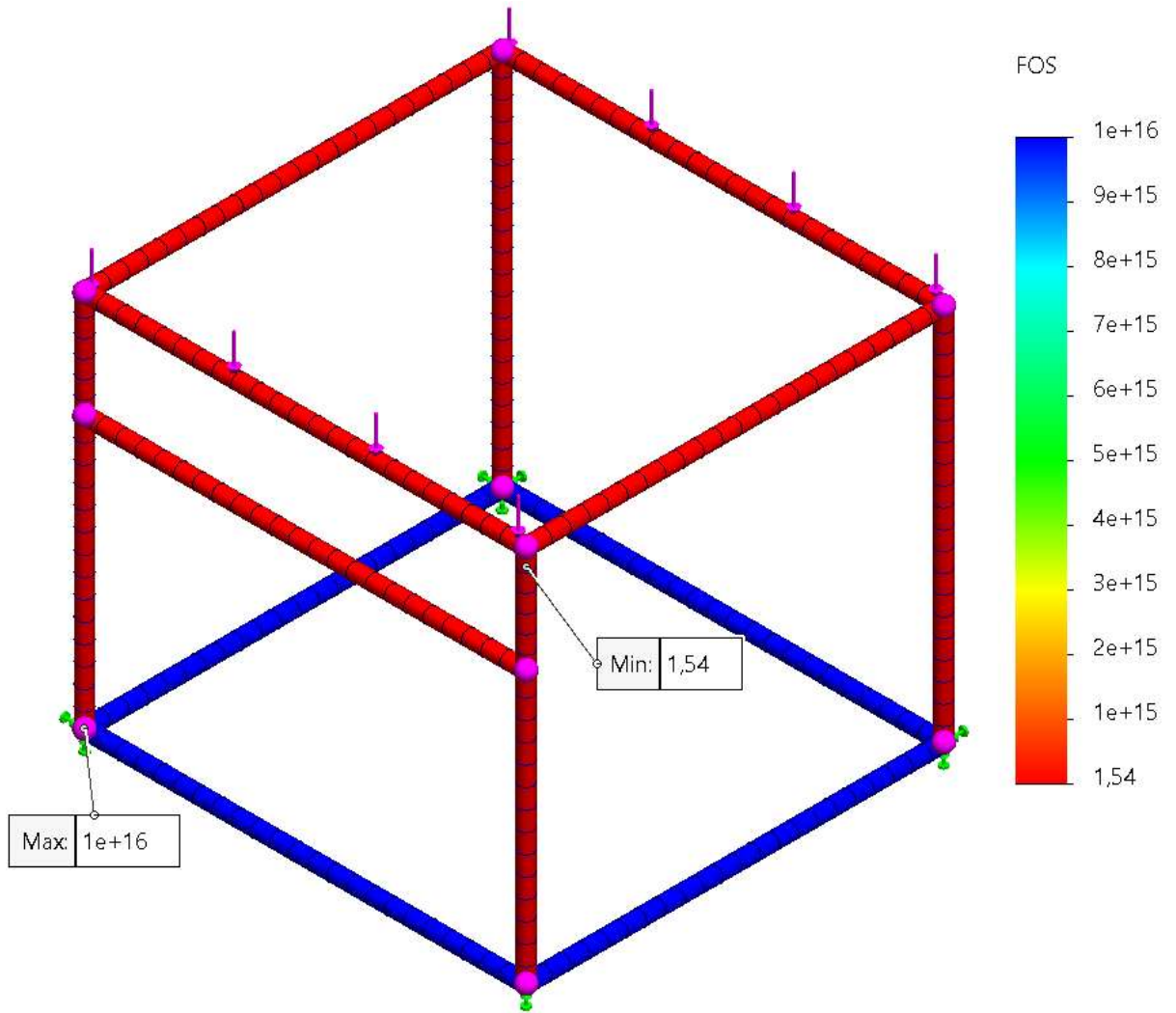


Рисунок 3.12 – Візуалізація коефіцієнту запису міцності

Таблиця 3.3 – Значення коефіцієнту запису міцності

Макс.	Мін.
1e+16	0,515
Вузол: 85	Вузол: 41

### Висновок до третього розділу

Провівши розрахунки, аналітичний та програмний розрахунок, ми можемо їх порівняти. Аналітично відповідь виходить 16,7 МПа напруження,

яке витримує балка, а програмний розрахунок показує 17,86 МПа. Це говорить нам про те, що обидва способи дозволяють нам отримати достовірний результат з неістотною різницею.

Програмний метод за допомогою SolidWorks дозволяє отримати більш точні та швидкі результати з більшою кількістю деталізації кінцевого аналізу.

З отриманими результатами від програмного забезпечення SolidWorks ми можемо зробити висновок, що при дії постійного навантаження 500 Н, що приблизно дорівнює 50 кг, загальна конструкція має коефіцієнт запаса міцності рівний 1,54, що є типовим та достатнім коефіцієнтом для забезпечення надійності конструкції стенду.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## Висновки

У ході виконання дипломного проєкту на тему «Розробка стенду для імітації безпечної роботи ділянки з роботом маніпулятором» було успішно реалізовано комплекс завдань, спрямованих на створення функціонального й безпечного навчального середовища з використанням робототехнічної системи. У межах дослідження проаналізовано теоретичні основи організації безпеки в роботизованих системах, що дозволило окреслити ключові ризики та способи їхнього усунення під час роботи з промисловими маніпуляторами. Окрему увагу приділено вивченню структури, технічних характеристик і функціональних можливостей робота Niryu One Simplifié, який був обраний для реалізації стенду. Проведено обґрунтований вибір конструкційних матеріалів та елементів, що забезпечують надійність і зручність складання. Здійснено проєктування каркасу стенду з алюмінієвого профілю 30×30 мм, а також розроблено вузли кріплення, систему дверей, замків і завіс з урахуванням вимог ергономіки та безпеки. Було сформовано конфігурацію робочої зони робота і конвеєра, яка гарантує ізоляцію оператора від потенційно небезпечних зон та відповідає сучасним принципам побудови безпечного виробничого середовища. У середовищі САПР створено тривимірну модель конструкції стенду, що дозволило візуалізувати її складові та забезпечити точність на етапі виготовлення. Оцінку надійності конструкції здійснено за допомогою аналітичного розрахунку та комп'ютерного моделювання, зокрема проведено аналіз напружень і визначено коефіцієнт запасу міцності. Отримані результати підтвердили відповідність конструкції вимогам експлуатаційної безпеки. Таким чином, у дипломному проєкті було реалізовано поставлені завдання, а запропонована конструкція стенду довела свою практичну доцільність як ефективний засіб для навчання та демонстрації безпечної взаємодії з роботизованими системами.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

## Перелік джерел посилань

1. Automation Safety. Assessing the risks and understanding safeguards [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://aeasseincludes.assp.org/professionalsafety/pastissues/051/12/021206AS.pdf> (дата звернення 4.04.2025).
2. Bao X. et al.(2023). A novel ultrasound robot with force/torque measurement and control for safe and efficient scanning. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2023 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/367442571\\_A\\_Novel\\_Ultrasound\\_Robot\\_with\\_Forcetorque\\_Measurement\\_and\\_Control\\_for\\_Safe\\_and\\_Efficient\\_Scanning](https://www.researchgate.net/publication/367442571_A_Novel_Ultrasound_Robot_with_Forcetorque_Measurement_and_Control_for_Safe_and_Efficient_Scanning) (дата звернення 10.04.2025).
3. Cartesian gantry robots benefits and applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: (дата звернення 17.05.2025). <https://www.fuyumotion.com/uk/news/cartesian-gantry-robots-benefits-and-applications/>
4. John J. Craig—" Introduction to Robotics: Mechanics and Control", [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://marsuniversity.github.io/ece387/Introduction-to-Robotics-Craig.pdf> (дата звернення 17.04.2025).
5. Machine Safety [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://neffautomation.com/machinesafety> (дата звернення 10.05.2025).
6. Mikell P. Groover—" Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing" [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/245-Automation-Production-Systems-and-Computer-Integrated-Manufacturing-Mikell-P.-Groover-Edisi-4-2015.pdf> (дата звернення 3.05.2025).
7. NiryoStudio application [Електронний ресурс]. - Режим доступу: (дата звернення 23.04.2025). <https://niryo.com/niryostudio/>

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



15. Splav ad31d5 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: (дата звернення 23.05.2025). <https://evek.com.ua/materials/splav-ad31-1310.html>

16. The benefits of automation in workplace safety [Електронний ресурс]. - Режим доступу (дата звернення 22.05.2025). :<https://op-tec.co.uk/knowledge/benefits-of-automation-technologyin-workplace-safety>

17. The Importance of Hazard Analysis in Workplace Safety [Електронний ресурс]. — Режим доступу: (дата звернення 24.05.2025). <https://www.hse-network.com/the-importance-of-hazardanalysis-in-workplace-safety/>

18. The importance of machine safety [Електронний ресурс]. - Режим доступу: (дата звернення 25.05.2025). <https://www.wieland-safety.com/2023/06/22/the-importance-of-machine-safety/>

19. Top 10 Machine Safety Devices [Електронний ресурс]. - Режим доступу: (дата звернення 5.06.2025). <https://www.mpsasafety.com/blog/ten-common-machine-safety-devices>

20. Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical MovementBased on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022,Article ID 3046116 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/3046116> (дата звернення 5.04.2025).

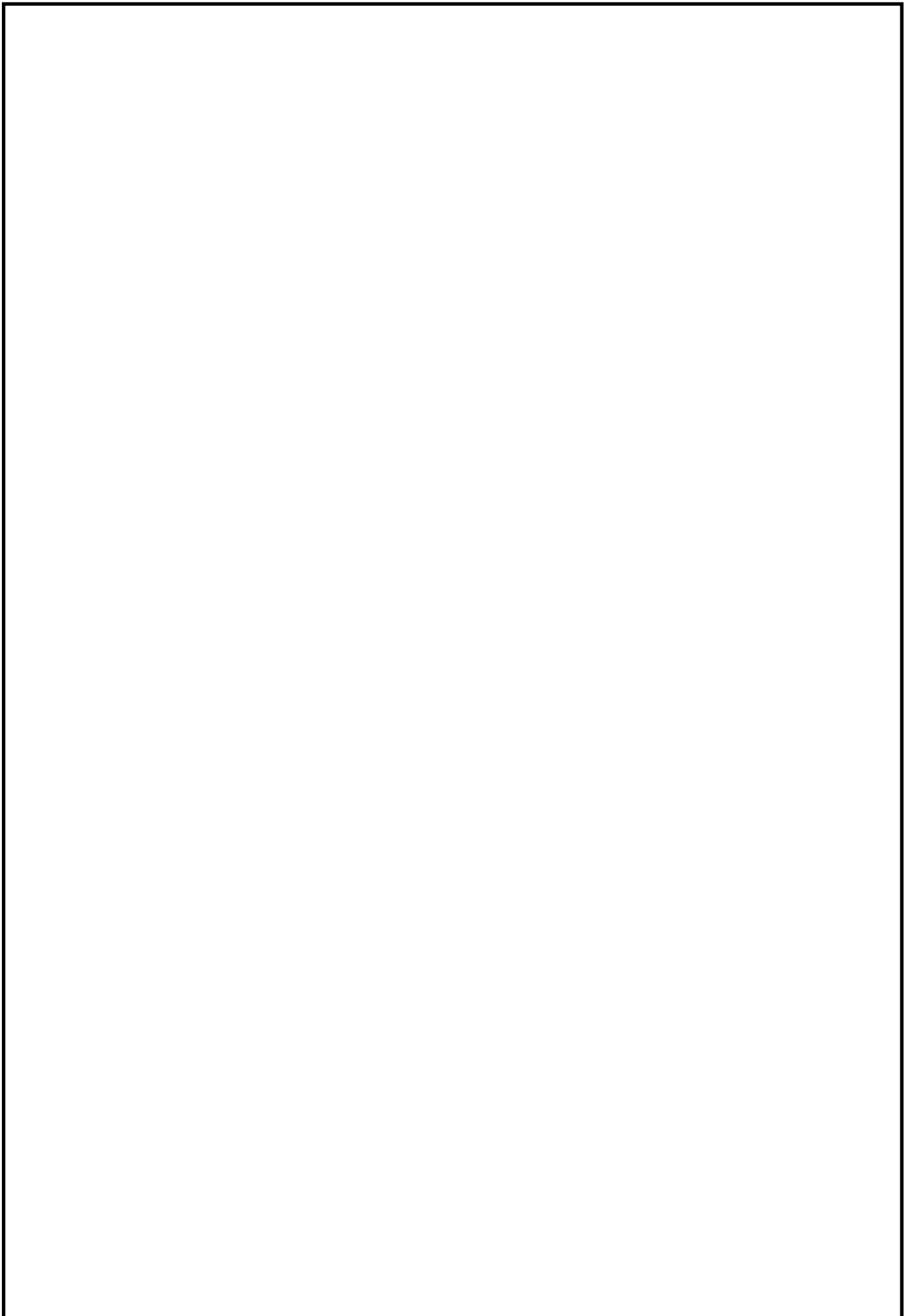
21. Оцінка міцності балки за нормальними напруженнями. [Електронний ресурс]. Режим доступу: (дата звернення 7.06.2025) [https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/228333/mod\\_resource/content/3/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%2011.pdf](https://msn.khmnu.edu.ua/pluginfile.php/228333/mod_resource/content/3/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F%2011.pdf)

22. Харжевський В. О. Системи інженерного аналізу: Методичні рекомендації Хмельницький: ХНУ, 2024 - 70 с.

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			

# ДОДАТКИ

					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			



					<i>БРМА 25.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис			