

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

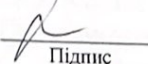
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка конструкції стенду з безпеки  
машин

Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

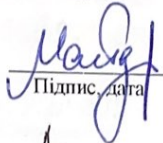
Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу група РМ-20-1

  
Підпис

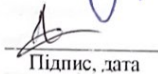
О.С. Кирилюк  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

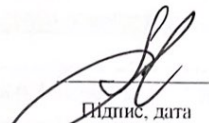
к.т.н., доц. П.С. Майдан  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.І. Полінук  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Полінук О.С.  
Ініціали, прізвище

18 06 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Шифр і назва

Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

17.06.2024

ЗАВДАННЯ  
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кирилюк Олександр Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка конструкції стенду з безпеки машин

керівник роботи Майдан Павло Сергійович, к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 17.06.2024

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики приладів з безпеки машин

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

Вступ. 1 Огляд та аналіз доступних рішень з безпечної автоматизації в системах.

2. Розробка конструкції стенду з безпеки машин. 3. Розрахунки, що підтвержують працездатність. Висновки. Перелік джерел посилань.

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

1. Моделі запобіжних пристроїв (ДО1, А1). 2. Моделі програмовано логічних контролерів (ДО2, А1). 3. Стенд з безпеки машин (ВЗ, 2А1). 4. Стенд з безпеки машин (ГК, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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


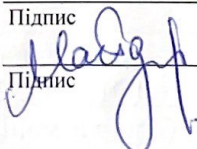
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз доступних рішень з безпечної автоматизації в системах		
2. Розробка конструкції стенду з безпеки машин		
3. Розрахунки, що підтвержують працездатність		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент

Керівник роботи

  
 Підпис  
  
 Підпис

О.С. Кирилюк  
 Ініціали, прізвище  
 П.С. Майдан  
 Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Кирилюк Олександр Сергійович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка конструкції стенду з безпеки машин

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Міца В.В., к.т.н.

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 63

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: 1 Огляд та аналіз доступних рішень з безпечної автоматизації в системах. 2 Розробка конструкції стенду з безпеки машин. 3. Розрахунки, що підтвержують працездатність. Метою розробки стенду з безпеки машин є наглядно продемонструвати передові технології та підходи, які призначені для покращення рівня безпеки на виробництвах. Основним завданням є не лише запобігання травмування, а й створення працюючого середовища, яке сприяє здоров'ю та безпеці працівників, що в свою чергу посприяє зростанню продуктивності

Підпис студента 

"17" 06 2024 р.

### РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 3 від "28" 06 2024 р.

Оцінка проекту ЕК відмітно /А  
Рекомендації ЕК впровадження в навчальний процес

Особливі відмітки -

Технічний секретар Бурек А.В.

"28" 06 2024 р.

	Зміст	
Вступ .....		5
1 Огляд та аналіз доступних рішень з безпечної автоматизації в системах .....		6
1.1 Аналіз проблеми безпеки працівників на виробництвах .....		6
1.2 Огляд запобіжних пристроїв для безпеки машин .....		10
1.3 Огляд та аналіз безпечних програмовано логічних контролерів .....		15
<del>1.4</del> Висновок до першого розділу .....		20
2 Розробка конструкції стенду з безпеки машин .....		22
2.1 Вибір форми стенду .....		22
2.2 Вибір форми профілю для стенду .....		23
2.3 Блок керування .....		24
2.4 Електромагнітний замок .....		29
2.5 Електромеханічний замок з окремим керуванням .....		34
2.6 Електромеханічний замок з вбудованим керуванням .....		38
<del>2.6</del> Висновок до другого розділу .....		40
3 Розрахунки, що підтвержують працездатність .....		41
3.1 Аналітичний розрахунок балкових конструкцій на міцність та оцінка міцності за нормальними напруженнями .....		41
3.2 Програмний розрахунок балок на міцність та оцінка міцності балки за допомогою програмного забезпечення SolidWorks .....		51
<del>3.3</del> Висновок до третього розділу .....		59
Висновки .....		60
ДОДАТКИ .....		<del>63</del>

					БРМА24.00.00.000 ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Кирилюк О.С.				4	63
Перевір.		Майдан П.С.			ХНУ. Г.д. РМ-20-1		
Реценз.		Кирилюк С.І.					
Н. Контр.		Кирилюк О.С.					
Затверд.		Кирилюк О.С.					

## Вступ

Автоматизовані системи поширені в різних галузях промисловості і приносять такі переваги як збільшення продуктивності, зниження виробничих витрат, поліпшення якості продукції та підвищення гнучкості виробництва, а також усувають потребу в ручному виконанні повторюваних, нудних і небезпечних завдань.

В процесі експлуатації автоматизованих систем доступ працівників до небезпечних зон обмежується, що сприяє запобіганню потенційних ризиків. Це досягається за допомогою автоматизованих пристроїв, керованих програмованими логічними контролерами (ПЛК), налаштованими на автономну роботу без необхідності людського втручання. Однак для усунення несправностей, проведення ремонту, діагностики або переналаштування обладнання потрібне втручання людини.

При усуненні цих проблем найбільші ризики несуть людські помилки, які можуть стати причинами інцидентів, наприклад:

- непорозуміння, що призводять до ввімкнення машин при наявності колег у небезпечних зонах;
- неправильне використання або усунення захисних механізмів;
- неавторизоване внесення змін до програм електронних пристроїв безпеки [1].

Мета розробки стенду з безпеки машин полягає в ілюстрації та демонстрації передових технологій та підходів, які призначені для підвищення рівня безпеки на виробництвах.

Ціллю є не лише попередження випадків травмування, а й створення більш здорового та безпечного робочого середовища, що сприяє загальному благополуччю і продуктивності працівників.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

# 1 Огляд та аналіз доступних рішень з безпечної автоматизації в системах

## 1.1 Аналіз проблеми безпеки працівників на виробництвах

Безпека на робочому місці давно вважається ключовим аспектом робочого середовища, яка спрямована на забезпечення захисту та добробуту працівників. Що також є важливим чинником для успіху підприємства.

Промисловість змінюється щодня з розвитком робототехніки та автоматизації робочих місць. Працівники продовжують відігравати важливу роль у розвитку галузі, але завдяки автоматизації вони мають кращі та безпечніші умови праці. У більшості процесів ризику можна уникнути без особливих вимог до систем автоматизації.

У більшості випадків можна легко попередити ризики без суттєвих вимог до систем автоматизації. Проте існують специфічні застосування, пов'язані з вищим ризиком, наприклад, пилорами, станки, роботизоване обладнання, транспортні та пакувальні системи, хімічні процеси, високотискові операції, системи пожежного та газового сповіщення, пальники, канатні дороги та інші. Для них необхідний спеціалізований підхід і передові технології [2].

Ось кілька прикладів статистичних даних, які підкреслюють важливість всебічної концепції підвищення безпеки на виробництвах:

1. Приблизно 2,78 мільйона смертей щороку трапляються через нещасні випадки на виробництві або професійні захворювання, чимало з яких обумовлені інцидентами з обладнанням;
2. У 2019 році OSHA повідомила про 5 333 загиблі на роботі працівники, з яких значна кількість із яких стала жертвами нещасних випадків, пов'язаних з обладнанням;
3. Нещасні випадки з устаткуванням становлять 19% випадків зі смертельними наслідками у ЄС і є другою за поширеністю причиною таких інцидентів;

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Національний інститут охорони праці (NIOSH) зазначає, що в США щорічно реєструється 34 900 не смертельних травм з ампутацією, багато з яких виникають внаслідок нещасних випадків на робочому обладнанні [3].

Створення безпечного робочого середовища вимагає уваги до багатьох ключових аспектів. Аналіз ризиків є одним з найбільш ефективних способів для попередження нещасних випадків. Він полягає у ідентифікації потенційних небезпек у робочій зоні та розробці заходів для їхнього усунення, з метою мінімізації ймовірності травмувань чи фатальних випадків.

Аналіз небезпек є критичним аспектом програми безпеки на робочому місці. Він підвищує безпеку робочого середовища завдяки профілактичному аналізу для визначення потенційних небезпек, які необхідно усунути. Зазвичай ці небезпеки є фізичними, хімічними, біологічними чи ергономічними. Залежно від галузі ці проблеми можуть відрізнятися [4].

Усі можливі ризики можна ефективно виявити шляхом детального аналізу робочого середовища, починаючи від робочих процедур і закінчуючи наявним обладнанням. Зазвичай це виконують професіонали у своїй галузі, які можуть правильно оцінити, проаналізувати та встановити швидкість виникнення, а також ймовірні наслідки впливу. Належна безпека в автоматизованих системах має гарантувати, що потенційний ризик травм для працівників буде зведений до нуля.

Спеціалісти з охорони праці та техніки безпеки використовують ієрархію систем контролю для зменшення ризиків, що показано на рис. 1.1. Використання ієрархії контролю як основи управління ризиками допомагає визначити найбільш ефективні та надійні методи зменшення ризиків.

Ієрархічна структура контролю за безпекою починається з усунення небезпек, за необхідності впровадження інженерного контролю, наприклад через автоматизацію як економічно вигідний метод, і закінчується застосуванням засобів індивідуального захисту як останньої міри безпеки.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

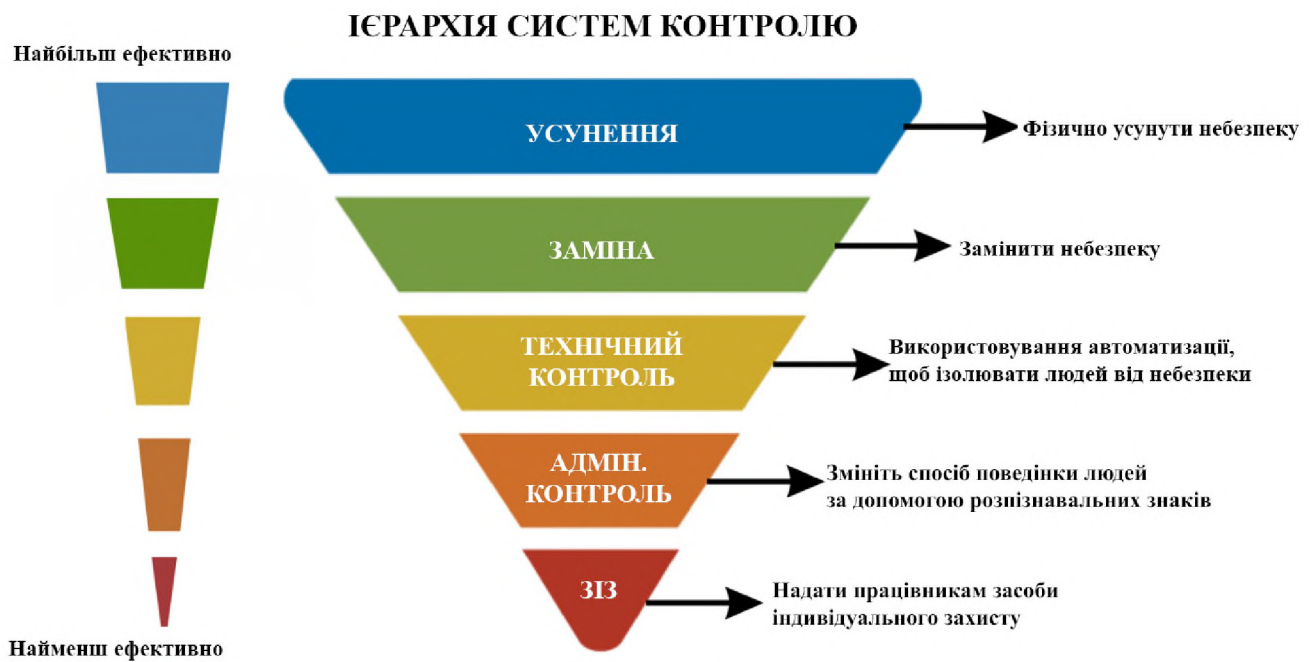


Рисунок 1.1 - Ієрархія систем контролю

Існує кілька способів використання технологій автоматизації для зменшення ризиків на робочому місці:

1. Фізичне дистанціювання працівників від небезпек. Автоматизація дозволяє забезпечити дистанційну роботу, знижуючи необхідність фізичної присутності працівників у небезпечних умовах. Застосування автоматичних систем сприяє безпечному виконанню робіт, які могли б становити ризик для людини, мінімізуючи їхній контакт з потенційно шкідливими середовищами та ситуаціями.

Роботи використовуються для роботи з небезпечними матеріалами в промисловому середовищі, тим самим знижуючи ризик для працівників. Роботизувальники, наприклад, тримають працівників подалі від іскор, диму та інших потенційних зварювальних ризиків під наглядом кваліфікованих працівників.

Технологія автоматизації також може застосовуватися для дистанційного

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

моніторингу та управління процесами, дозволяючи працівникам працювати на безпечній відстані. Обмеження небезпечних факторів знижує ризик нещасних випадків, створюючи безпечне робоче середовище.

2. Автоматизація повторюваних завдань. Автоматизуючи повторювані завдання, підприємства підвищують безпеку на робочому місці та, як наслідок, підвищують продуктивність. Численні ручні роботи, такі як робота на конвеєрі чи введення даних, можуть бути монотонними та виснажливими, а це збільшує ймовірність помилок і нещасних випадків.

Взявши на себе певні завдання, технології автоматизації можуть допомогти полегшити ці повторювані завдання та звільнити працівників для виконання інших складних робіт. Оскільки автоматизовані системи часто здатні працювати швидше й точніше, ніж люди, це також може допомогти підвищити загальну ефективність робочого процесу.

3. Зниження втоми співробітників. Нещасні випадки можуть статися внаслідок помилок працівників. Помилки можуть виникати в результаті неправильного спілкування, плутанини, а також через виснаження. Переймаючи роботи, які є фізично важкими або потребують постійної уваги протягом тривалих періодів часу, технологія автоматизації має потенціал зменшити втому співробітників.

4. Постійний моніторинг процесу. Автоматизовані системи можуть безперервно створювати дані та контролювати процес у режимі реального часу. Це дозволяє таким системам реагувати на надзвичайні ситуації набагато оперативніше, ніж люди. Автоматизовані системи можуть зупинити аварії та пошкодження обладнання, вимкнувши обладнання або попередивши персонал до погіршення потенційно небезпечної ситуації.

Запобіжні реле можуть бути застосовані для підключення датчиків та блокувальних механізмів з метою відключення електроживлення двигунів та механізмів, що перешкоджає виникненню потенційно небезпечних ситуацій. Напри-

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

клад, автоматичне відключення котлів та турбін на теплових електростанціях здійснюється у випадку, якщо рівень води в паровому барабані перевищує безпечний ліміт. Таке відключення забезпечує захист обладнання від катастрофічних пошкоджень та оберігає працівників від можливих травм [5].

Автоматизація може зменшити старі ризики, але може створити нові. Важливо провести аналіз і ввести заходи для контролю нових ризиків.

## 1.2 Огляд запобіжних пристроїв для безпеки машин

Механічні небезпеки на машинах зазвичай з'являються в робочих зонах, точках передачі енергії та інших рухомих частинах обладнання. Запобіжні пристрої розроблені для зниження ризику нещасних випадків або травм для персоналу в цих зонах. Для вибору відповідних запобіжних пристроїв необхідно:

1. Провести оцінку ризику обладнання;
2. Проаналізувати роботу машини і всі можливі сценарії аварій;
3. Урахувати специфіку застосування обладнання, включаючи тип, швидкість і виконувани завдання [6].

Засоби безпеки відіграють важливу роль у захисті робочого персоналу та зменшенні аварійних інцидентів у високоавтоматизованих промислових середовищах. Оснащення виробничих ліній сучасними пристроями безпеки не тільки підвищує безпеку працівників, але й сприяє підвищенню продуктивності та ефективності виробничого процесу.

Використання запобіжних пристроїв допомагає забезпечити високий рівень безпеки для робочого персоналу, знижує ризик нещасних випадків та сприяє більш безпечній та ефективній експлуатації обладнання у промисловому середовищі. Пристрої безпеки включають механічні обмежувачі, датчики, захисні бар'єри, аварійні зупинки та інші системи для запобігання аваріям. Безпека працівників може бути забезпечена за допомогою наступних пристроїв безпеки:

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

1. Захисна огорожа. Захист обладнання забезпечує безпечне відділення персоналу від потенційно небезпечних систем, таких як роботизовані комплекси з високою швидкістю роботи. Прикладом захисної огорожі є рис. 1.2.

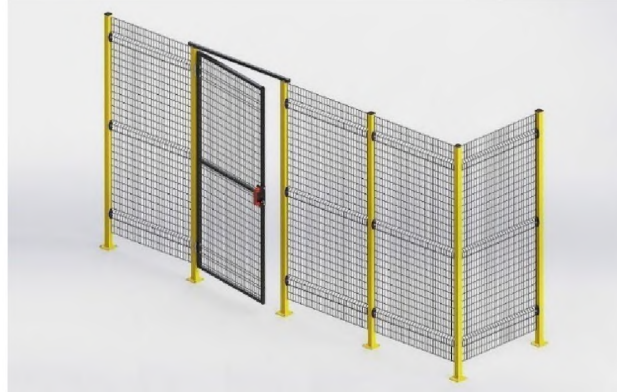


Рисунок 1.2 – Захисна огорожа AdaptaGuard від SATECH

2. Сканери безпечних зон. Лазерні сканери безпечних зон - це універсальні рішення для визначення небезпечних зон і захисту доступу, де вони сповіщають машину, коли працівники перебувають занадто близько. Прикладом таких сканерів є рис. 1.3.



а)



б)

а – RSL від Leuze; б – PSENscan від PILZ

Рисунок 1.3 – Сканери безпечних зон

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Адк.
Зм.	Адк.	№ докum.	Підпис	Дата		11

3. Захисні світлові завіси. Світлові завіси — це пристрої безпеки, які можна використовувати як для захист машини або створення віртуального бар'єру навколо небезпеки. Прикладом таких завіс є рис. 1.4.



а – SF4D від PANASONIC; б – MCL від Leuze

Рисунок 1.4 – Захисні світлові завіси

4. Радарні системи безпеки. Радіолокаційні системи безпеки - це пристрої, які використовують радіохвилі для виявлення присутності об'єктів поблизу у небезпечних зонах. Прикладом таких радарних систем є рис. 1.5.



а – LBK від Leuze; б – PSENradar від PILZ

Рисунок 1.5 – Радарні системи безпеки

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		12

5. Реле безпеки. Захисні реле реалізують функції безпеки, включаючи уповільнення руху машини, контроль положення та аварійну зупинку. Прикладом реле безпеки є рис. 1.6.



а)



б)

а – SIRIUS від Siemens; б – PNOZelog від PILZ

Рисунок 1.6 – Реле безпеки

6. Безпечні датчики наближення. Електронні та магнітні датчики безпеки перевіряють стан або положення рухомого об'єкта, дверей або люка, щоб забезпечити безпечний доступ для працівника. Прикладом магнітного датчика наближення є рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Магнітний датчики серії SIRIUS від Siemens

										Адк.
										13
Зм.	Адк.	№ док.	Підпис	Дата	БРМА24.00.00.000 ПЗ					

7. Запобіжні замки. Запобіжні вимикачі з блокувальними пристроями блокують двері, запобігаючи несанкціонованому доступу до чутливих або небезпечних зон. Прикладом механічних запобіжних замків є рис. 1.8.



а)



б)

а – PSENmech від PILZ; б – SIRIUS від Siemens

Рисунок 1.8 – Механічні запобіжні замки

8. Командні пристрої безпеки. Кнопки E-stop (аварійної зупинки) і канатні вимикачі використовуються, залежно від розміру небезпечної зони, для негайного введення команди зупинки в машині. Прикладом вимикачів для аварійної зупинки є рис. 1.9 [7].



а)



б)

а – E-Stop від Siemens; б – E-Stop від ABB

Рисунок 1.9 – Вимикачі E-stop

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		14

Оглянувши наявні пристрої для забезпечення безпеки машин, можна стверджувати, що вони відповідають різноманітним потребам у цій галузі. На ринку представлено численні компанії, які пропонують ці рішення, серед яких варто виділити таких виробників як Siemens, PILZ, Leuze та інші.

### 1.3 Огляд та аналіз безпечних програмовано логічних контролерів

Автоматизовані системи та системи безпеки не можуть ефективно функціонувати без використання програмованих логічних контролерів (ПЛК), які виступають в ролі центрального елемента в процесі автоматизації. Без цих пристроїв зазначені системи не мають змоги належним чином виконувати свою роль.

ПЛК — це пристрій для автоматизації процесів, використовуваний у промисловості, що забезпечує високу надійність та може працювати у складних умовах.

Безпечний ПЛК — це спеціалізований тип ПЛК для керування системами безпеки, який відповідає світовим стандартам безпеки і забезпечує високу надійність у керуванні критично важливими функціями безпеки.

ПЛК безпеки відрізняються від звичайних ПЛК наявністю додаткових апаратних та програмних засобів для забезпечення безпечної експлуатації. Вони мають резервні процесори і комунікаційні канали, що дозволяють системі продовжувати роботу при виході з ладу компонентів, а також програмне забезпечення для виявлення несправностей і здійснення аварійних дій для захисту системи. Безпечні ПЛК застосовують в промисловості, де збої можуть привести до травм або серйозних пошкоджень обладнання.

ПЛК і безпечні ПЛК - це важливі технології, що застосовуються у промислових і виробничих середовищах для автоматизації процесів і забезпечення безпеки та надійності. Безпечні ПЛК розроблені спеціально для виконання кри-

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

тичних функцій, пов'язаних з безпекою, і мають вбудовані апаратні та програмні функції для гарантування безпечної та надійної роботи [8].

На ринку можна знайти багато компаній, що розробляють ПЛК, але компанія Siemens виділяється як один з найпрестижніших світових виробників, яка задає тенденції автоматизації. Особливою є компанія PILZ, яка концентрує свою діяльність у галузі безпечної автоматизації. Siemens та PILZ є лідерами у сфері автоматизаційного обладнання. Siemens пропонує велику кількість різних ПЛК, які підходять для різноманітних застосувань і легко інтегруються з іншими продуктами та комунікаційними стандартами. PILZ спеціалізується на обладнанні для забезпечення безпеки, включно з безпечними ПЛК та сенсорами. Обидва бренди пропонують інтегровані рішення та підтримують стандарти комунікації. Siemens отримав світову популярність і широку мережу дистриб'юторів, в той час як PILZ має більш обмежену мережу і не такий популярний на ринку. У цьому контексті буде проведений порівняльний аналіз цих двох компаній.

Серед продуктів компанії Siemens важливе місце займають моделі Siemens SIMATIC S7-1500F та Siemens SIMATIC S7-1200F, які зображені на рис. 1.10. Вони розроблені з урахуванням стандартів функціональної безпеки та забезпечують безпечне управління для широкого спектру промислових застосувань.

Ці контролери мають високий рівень безпеки, оскільки вони базуються на процесорах F-CPU. Серія цих контролерів має вбудовані захищені функції, такі як безпечні вхідні/вихідні порти, безпечні перемикачі, безпечне керування та безпечні дозволи. Ці функції дозволяють використовувати безпечні методи розрахунків, моніторингу стану та комутації. Також ці контролери підтримують різноманітні модулі для локального та розподіленого введення-виведення, включаючи модулі F- і PROFIsafe. Вони можуть бути використані з промисловими мережами PROFIBUS DP і PROFINET IO, а також з профілем PROFIsafe. Ці контролери відповідають стандартам безпеки від SIL1 до SIL3 [9].

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



а)



б)

а – SIMATIC S7-1500F; б – SIMATIC S7-1200F

Рисунок 1.10 – ПЛК серії SIMATIC

Siemens надає обширні керівництва та засоби підтримки з безпечного програмування та використання серії SIMATIC. Це забезпечує зручність у використанні та налаштуванні контролера. Серія SIMATIC може легко інтегруватись з продуктами Siemens та іншими системами автоматизації. Це дозволяє забезпечити повну інтеграцію безпеки в системи автоматизації.

Для налаштування цих контролерів Siemens розробила середовище TIA Portal (скорочено від Totally Integrated Automation Portal), яке призначене для програмування та налаштування систем промислової автоматизації. Це програмне забезпечення забезпечує єдине середовище програмування для різних продуктів автоматизації Siemens, включаючи ПЛК, інтерфейси людина-машинна (HMI) та промислові комунікаційні мережі [9].

Компанія PILZ пропонує широкий асортимент безпечних ПЛК з інтегрованими безпечними входами, виходами та пристроями для аварійного вимкнення. Ці ПЛК можуть бути використані для впровадження безпечних функцій, таких як безпечне замикання та безпечне перемикування. У PILZ доступні дві серії:

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		17



вати з SafetyNET - системою безпеки лінійної архітектури. Крім того, вони мають SD-карту для зберігання проекту пристрою та конфігураційних даних. Контролери відповідають міжнародним стандартам безпеки PL e, а також стандартам EN 81-1/2 і EN 50129.

PILZ пропонує програмне забезпечення та конфігураційні засоби, які допомагають в налаштуванні та програмуванні безпечних ПЛК. Це робить PILZ простим у використанні, зокрема для користувачів з невеликим досвідом у безпечі промислових систем.

Для налаштування контролерів серії PNOZMulti можна використовувати середовище PNOZmulti Configurator, а для контролерів серії PSSuniversal доступне середовище PSS 4000.

Програмне забезпечення PNOZmulti Configurator призначене для створення безпечних схем для контролерів PNOZMulti. Його інтерфейс має графічний дизайн з іконками та меню для простого вибору елементів безпеки. Є вбудована онлайн-довідка, яка надає підтримку під час налаштування, а також автоматичну перевірку наявних помилок програми.

Програмне забезпечення PAS4000 спрощує налаштування та програмування системи автоматизації на основі PSSuniversal. Це включає різноманітні редактори та програмні блоки, які повністю взаємодіють між собою і забезпечують стандартизовані інтерфейси для обміну даними. Усе програмування і конфігурація відбуваються в одному зручному середовищі, де забезпечується простота виконання. Крім того, PAS4000 підтримує широку мовну підтримку [10].

При виборі між Siemens та PILZ для застосування в безпечних автоматизованих системах, слід глибше розглянути конкретні вимоги до проекту та переваги користувача, адже обидві марки мають свої сильні сторони. Siemens є глобальним лідером у галузі промислової автоматизації, пропонуючи програмовані логічні контролери, системи збору даних та інтерфейси оператора, з акцентом

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

на інтеграцію, модульність та масштабованість. PILZ спеціалізується на технологіях безпеки та автоматизації з фокусом на контрольні системи безпеки, реле безпеки та сенсорну техніку, відповідаючи високим стандартам і міжнародним нормам. Вибір між Siemens і PILZ залежить від потреб проекту, вимог до безпеки, бюджету та переваг потрібних користувачу.

#### 1.4 Висновок до першого розділу

Технології невпинно розвиваються, при цьому нові ідеї та інновації з'являються з вражаючою швидкістю. В умовах старіння робочої сили та зменшення зацікавленості в фізичній праці, в тому числі на заводах та висококваліфікованих професіях, автоматизовані системи стають необхідністю для забезпечення ефективного виробничого процесу.

Водночас, безпека праці повинна залишатися пріоритетом: неухильне дотримання безпекових стандартів та впровадження належних захисних засобів і програмування є ключовим для створення безпечних та комфортних умов праці на сучасних підприємствах. Для забезпечення безпеки існує багато запобіжних пристроїв, таких як захисні огорожі, сканери безпечних зон, світлові завіси, радарні системи, реле безпеки, безпечні датчики наближення, запобіжні замки та командні пристрої безпеки, в тому числі кнопки аварійної зупинки. З проведеного огляду на наявні пристрої для забезпечення безпеки машин, можна стверджувати, що вони відповідають різноманітним потребам для забезпечення різних потреб безпеки у різних галузях промисловості.

ПЛК відіграють важливу роль у автоматизації та системах безпеки, працюючи в центрі автоматизованих процесів. Безпечні ПЛК забезпечують надійність та безпеку для керування критично важливими функціями та мають додаткові засоби для виявлення несправностей та аварійних дій. Після проведеного порівняльного аналізу Siemens і PILZ для подальшої розробки стенду, було вирішено вибрати обладнання від PILZ. Основною причиною такого вибору була

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

простота використання їхніх модулів. PILZ пропонує широкий вибір комунікаційних пристроїв для з'єднання з іншими брендами ПЛК, такими як Rockwell, Siemens і Mitsubishi. Крім того, їхнє програмне забезпечення легко використовувати. Також варто зазначити, що їхні реле безпеки доступні за прийнятною ціною і мають розширені функціональні можливості, що забезпечує високий рівень безпеки.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докцм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## 2 Розробка конструкції стенду з безпеки машин

### 2.1 Вибір форми стенду

Навчальний стенд, який був розроблений, має форму паралелепіпеду. Такий вибір форми був зроблений задля забезпечення зручності розміщення та ефективного функціонування додаткового обладнання, яке може бути навішане на стенд. Форма паралелепіпеду також спрощує модульну конструкцію, забезпечує стійкість стенду та сприяє легкості його транспортування та зберігання. Форму конструкції стенду зображено на рис. 2.1.

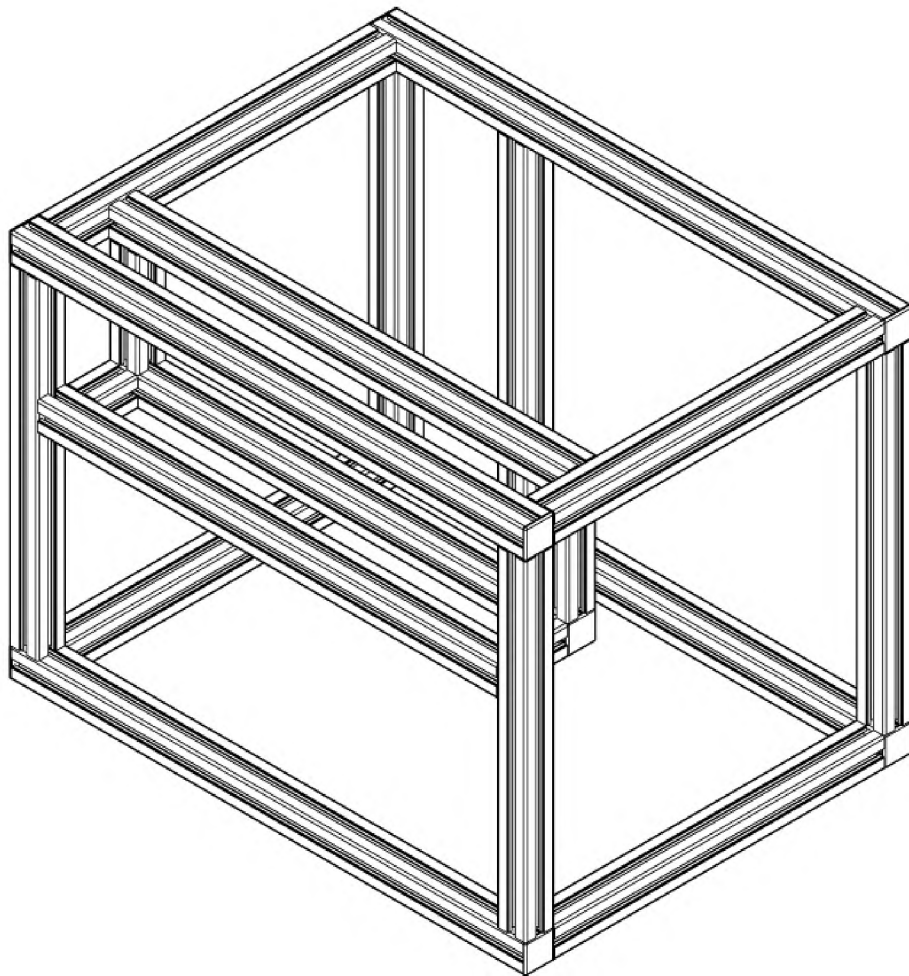


Рисунок 2.1 – Форма рами стенду у ізометричній проекції

										Арк.
										22
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата	БРМА24.00.00.000 ПЗ					

## 2.2 Вибір форми профілю для стенду

При проектуванні рами для даного стенда були вивчені різноманітні види профілів, проте остаточний вибір зупинився на верстатному профілі з огляду на його численні переваги, тому що на нього можна легко навішувати потрібне обладнання, що є великою вигодою для багатофункціональних навчальних стендів. Також використання верстатного профілю спрощує монтаж, оскільки він універсальний і не вимагає спеціальних додаткових операцій чи процесів при установці обладнання.

На основі детального дослідження технічних характеристик і аналізу сумісності з обладнанням, що планується встановлювати, було обрано верстатний профіль з параметрами 45x45 мм. Цей профіль не тільки відповідає всім потребам з точки зору міцності та стійкості конструкції, але й оптимально підходить за габаритами. Вибраний профіль представлений на рис. 2.2.

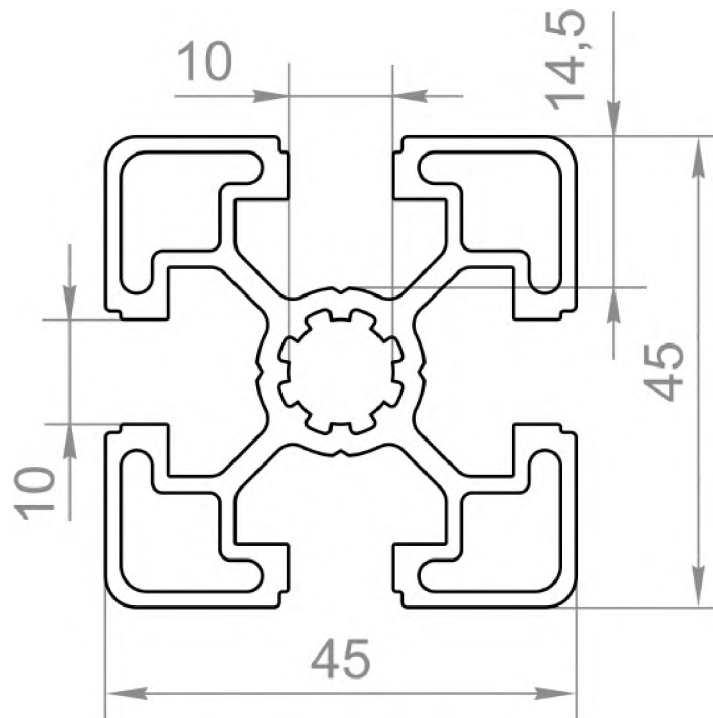


Рисунок 2.2 – Форма верстатного профілю

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		

### 2.3 Блок керування

Блок керування складається з комбінації одного контролера PNOZ m B1 (рис. 2.3), трьох допоміжних контролерів PNOZ m EF 8DI4DO (рис 2.4), а також терміналу візуалізації PMVisu (рис 2.5). PNOZ m B1 та PNOZ m EF 8DI4DO класифікуються як безпечні компактні контролери серії PNOZmulti 2.



Рисунок 2.3 - Базовий контролер PNOZ m B1

Основний модуль PNOZ m B1 надає змогу використовувати його як самостійний елемент, або у співпраці з максимум одним модулем вводу або виводу в системі.

В перевагах слід відмітити безпечну роботу завдяки сертифікованому апаратному забезпеченню та функціональному, легко зрозумілому програмному забезпеченню. Система відповідає міжнародному стандарту безпеки, призначеного для різних середовищ автоматизації та мережевих систем.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		24

Базові блоки PNOZmulti 2 мають підсвічений дисплей для простого введення в експлуатацію та діагностики. Дисплей відображає інформацію про проблеми, статус пристрою, напругу, вхідні і вихідні сигнали, та персоналізований текст. Можна підключити до 4 додаткових модулів розширення, 1 модуль зв'язку та 1 промисловий мережевий модуль. Також передбачена заміна пам'яті програми та наявність діагностичного інтерфейсу.

Технічний опис базового контролера PNOZ m B1.

Таблиця 2.1 – Технічний опис PNOZ m B1 [15]

Артикул	Pilz 772101
Стандартний модуль	Так
Кількість виходів. з тестовими імпульсами	4
Вид напруги живлення	Постійний струм
Вид клеми	Сепараторна клема полюсна та клема гвинтова
Вид клеми	Плагін
Габарити, мм	45
Габарити за висотою, мм	120.2
Габарити, мм	98.
Вага бруто, г	219
Вага нетто, г	209
Температура довкілля, °C	0 - 60

Контролер PNOZ m EF 8DI4DO є компонентом модульної системи безпеки PNOZmulti 2, яка користується популярністю у багатьох галузях промисловості завдяки своїй універсальності і можливості налаштування для задоволення потреб різноманітних застосувань. Ці модулі легко інтегруються у складні системи безпеки, забезпечуючи не тільки базовий захист, але й високий рівень налаштування до конкретних умов експлуатації.

Він має 8 безпечних цифрових входів, які призначені для сприйняття та обробки сигналів від периферійних пристроїв та крім того, він обладнаний 4 безпечними напівпровідниковими виходами, які дозволяють контролювати роботу підключених до нього пристроїв. Цей розроблений з урахуванням безпеки контролер є високою технологічним пристроєм, що може бути програмованим для виконання широкого спектра завдань з контролю та моніторингу.



Рисунок 2.4 – Допоміжний контролер PNOZ m EF 8DI4DO

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		26

Технічний опис допоміжного контролера PNOZ m EF 8DI4DO.

Таблиця 2.2 – Технічний опис PNOZ m EF 8DI4DO [15]

Артикул	Pilz 772142
У цифрових входів:	8
Положення-перемикача вихід однопол. напівпровідника:	4
Вигляд клеми	Плагін
Габарити завширшки, мм	22,5
Габарити за висотою, мм	101,4
Габарити за глибиною, мм	120
Вага бруто, г	115
Вага нетто, г	105
Температура навколишнього се- редовища, °C	0 - 60

PMIvisu - це візуалізаційний термінал з вже встановленим програмним забезпеченням PAsvisu. Людино-машинні інтерфейси Pilz (PMI) діють як зв'язок між людиною та машиною, маючи на увазі надзвичайну ефективність і інтуїтивність у використанні. Блоки керування PMIvisu відрізняються професійною візуалізацією через PAsvisu, швидкою обробкою даних завдяки потужним процесорам, ефективним налаштуванням проекту через координовані НМІ-функції, легкістю вводу в експлуатацію з PMI Assistant/Manager, підтримкою Unicode для міжнародного використання, інтегрованим адмініструванням користувачів, інтеграцією до 500 змінних для обміну з контролером і великою бібліотекою [15].

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.5 – Термінал РМІ v707e

Технічний опис терміналу РМІ v707e.

Таблиця 2.3 – Технічний опис РМІ v707e [15]

Артикул	Pilz 266707
Напруга живлення, В	24
Кількість головних USB-інтерфейсів	1
Тип головного USB-інтерфейсу	USB 2.0, тип А
Роздільна здатність дисплея	800 x 480
Частота процесора, МГц	800
ОЗУ, МВ	512 МВ
Габарити завширшки, мм	200
Габарити за висотою, мм	142

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.

28



ваний веб-сервер для конфігурації, управління користувачами і світлодіодний індикатор для інформування користувача.

Технічний опис модуля P1Tmode.

Таблиця 2.4 – Технічний опис P1Tmode [15]

Артикул	Pilz 402240
Напруга живлення, В	24
Число входів	3
Захист П/П виходу від КЗ	Так
Робоча частота, кГц	125
Габарити завширшки, мм	98
Габарити за висотою, мм	55
Габарити за глибиною, мм	43
Вага бруто, г	260
Вага нетто, г	140

Світлові завіси безпеки Pilz PSENopt є надзвичайно ефективним рішенням для виробничих зон, де потрібно дотримуватися мінімально можливих безпечних відстаней. Вони розроблені таким чином, щоб забезпечувати надійний захист робочих зон, швидко реагуючи на будь-яке перешкоджання у зоні детекції, таке як зачеплення пальців або рук, і відразу ж ініціюють процедуру безпечного вимкнення обладнання.

Завіси серії PSENopt економлять виробничий простір, підходять для відкритих та обмежених зон а також легкі в установці та обслуговуванні. Світлові завіси сертифіковані відповідно до міжнародних стандартів безпеки та забезпечують надійну роботу в системах автоматизованої безпеки.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.7– Світлова завіса PSENopt

Технічний опис світлової завіси PSENopt

Таблиця 2.5 – Технічний опис PSENopt [15]

Принцип датчика	Інфрачервоний
Висота захищеного поля	300
Тип захисного дозволу	Палець
Робочий діапазон, м	0.2 - 8
Напруга живлення, В	24
Використ. діапазон довжин хвиль, нм	850
Число виходів OSSD	2

Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.

31

## Продовження таблиці 2.5

Час реакції, мс	7.2
Розмір за висотою, мм	304
Розмір по ширині, мм	35
Розмір по глибині, мм	40
Вага брутто, г	2320
Вага нетто, г	1025

PSENSlock - це електромагнітний запобіжний замок, який широко використовується в системах безпеки для контролю розпашних та розсувних воріт, машинних кришок і клапанів в різних промислових галузях. Цей пристрій особливо корисний, коли необхідно забезпечити безпечний доступ до потенційно небезпечних зон, наприклад, на виробничих лініях або на дослідницьких об'єктах.

PSENSlock має потужний механізм утримання, який забезпечує силу утримання на рівні 1000 або 2000 Н. Це гарантує надійне закриття обмежених зон до моменту безпечного їх відкриття. Високий рівень захисту IP67/IP6K9K означає повну захищеність від пилу та здатність витримувати струмені води з усіх боків. Цей замок ідеально підходить для експлуатації в складних умовах, включаючи роботу під високим тиском, що є характерним для харчової, пакувальної та фармацевтичної промисловостей.

PSENSlock на своєму корпусі світлодіоди для індикації стану для полегшення діагностики та швидкого доступу до інформації про стан замка. Він дозволяє налаштування замка згідно з індивідуальними потребами користувача. залежні або незалежні блокувальні виходи, що забезпечують гнучкість в інтеграції із системами безпеки.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.8 – Запобіжний замок PSENSlock

Технічний опис запобіжного замка PSENSlock

Таблиця 2.6 – Технічний опис PSENSlock [15]

Артикул	Pilz 570501
Вигляд програмування:	Програмований
Кількість виходів OSSD:	2
Кількість входів	2
Напруга живлення, В	24
Споживана потужність, Ватт	4,8
Робоча частота, кГц	122-128

## Продовження таблиці 2.6

Розмір за висотою, мм	122
Розмір по ширині, мм	45
Розмір по глибині, мм	44
Вага бруто, г	990
Вага нетто, г	950
Температура навколишнього середовища, °С	-25 - 55

## 2.5 Електромеханічний замок з окремим керуванням

Цей блок складається з модулів PITgatebox (рис. 2.8) та PSENmlock (рис. 2.9). PITgatebox - це кнопочний модуль, який має PITreader для радіочастотної ідентифікації (RFID). Він використовується для контрольованого доступу до механізмів захисту та систем безпеки, що знаходяться в промисловому середовищі. Завдяки використанню RFID-технології, модуль забезпечує високий рівень безпеки, оскільки дозволяє отримувати доступ тільки авторизованим особам. Ключовим аспектом є можливість налаштування рівнів доступу залежно від кваліфікації та прав співробітників.

PITgatebox доступний у кількох конфігураціях, щоб задовольнити широкий спектр потреб. Корпус розроблено для витримування ударів і вібрацій, часто трапляються в промислових умовах, виготовлений з високоміцних матеріалів для надійної роботи протягом тривалого часу. Також, одним з переваг PITgatebox є його легкість установки на стандартні профільні системи, що робить його ідеальним для встановлення в сучасні промислові процеси.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		34



Рисунок 2.9 – Модуль PIEgatebox

Технічний опис модуля PIEgatebox.

Таблиця 2.7 – Технічний опис PIEgatebox [15]

Артикул	Pilz G1000020
Кількість, E-STOP N/C	2
Номер, контакт сигналу E-STOP	1
Аварійна зупинка шляхом роз'єднання	"Повернути, щоб відкрити"
Напруга живлення, В	24
Споживана потужність, Ватт	3,5

Продовження таблиці 2.7

Принцип датчика PIRreader	Приймач
Робоча частота PIRreader, МГц	13,24-13,88
Розмір за висотою, мм	320
Розмір по ширині, мм	40
Розмір по глибині, мм	40
Вага бруто, г	1329
Вага нетто, г	920
Температура навколишнього середовища, °С	-20 - 55

Блокувальний механізм PSENmlock від компанії Pilz забезпечує високий рівень безпечного блокування та замикання, що робить його ідеальним рішенням для застосування в машинах з небезпечними робочими процесами, де необхідний високий рівень захисту для персоналу та устаткування.

PSENmlock - це захисний замковий пристрій з високою міцністю утримання до 7500 Н. Він має легку діагностику за допомогою світлодіодних індикаторів на трьох сторонах, міцний корпус і механізм, що забезпечують довговічність, а також компенсацію нерівностей і запобігання ненавмисній активації блокування. PSENmlock відповідає стандарту EN ISO 14119 і має захист за стандартом IP67. Додаткові опції включають версії для послідовного підключення з або без скидання живлення, різні варіанти кодування, а також різні типи підключення, включаючи M12 з 8 або 12 контактами та через косичку.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.10 – Блокувальний механізм PSENmlock

Технічний опис блокувального механізму PSENmlock

Таблица 2.8 – Технічний опис PSENmlock [15]

Артикул	Pilz 570400
Напруга живлення, В	24
Споживана потужність , Ватт	1
Число входів	2
Робоча частота, кГц	122-128
Розмір за висотою, мм	217,2

Продовження таблиці 2.8

Розмір по ширині, мм	40
Розмір по глибині, мм	40
Вага брутто, г	1450
Вага нетто, г	1100
Температура навколишнього середовища, °С	0 - 60

## 2.6 Електромеханічний замок з вбудованим керуванням

Система захисних воріт PSENsgate (рис. 2.11) поєднує в одній системі контроль захисних воріт, замикання захисних огорожень та елементи керування. Система має високу гнучкість і доступна з різноманітними типами елементів керування. Вона також має функції, такі як аварійна зупинка та звільнення. Моніторинг захисних воріт, замикання огорож і контроль над зламаними засувами, все це присутнє в одній системі, з встановленими пристроями аварійної зупинки та елементами керування.

Система PSENsgate може бути легко адаптована до різних розмірів і типів воріт, а також підлаштована під зміни в технічних вимогах чи процесах виробництва. Вона забезпечує високий рівень інтеграції безпеки та обладнання для складної автоматизації. Система PSENsgate відповідає міжнародним стандартам безпеки EN/ISO 13849-1, EN/IEC 62061, забезпечуючи безпеку в робочому середовищі. Система має максимальний захист від маніпуляцій, підходить для обох боків розпашних воріт, має інтегровану функцію очищення і може бути послідовно з'єднана з PSENSlock, PSENsgate,

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.11 - Система захисних воріт PSENsgate

Технічний опис системи захисних воріт PSENsgate

Таблиця 2.9 – Технічний опис PSENsgate [15]

Артикул	Pilz 570802
Напруга живлення, В	24
Споживана потужність , Ватт	2
Число входів	2
Робоча частота, кГц	122-128
Розмір за висотою, мм	217,2

## Продовження таблиці 2.9

Розмір за висотою, мм	465
Розмір по ширині, мм	200
Розмір по глибині, мм	108
Вага брутто, г	2950
Вага нетто, г	2570
Температура навколишнього середовища, °С	-20 - 55

## 2.6 Висновок до другого розділу

У даному розділі було здійснено детальний аналіз та підбір модулів та блоків для навчального стенду, котрий наглядно демонструватиме різноманітні механізми захисту та керування виробництва, розроблені компанією PILZ.

При виборі найпоширенішого варіанту безпекового обладнання основними критеріями вибору компонентів були їх гнучкість, мультимодальність, ефективність та інтегрованість. Аналіз включав перегляд специфікацій, характеристик і відгуків користувачів для кожного елемента потенційного обладнання.

У даному розділі сформульовано виважені рекомендації стосовно компонентів науково-навчального стенду, який ілюструє можливості компанії PILZ. Всі обрані модулі та елементи відзначаються високою надійністю, ефективністю та адаптивністю до різноманітних виробничих середовищ, що робить їх ідеальними для демонстрації продукції зазначеної компанії.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

### 3 Розрахунки, що підтвержують працездатність

#### 3.1 Аналітичний розрахунок балкових конструкцій на міцність та оцінка міцності за нормальними напруженнями

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.

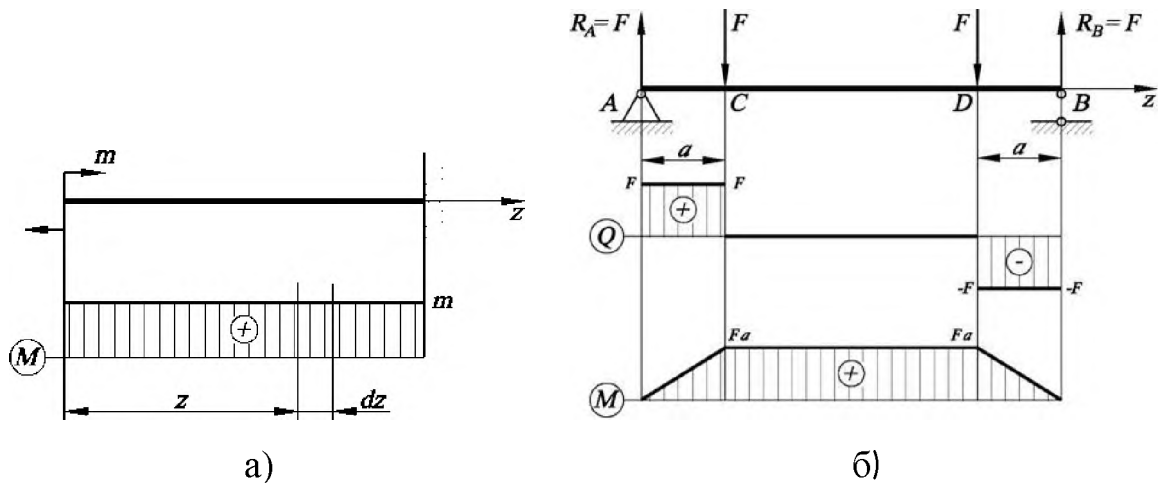
В балці, зображеній на рис. 3.1, а, чистий згин виникає в усіх поперечних перерізах, для схеми рис. 3.1, б - тільки на ділянці  $CD$  між прикладеними силами.

Момент  $M$  є інтегральною величиною, яка представляє собою суму моментів елементарних зусиль  $\sigma \cdot dA$ , 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 легкодеформівного матеріалу, наприклад, з гуми. На бокові грані моделі нанесемо ортогональну сітку поздовжніх та поперечних ліній. Піс-

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

ля 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 вкорочуються.



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 викривляються, а тільки повертаються на деякий кут. Ця гіпотеза має назву *гіпотези плоских перерізів (гіпотеза Бернуллі)*;
2. Поздовжні волокна викривляючись вільно видовжуються чи вкорочуються 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.

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (3.1)$$

									Арк.
									42
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дата					

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  $\rho$ ), але не змінить своєї довжини  $dz$ .

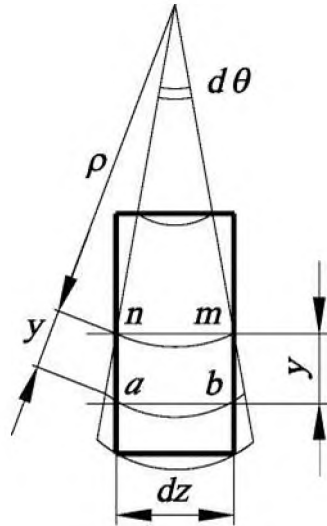


Рисунок 3.2 – Напрямок деформації у перерізі

$$\bar{n\bar{m}} = \rho d\theta = \overline{n\bar{m}} = dz. \quad (3.2)$$

Довільно розташоване волокно  $ab$  перетвориться в дугу:

$$\bar{ab} = (\rho + y)d\theta, \quad (3.3)$$

і видовжиться на величину:

$$\bar{ab} - \overline{ab} = (\rho + y)d\theta - \rho d\theta = yd\theta. \quad (3.4)$$

Відносна деформація волокна  $ab$ :

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon = \frac{\overline{a\tilde{b}} - \overline{ab}}{\overline{ab}} = \frac{yd\theta}{pd\theta} = \frac{y}{p}. \quad (3.5)$$

За законом Гука (3.1):

$$\sigma = E\varepsilon = E\frac{y}{p}. \quad (3.6)$$

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  $p$ ;
- невідоме положення нейтрального шару, від якого відраховується ордината  $y$ .

Конкретизуємо формулу (3.6). Розглянемо елемент балки, що працює в умовах чистого згину (рис. 3.3).

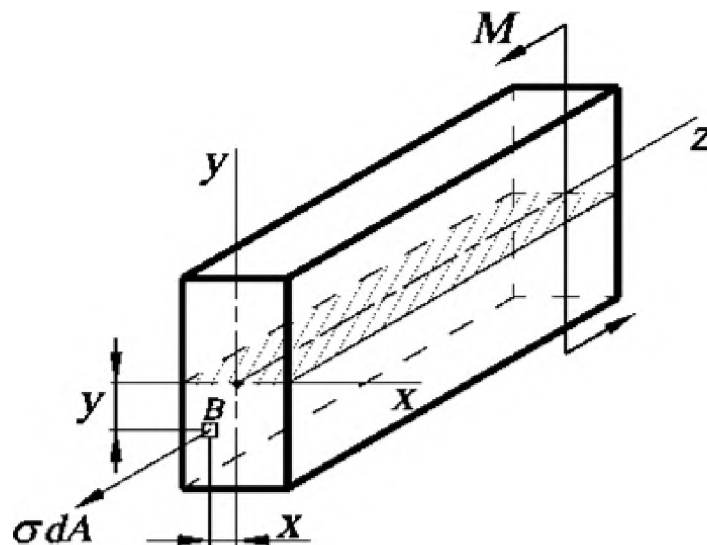


Рисунок 3.3 – Показ сил що діють в балці

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		44

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.

Використаємо рівняння рівноваги:

$$\sum Z = 0;$$

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

З урахуванням (3.6):

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

Оскільки  $\frac{E}{p} \neq 0$ , 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:

$$\sum m_y = 0;$$

$$\int_A \sigma dAx = 0;$$

$$\int_A E \frac{y}{p} x dA = \frac{E}{p} \int_A xy dA = \frac{E}{p} I_x = 0. \quad (3.8)$$

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

З одержаного виразу можна зробити висновок, що:

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

Відцентровий момент інерції дорівнює нулю відносно головних осей. Отже, осі  $x$ ,  $y$  є головними.

Таким чином, нейтральна вісь  $x$  є головною центральною віссю перерізу.

Використаємо третє рівняння рівноваги:

$$\begin{aligned} \sum m_x &= 0; \\ \int_A \sigma dAy - M &= 0; \\ \int_A \frac{E}{p} y \cdot y \cdot dA &= \frac{E}{p} \int_A y^2 dA = \frac{E}{p} I_x = M; \end{aligned} \quad (3.9)$$

або

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

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:

$$\sigma = Ey \frac{M}{EI_x} = \frac{My}{I_x}. \quad (3.11)$$

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

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

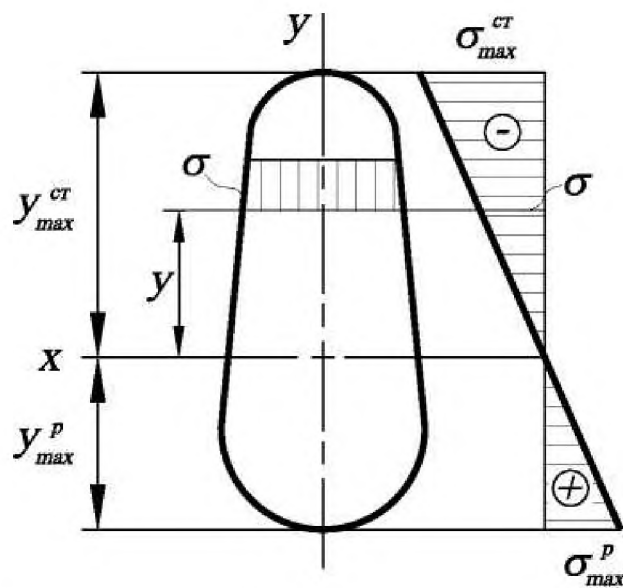


Рисунок 3.4 – Епюра розтягувальних і стискальних напружень

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

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{max}^P = \sigma_{max}^{cm} = \sigma_{max} = M \frac{y_{max}}{I_x}$$

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

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

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

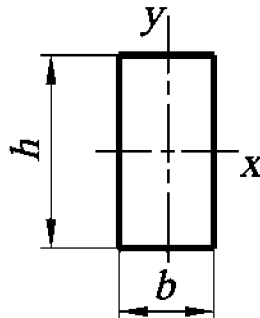


Рисунок 3.5 – Прямокутний переріз

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

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

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

Для прокатних профілів  $W$  визначається за таблицями сортаменту.[3]

Розглянемо методику оцінки міцності балки за нормальними напруженнями. Умову міцності балки за нормальними напруженнями можна записати у вигляді:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma].$$

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

Розглянемо основні випадки.

1) Матеріал балки пластичний,  $[\sigma]_p = [\sigma]_{cm} = [\sigma]$ . Рациональним 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:

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

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

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

б) нейтральна вісь є віссю симетрії.

Умови міцності:

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

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 [16].

ті [16].

Отже проведемо розрахунки. Вхідними умовами є:

$$b = 45 \text{ мм} = 0,045 \text{ м};$$

$$h = 45 \text{ мм} = 0,045 \text{ м}.$$

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

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0,045 \cdot 0,045^2}{6} \approx 0,0000151875 \text{ м}^3;$$

$$M = 0,000165444375 \text{ Нм}.$$

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

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{0,000165444375}{0,0000151875} \approx 10,89 \text{ МПа}.$$

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		

### 3.2 Програмний розрахунок балок на міцність та оцінка міцності балки за допомогою програмного забезпечення SolidWorks

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.

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.

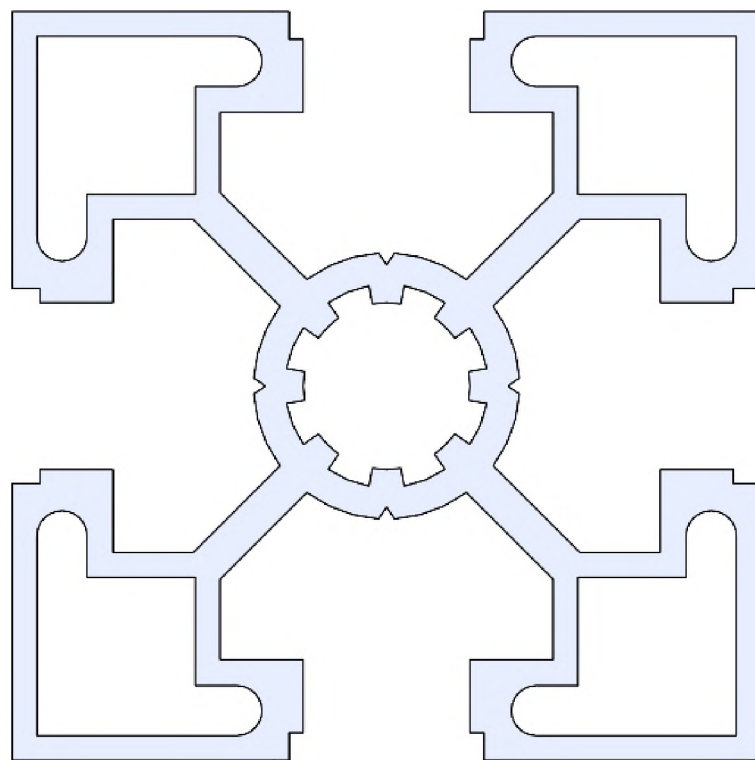


Рисунок 3.6 – Спрощена форма профілю

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

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) [17].

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

- у вікні менеджера властивостей PropertyManager - Edit Joints (Редагувати з'єднання) в розділі Selected Beams (Обрані балки) натискаємо Calculate (Обчислити). У вікні Results (Результати) відобразяться 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 [17].

3. Встановлюємо матеріал для балки. Для цього 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) із бібліотеки матеріалів SOLIDWORKS [17].

4. З'єднання визначаються автоматично на кожному місці перетину двох або більше балок (рис. 3.7). Ці автоматично визначенні точки кріплення допоможуть у проставленні закріплень та дії сил на раму [17].

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		





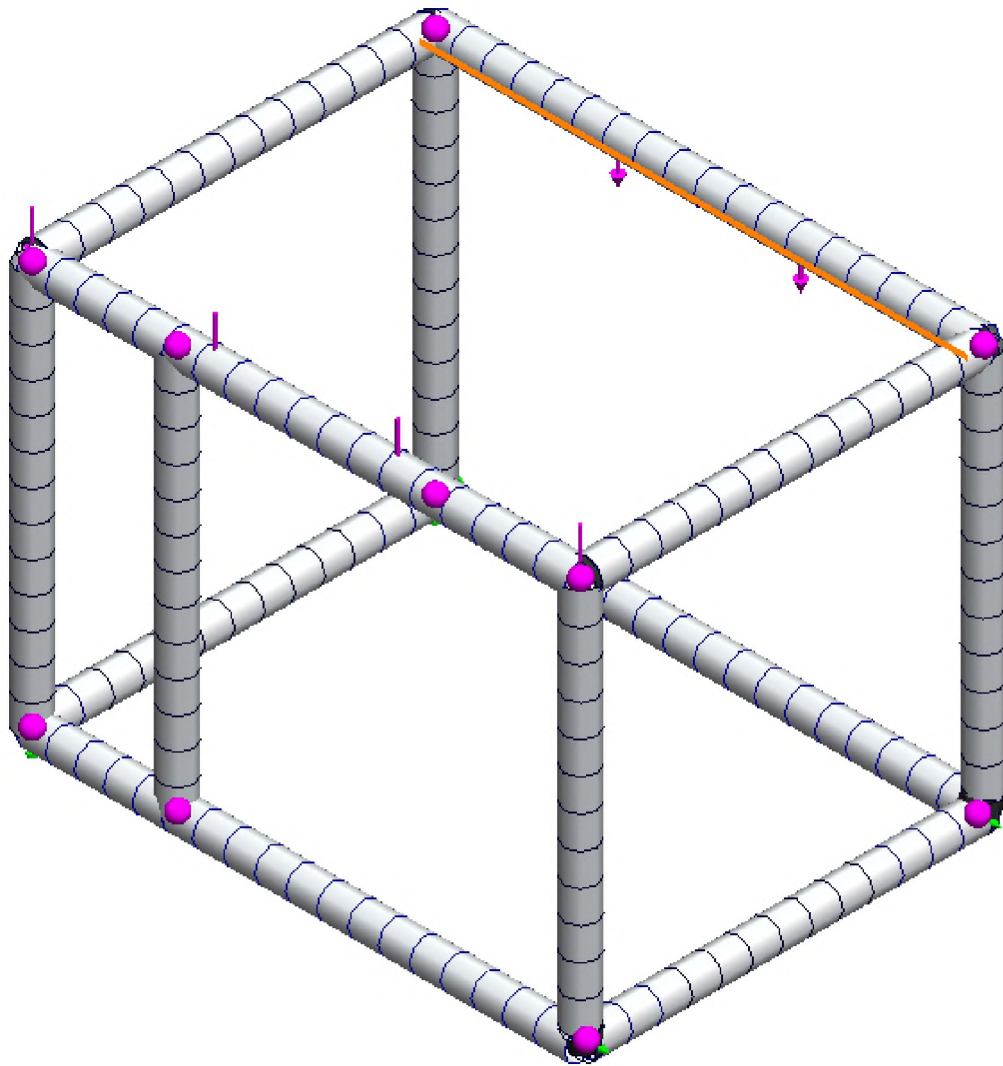


Рисунок 3.9 – Математична сітка моделі рами

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 – 5,29 кг;
- об'єм – 0,01м<sup>3</sup>;
- щільність – 1000 кг/м<sup>3</sup>.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		55

Результати досліджень:

1) Границя текучості (рис 3.10);

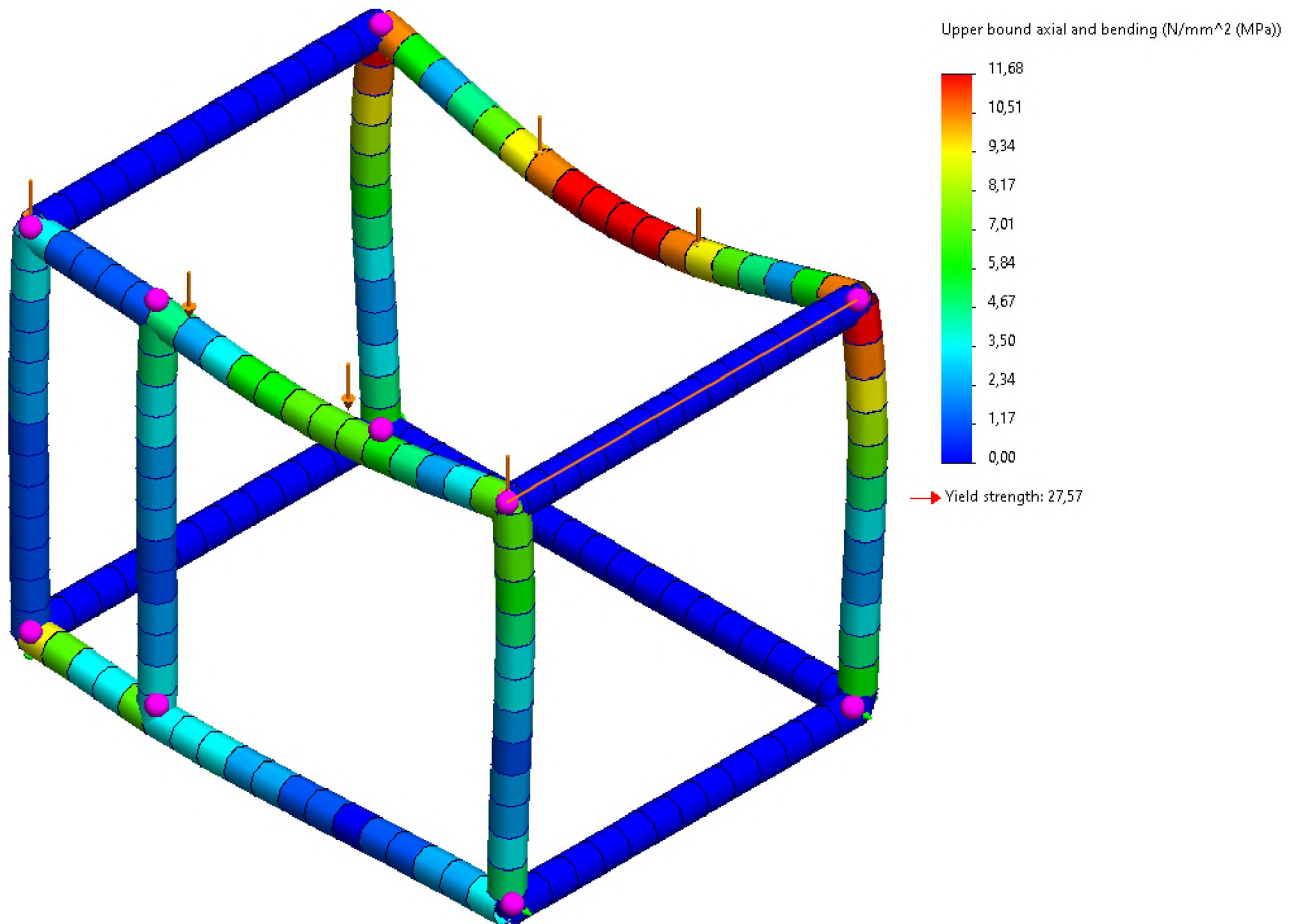


Рисунок 3.10 – Візуалізація границі текучості матеріалу дослідженні

Таблиця 3.1 – Значення границ текучості

Макс.	Мін.
11,68 МПа	0 МПа
Елемент: 12	Елемент: 43

Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата

БРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.

56

1) Переміщення (рис 3.11);

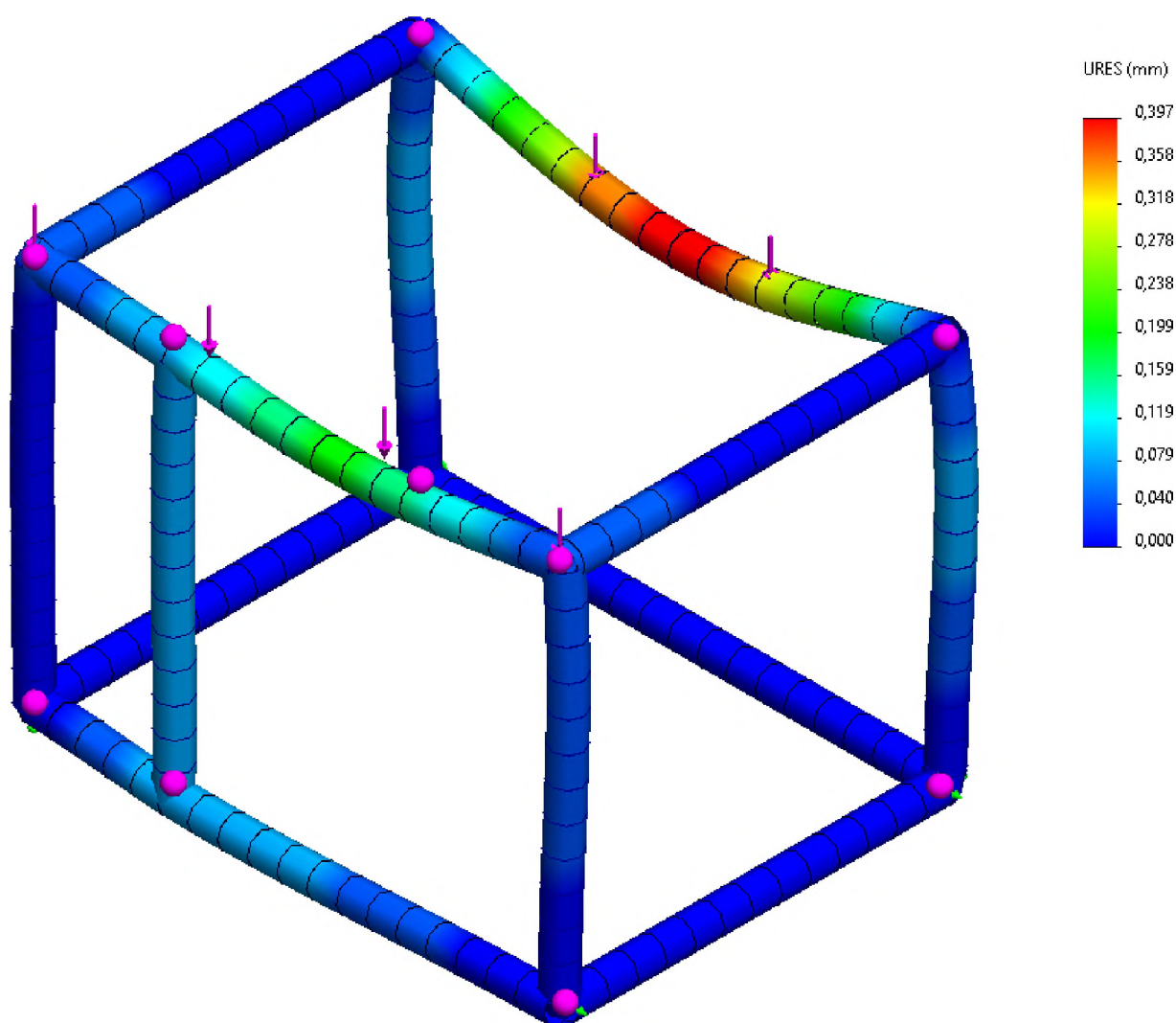


Рисунок 3.11 – Візуалізація руху матеріалу під впливом сили у дослідженні.

Таблиця 3.2 – Значення переміщень

Макс.	Мін.
0,397 мм	0 мм
Вузол: 127	Вузол: 9



### 3.3 Висновок до третього розділу

Провівши розрахунки, аналітичний та програмний розрахунок, ми можемо їх порівняти. Аналітично відповідь виходить 10,89 МПа напруження, яке витримує балка, а програмний розрахунок показує 11,68 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 1500 Н, що приблизно дорівнює 150 кг, загальна конструкція має коефіцієнт запасу міцності рівний 2, що є більш ніж достатньо для забезпечення надійності конструкції стенду.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

## Висновки

У процесі роботи було проаналізовано проблеми безпеки на виробництвах і проведено огляд існуючих рішень для забезпечення безпеки на підприємствах. Аналіз показав, що безпечні ПЛК відіграють ключову роль у безаварійному функціонуванні обладнання.

Спроектовано конструкцію стенду, що наочно демонструє принципи безпеки автоматизованих систем. Після проведеного порівняльного аналізу для подальшої розробки стенду, було вирішено вибрати обладнання від PILZ. При виборі обладнання основним критерієм була надійність, довговічність та ергономічність, щоб забезпечити максимальний комфорт та зручність у використанні а також гнучкість, мультимодальність, ефективність та інтегрованість. Вибір базувався на аналізі специфікацій, характеристик і відгуків користувачів.

Для підтвердження міцності та надійності конструкцій стенду були проведені аналітичні та програмні розрахунки. Розрахунки показали, що різниця між двома методами є несуттєвою. Обидва методи показали, що конструкція та вибір форми профілю є вірними та витримують досить суттєві навантаження.

Отриманий стенд призначений для навчальних цілей; він дозволяє проводити тренінги та демонстрації з безпеки на виробництві, що сприятиме кращому розумінню систем безпеки в автоматизованих умовах виробництва майбутніми фахівцями.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

## Перелік джерел посилань

1. Automation Safety. Assessing the risks and understanding safeguards [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://aeasseinclud.es.asp.org/professionalsafety/pastissues/051/12/021206AS.pdf>

(дата звернення 19.03.2024).

2. Safety in Automation [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

[https://www.profibus.com/technology-1/alt/alt/1/1/functional-safety/safety-in-](https://www.profibus.com/technology-1/alt/alt/1/1/functional-safety/safety-in-automation)

[automation](https://www.profibus.com/technology-1/alt/alt/1/1/functional-safety/safety-in-automation) (дата звернення 14.03.2024).

3. The importance of machine safety [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wieland-safety.com/2023/06/22/the-importance-of-machine-safety/>

(дата звернення 25.02.2024).

4. The Importance of Hazard Analysis in Workplace Safety [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.hse-network.com/the-importance-of-hazard-](https://www.hse-network.com/the-importance-of-hazard-analysis-in-workplace-safety/)

[analysis-in-workplace-safety/](https://www.hse-network.com/the-importance-of-hazard-analysis-in-workplace-safety/) (дата звернення 7.06.2024).

5. The benefits of automation in workplace safety [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://op-tec.co.uk/knowledge/benefits-of-automation-technology-](https://op-tec.co.uk/knowledge/benefits-of-automation-technology-in-workplace-safety)

[in-workplace-safety](https://op-tec.co.uk/knowledge/benefits-of-automation-technology-in-workplace-safety) (дата звернення 19.04.2024).

6. Top 10 Machine Safety Devices [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mpsasafety.com/blog/ten-common-machine-safety-devices> (дата звернення 3.03.2024).

7. Machine Safety [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://neffautomation.com/machinesafety> (дата звернення 29.05.2024).

8. PLC vs. Safety PLC – What are the Differences? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.plctable.com/plc-vs-safety-plc/> (дата звернення

10.02.2024).

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Адк.
						61
Зм.	Адк.	№ докцм.	Підпис	Дата		

9. Siemens [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.siemens.com/global/en.html?ste\\_sid=e39a0f0b73986f166e733f98ead89e1e](https://www.siemens.com/global/en.html?ste_sid=e39a0f0b73986f166e733f98ead89e1e) (дата звернення 15.04.2024).
10. Satech [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.satech.it/en/> (дата звернення 22.05.2024).
11. Leuze [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.leuze.com/en-in/> (дата звернення 11.06.2024).
12. Panasonic Industry [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://na.industrial.panasonic.com/products/sensors> (дата звернення 27.02.2024).
13. ABB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://global.abb/group/en> (дата звернення 8.05.2024).
14. PILZ. Safety in automation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pilz.com/en-INT/products/we-automate-safely/benefits-safety> (дата звернення 10.05.2024)
15. PILZ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pilz.com/en-PT/eshop> (дата звернення 10.05.2024)
16. Оцінка міцності балки за нормальними напруженнями. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [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) (дата звернення 17.03.2024)
17. Харжевський В. О. Системи інженерного аналізу: Методичні рекомендації Хмельницький: ХНУ, 2024 - 70 с.

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докum.	Підпис	Дата		62

# ДОДАТКИ

					БРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		