

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Автоматична система вагового обліку
автотранспортування продукції»**

Виконав :

студент ІV курсу, групи ПМ-01

Сологуб Ілля Владиславович _____

Керівник:

Старший викладач

Зайцев Віктор Миколайович _____

Рецензент:

Головний конструктор АТЗТ «УКРВЕСКОМ»,

к.т.н., Кожарін Ігор Дмитрович _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2024 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	80	
3	A1	ДП ПМ0115. 01.000 СК	Тензорезисторний перетворювач. Складальний кресленник		
4	A2	ДП ПМ0115. 01.000 С1	Тензорезисторний перетворювач. Схема структурна	1	
5	A2	ДП ПМ0115. 01.000 Е4	Тензорезисторний перетворювач. Схема електрична	1	
6	A2	ДП ПМ0115. 01.001	Пружний елемент	1	
7	A2	ДП ПМ0115. 01.001	Тензорезистор	1	
8	A1	ДП ПМ0115. 00.001 ІМ	Автоматизована система вагового обліку. Ілюстративний кресленник	1	
9	A1	ДП ПМ0115. 00.002 ІМ	Автоматична система вагового обліку. Ілюстративний кресленник	1	

				ДП ПМ0115 00.000 ВДП		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Сологуб			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Зайцев				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-01	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматична система вагового обліку
автотранспортування продукції»**

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

« ___ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Сологубу Іллі Владиславовичу

1. Тема проєкту **«Автоматична система вагового обліку автотранспортування продукції»**,

керівник проєкту **Зайцев Віктор Миколайович**,

затверджені наказом по університету від **«28» травня 2024 р. № 2121-с**

2. Термін подання студентом проєкту **20 червня 2024 р.**

3. Вихідні дані до проєкту **3.1. Границі вимірювальних зусиль, m – НГВ-80,0; НмГВ -2,0; 3.2. Тип вимірювальної системи – електромеханічна на базі тензOMETричних перетворювачів; 3.3. Кількість датчиків вимірювального пристрою - 8; 3.4 Кількість повірочних поділок ваги=1000. 3.5. Границя відносних приведених похибок вагиперетворювача $\pm 0,03\%$; 3.6. Тип пружного елемента –зсувний або розтягу-стиску; 3.6. Робочий коефіцієнт перетворення 2,0 мВ/В. 3.7 Програмне забезпечення повинно реалізувати функції розпізнавання образів типу автомобіля, державного номера та наявності водія та пасажирів при зважуванні.**

4.Зміст пояснювальної записки 4.1. Обґрунтування необхідності розробки на основі критичного огляду аналогів. 4.2. Розробка принципів схем тензорезисторного ваговимірювального перетворювача; 4.3. Розробка програмного забезпечення функціонування автоматичної системи вагового обліку.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1 Лист складальних одиниць - Датчик ваговимірювальний – 1арк. ф А1; 5.2.Лист робочих креслеників деталей - 2 арк.ф А2; 5.3. Лист схем та графічних залежностей -2 арк. Ф А2; 5.4. Ілюстративні листи автоматичної та автоматизрованої систем 2 арк. Ф А1.

6. Дата видачі завдання 30 квітня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Одержати у керівника дипломного проекту (ДП) затвердженого завідувачем кафедри завдання на ДП	30 квітня 2024 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки ДП	05 червня 2024 р.	
3	Розробка програмного забезпечення автоматичної системи обліку продукції	05 червня 2024 р.	
4	Виконання графічних матеріалів ДП	05 червня 2024 р.	
5	Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгука на ДП	10 червня 2024 р.	
6	Одержання рецензії на ДП	12 червня 2024 р.	
7	Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	13 червня 2024 р.	
8	Подання ДП, відгука та рецензії в екзаменаційну комісію університету	14 червня 2024 р.	
9	Захист дипломного проекту в екзаменаційній комісії університету	18 червня 2024 р.	

Студент _____ Ілля СОЛОГУБ

Керівник _____ Віктор ЗАЙЦЕВ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ АНАЛОГІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ОБЛІКУ ПРОДУКЦІЇ, ЯКА ТРАНСПОРТУЄТЬСЯ АВТОМОБІЛЯМИ	10
2. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ПРОДУКЦІЇ (ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ).....	14
3. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ВАГОВИМІРЮВАЛЬ- НОГО ДАТЧИКА.....	15
3.1. Розробка принципової схеми тензорезисторного датчика.....	15
3.2. Розробка структурної схеми тензорезисторного датчика.....	16
3.3. Розрахунок основних геометричних параметрів пружного елементу.....	17
3.4. Розрахунок статичної характеристики ваговимірювального датчика	19
3.5. Розрахунок динамічних характеристик ваговимірювального датчика.	20
3.5.1. Диференціальні рівняння перетворення зусиль ваговимірювальними датчиками в динамічних режимах.....	21
3.5.2. Частотні характеристики перетворення зусиль ваговимірювальними датчиками в динамічних режимах.....	24
3.5.3. Перехідні характеристики ваговимірювальних датчиків.....	27
3.6 Вибір вимірювальної схеми тензорезисторного датчика.....	30
3.7 Аналіз метрологічних властивостей тензорезисторного перетворювача.....	33
4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ.....	34
4.1 Розробка програмного забезпечення підсистеми збору даних.....	36
4.2 Вибір та програмне забезпечення моделі згорткової нейронної мережі.....	41
4.3 Результати тренування моделі згорткової нейронної мережі.....	74
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ТР – тензорезистор;

НГЗ – найбільша границя зважування;

ПНФ – перетворювач нормуючий фольговий;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика;

ПЕ – пружний елемент;

ПЧЕ – пружний чутливий елемент;

ПКП – початковий коефіцієнт передачі;

РКП – робочий коефіцієнт передачі;

CNN (convolutional neural network) - згорткова нейронна мережа;

OCR (optical character recognition) - оптичне розпізнавання тексту;

RGB (червоний, зелений, синій) — адитивна колірна модель;

MNIST (Mixed National Institute of Standards and Technology) —

об'ємна база даних зразків рукописного написання цифр;

GPT (generative pre-training) породжувальне попереднє тренування.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РЕФЕРАТ

Дипломний проект бакалавра на тему «Автоматична система вагового обліку автотранспортування продукції» складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Пояснювальна записка проекту виконана на 80 сторінках і має 32 рисунків, таблиці та 15 найменувань за переліком використаних джерел.

Мета дипломного проектування – розробка автоматичної системи вагового обліку продукції, яка транспортується автомобільним транспортом.

В першому розділі для реалізації поставленої задачі був проведений критичний аналіз існуючих автоматизованих систем зважування продукції та обґрунтований перелік питань, які потребують розв’язку для побудови автоматичної системи.

В другому розділі розроблені основні технічні вимоги до автоматичної системи обліку, автомобільних ваг та тензорезисторних ваговимірювальних датчиків.

Третій розділ присвячений розробці ваговимірювального перетворювача тензорезисторного типу.

В четвертому розділі проведена розробка програмного забезпечення автоматичної системи на основі нейронних мережевих технологій та тренування її моделі, які дозволять модернізувати існуючі автоматизовані системи вагового обліку до рівня автоматичних.

Графічна частина проекту складається з креслеників та ілюстративних листів загальною кількістю 5 аркушів ф А1.

Ключові слова: автоматизація вагового обліку, ваговимірювальний перетворювач, тензодатчик, розпізнавання образів, нейронні мережі.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Засоби та системи вимірювання маси застосовуються в усіх галузях промисловості, сільського господарства, в наукових дослідженнях, у повсякденному житті людей.

Основне призначення засобів ваговимірювальної техніки – побудова ефективного обліку матеріальних ресурсів або створення на їх основі систем керування технологічними процесами.

Автоматизація процесів керування і систем обліку суттєво підвищує продуктивність, точність та надійність отриманих результатів. Автоматизація обліку продукції, яка перевозиться автомобільним транспортом - запорука організації ефективного аналізу більшості логістичних процесів на основі збору даних по масу сировини, товарів і продукції та автоматичного їх аналізу.

Сучасний етап розвитку автоматизації облікових процесів це перехід від автоматизованих до автоматичних систем, які дозволять зменшити суб'єктивні впливи на результати обліку, збільшити швидкість облікових процесів та документацію їх результатів.

Перехід від автоматизованих систем до автоматичних вимагає вирішення цілої групи задач, розв'язок яких став можливим тільки на данному етапі розвитку технологій. Застосування хмарних та мережевих технологій з використанням елементів штучного інтелекту відкривають шляхи до створення підсистем розпізнавання образів, без яких побудова повністю автономних (без участі людини) систем неможлива.

Спеціальною частиною даного дипломного проекту є розробка програмного забезпечення підсистеми розпізнавання образів типу автомобілів, державних номерів та наявності водіїв або пасажирів при зважуванні.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

	цією в базах даних зважувань, що запобігає наступним порушенням: 4.1. підміна при зважуванні завантажених і порожніх автомобілей; 4.2. наявність в автомобілі при зважуванні додаткових вантажів та водіїв/пасажирів,; 4.3. зважування автомобілів в складі автопоїздів; 4.4. контроль розташування автомобіля на платформі
5.	Можливість використання RFID карток для зменшення часу зважування
6.	Використання світлофорів та автоматичних шлагбаумів для логістики зважування
7.	При використанні хмарних технологій санкціонований доступ до бази зважування он-лайн з стаціонарних та мобільних пристроїв – мобільних телефонів, планшетів, комп'ютерів



Рисунок 1.1 - Структура автоматизованої системи зважування
ТОВ “ТЕХНОВАГИ” (м. Львів)

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ					

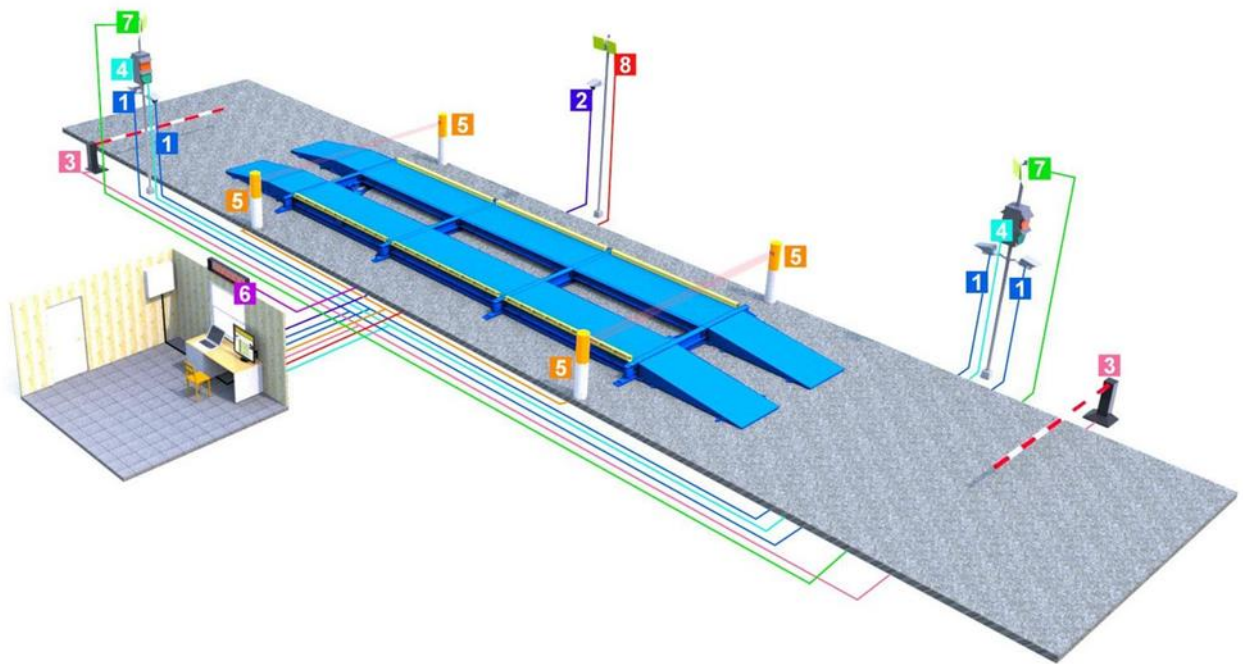


Рисунок 1.2 - Структура автоматизованої системи зважування
“KELI SENSING” (КНР)

Мета дипломного проектування – розробка автоматичної системи вагового обліку продукції, яка транспортується автомобільним транспортом.

Об’єктом розробки являється система вагового обліку продукції на базі автомобільної ваги

Предметом розробки являється програмне забезпечення, яке дозволить модернізувати автоматизовану систему вагового обліку до рівня автоматичної.

Проведений огляд аналогів по темі дипломного проектування показав необхідність застосування автоматичних та автоматизованих систем обліку продукції на логістичному інтервалі між виробництвом та складом продукції.

Це зумовлюється як суб’єктивними так і об’єктивними обставинами транспортування продукції. Наприклад, облік пшениці та інших зернових, яке зібране комбайнами безпосередньо на площі поля є найдостовірнішими показниками врожайності, ефективності застосування мінеральних добрив тощо. Значна кількість контрольних постів вагового контролю та їх вартість, в тому числі обслуговування, приводять до економічного протиріччя їх застосування.

Тому побудова пунктів вагового обліку повністю автоматичного рівня без присутності людини є актуальною задачею сьогодення.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ					

Подібні системи вагового обліку продукції актуальні для сільського господарства, металургійної та переробної промисловості, транспортної системи держави, де застосовується транспортування автомобільним транспортом .

Компонентний аналіз автоматичної системи показує, що допрацьбвання автоматизованої системи до автоматичної лежить через застосування безфундаментних автомобільних ваг, розбірних платформ колійного типу, які можна розібрати і зібрати за один робочий день. Але в цьому випадку необхідно

1. модернізувати тензорезисторні датчики ваги до висоти 105-107 мм при границі відносних приведених похибок до категорії точності С3- 0,03%.
2. розробити програмне забезпечення процедур розпізнавання образів, які реалізують функції п.4.1-4.4. таблиці 1 без участі людини.

За прототип розроблювальної системи виберемо систему представлену на рисунку 1.2.

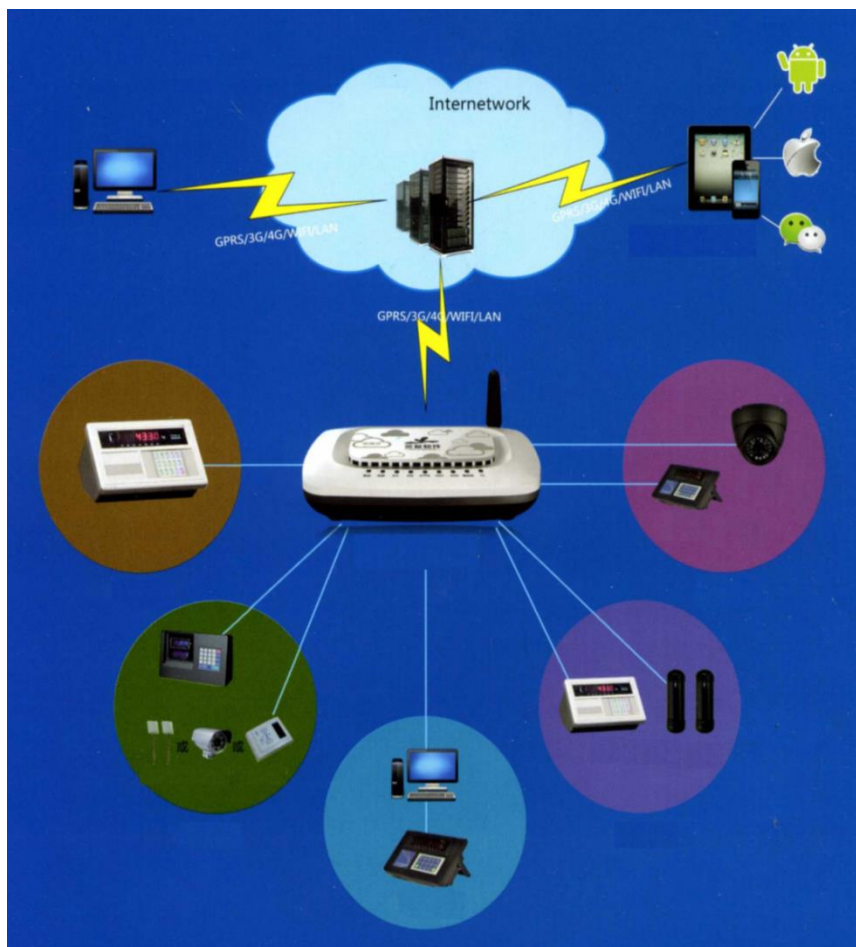


Рисунок 1.3 - Структура прототипу автоматичної системи зважування[13]

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

2. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ПРОДУКЦІЇ (ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ)

Основні функції автоматичної системи вагового обліку продукції , яка перевозиться автотранспортом

- Загальна логістика зважування автомобілів без участі людини;
- Дозвільні процедури для зважування
- Платформа автомобільної ваги колійного типу з 6 секцій по 3 м *1,5м , з можливістю швидкого демонтажу-монтажу;
- Комерційне статичне зважування автомобілів (границя допустимої похибки 0,03 % , $e=20$ кг, клас точності середній);
- Застосування хмарних технологій для зберігання результатів зважування;
 - Застосування мережевих нейронних технологій для ідентифікації державних номерів та типів автомобілів, наявності водіїв та пасажирів при зважуванні.

Таблиця 2 - Технічні вимоги до автомобільної ваги

Найбільша границя зважування (НГВ)	80 000 кг
Максимальне навантаження платформи	100 000 кг
Відносна похибка вимірювання маси автомобіля, категорія точності, кількість повірочних поділок	0,1%, середня, 3000
Кількість платформ	6 (кожна 3 м)
Тип ваги (за типом платформ)	колійного типу
Габарити кожної з 6 платформ	1500*6000 мм
Тип перетворювача	тензометричний

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3 - Технічні вимоги до ваговимірювального датчика

Тип чутливого елемента	Циліндричний, стискання
Найбільша границя зважування, НГЗ	20 т
Номінальна чутливість (при НГЗ)	2,0 мВ/В
Вхідний опір	400 Ом
Вихідний опір	380 Ом
Напруга живлення	6...12 В
Категорія точності датчика	С3 (0,03 %)
Робочий діапазон температур	-30...+40 ° С

3. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ВАГОВИМІРЮВАЛЬНОГО ДАТЧИКА

3.1. Розробка принципової схеми тензорезисторного датчика

Принцип дії тензорезисторних датчиків базується на використанні функціональної залежності зміни опорів тензорезистивних структур, які закріплені на пружних елементах, від змін розміру сили що діє на пружній елемент (ПЕ). Конструктивне об'єднання ПЕ та тензорезистора (ТР) створюють пружний чутливий елемент (ПЧЕ).

Для перетворювачів з найбільшою границею зважування (НГЗ) вантажів масою більше 5 тонн найбільш поширеними є циліндричні ПЕ, які працюють на розтяг-стиснення. Щоб забезпечити максимальну чутливість ПЕ до сили в датчиках використовують як тензорезистори що сприймають повздовжне стиснення, так і ТР , що працюють на поперечний розтяг. Схема розташування ТР на пружному чутливому елементі та схему з'єднання ТР в мостову схему представлено на рис. 1.1.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

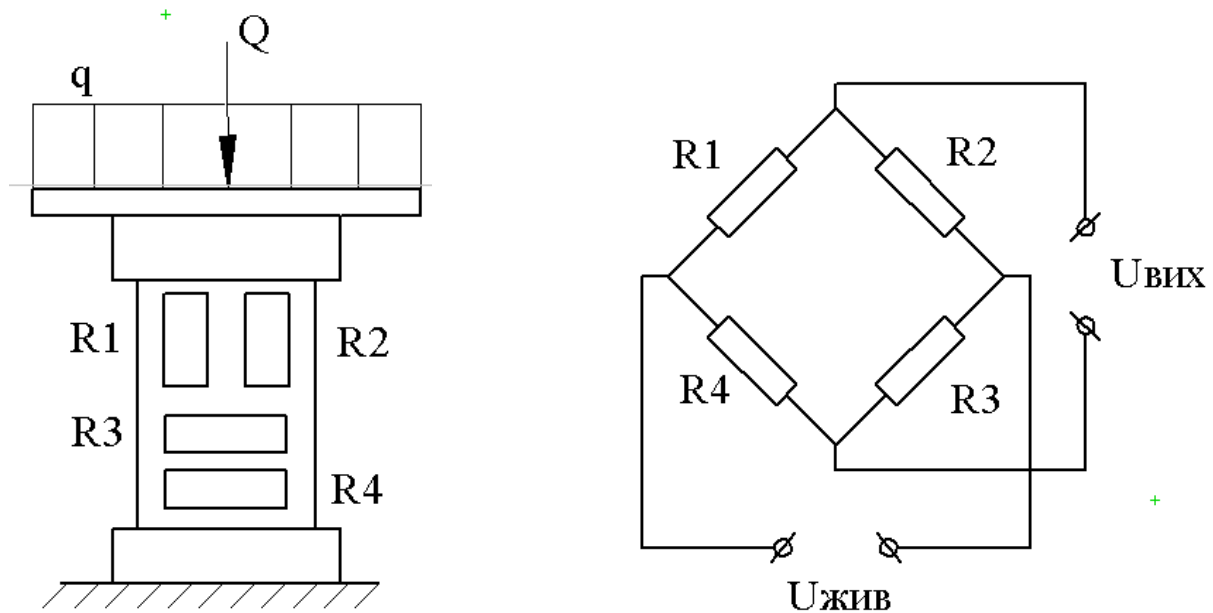


Рисунок 3.1 - Принципова схема з'єднання ТР з ПЕ розтягу-стиску

3.2. Розробка структурної схеми тензорезисторного датчика

Послідовне перетворення вимірюваної величини – сили-ваги F в тензорезисторному перетворювачі представлено на рис. 1.2. [3]

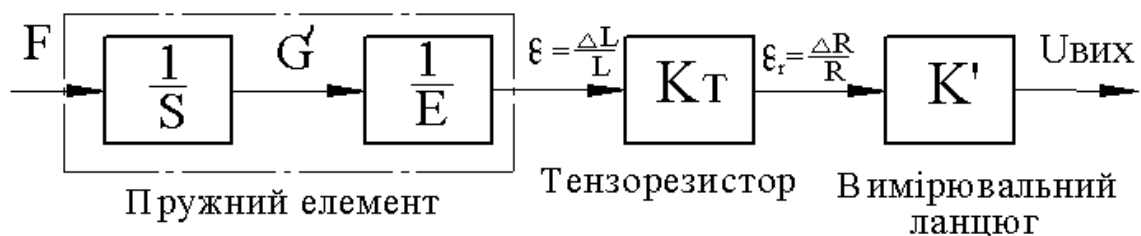


Рисунок 3.2 - Структурна схема тензорезисторного датчика

Перша ланка ланцюга перетворення – пружний елемент у вигляді циліндра, що сприймає стиснення від дії сили-ваги вимірюваної маси. В ПЕ умовно можна виділити два фактора в перетворенні: фактор конструкції (форма) ПЕ який визначає перетворення сили F в поле механічних напруг σ , та фактор матеріала з якого виготовлений ПЕ, який визначає перетворення поля напруг в поле деформацій ϵ_r в повздовжньому та поперечному напрямках зовнішньої поверхні ПЕ, на якій наклеєні ТР. Друга ланка перетворювача – тензорезистори (ТР), які

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

сприймають деформації поверхонь ПЕ на які вони безпосередньо прикріплені. Тензорезистори перетворюють відносні деформації ПЕ в відносні зміни опорів.

Третя ланка ланцюга перетворення – мостова схема. З'єднання ТР в мостову схему забезпечує перетворення відносних змін опорів ТР і нормуючих фольгових перетворювачів (ПНФ) в зміну робочого коефіцієнта перетворення (РКП) за напругою. РКП рівне відношенню зміни вихідної напруги $U_{вих}$ до напруги живлення $U_{жив}$.

$$РКП = \frac{U_{вих}}{U_{жив}}$$

3.3. Розрахунок основних геометричних параметрів пружного елемента

Розрахуємо площу поперечного перерізу пружного елемента за формулою:

$$S_{пер} = \frac{K}{(K+1)^2} \cdot K_T \cdot 2(1 + \mu) \cdot \frac{F}{РКП \cdot E}. \quad (1)$$

Матеріал пружного елемента – 44 НХТЮ або 35ХГСА, отже:

$\mu = 0.3$; $E = 210$ ГПа .

З технічного завдання відомо: $РКП = 2 \frac{мВ}{В}$; $НГЗ = 80m$.

Якщо найбільша границя зважування всієї ваги $НГЗ = 80 m$, то навантаження яке припадає на кожен з восьми датчиків з умови можливого дворазового перевантаження та розміщення автомобілів в двічі більш коротких за довжину платформи :

$$F = \frac{НГЗ}{4} = \frac{80m}{4} = 20 m = 2 \cdot 10^5 H.$$

Тоді площа поперечного перерізу пружного елемента буде:

$$S = \frac{1}{4} \cdot 2,1 \cdot 2,6 \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 10^{11}} = 6,5 \cdot 10^{-4} м^2 = 650 мм^2.$$

На зовнішній поверхні ПЕ необхідно передбачити плоскі поверхні, для наклеювання тензорезисторів. Для цього потрібно розрахувати ширину цих поверхонь. Якщо поперечний переріз ПЕ має такий вид, як показано на рис. 16.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(поверхні розташовані симетрично відносно осей перерізу), приймаємо $d = 25$ мм, а h - розмір, який необхідно визначити.

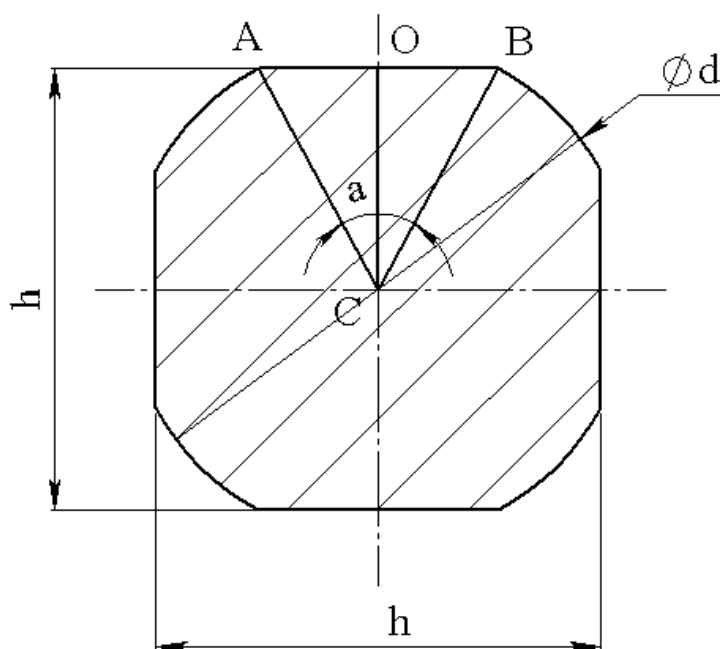


Рисунок 3.3 - Поперечний переріз ПЕ

Аналітичний вираз для визначення площі перерізу має вигляд:

$$S_{пер} = \frac{\pi \times d^2}{4} - 4 \times \left(\frac{\pi \times d^2}{4} \times \frac{2 \times \arccos \frac{h}{d}}{360} - \frac{h \times d}{4} \times \sqrt{1 - \frac{h^2}{d^2}} \right) \quad (2)$$

Якщо підставити в останній вираз числові значення отримаємо:

$$4,56 = 4,91 - 4 \times \left(4,91 \times \frac{2 \times \arccos \frac{h}{2,5}}{360} - \frac{h \times 2,5}{4} \times \sqrt{1 - \frac{h^2}{2,5^2}} \right), \text{ або}$$

$$0,027 \times \arccos \left(\frac{h}{2,5} \right) - 0,625 \times h \times \sqrt{1 - \frac{h^2}{6,25}} - 0,0875 = 0. \quad (3)$$

Одержане нелінійне тригонометричне рівняння (3) розв'яжемо за допомогою вбудованих підпрограм пакету MathCad. Результат розрахунку $h = 22,1$ мм.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

3.4. Розрахунок статичної характеристики ваговимірювального датчика

Залежність вихідного сигналу датчика $X_{вих}$ від вхідного сигналу $X_{вх}$, при умові, що вхідний сигнал залишається сталим $X_{вих} = f(X_{вх})$, визначає статичну характеристику датчика.

Для тензорезисторного ваговимірювального датчика вхідною величиною є вимірювальна сила F , яка характеризує вимірювальну величину «умовну гравітаційну масу m », а вихідною – напруга з вимірювальної діагоналі мостової схеми $U_{вих}$.

Статична характеристика тензорезисторного датчика має наступний вигляд:

$$U_{вих} = U_{жив} \cdot \frac{K}{(K+1)^2} \cdot K_T \cdot 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2),$$

або через РКП

$$РКП = \frac{U_{вих}}{U_{жив}} = \frac{K}{(K+1)^2} \cdot K_T \cdot 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (4)$$

де K -коефіцієнт симетрії моста, дорівнює 1;

K_T - коефіцієнт тензочутливості, для константанової фольги 2,1.

ε_1 та ε_2 – відповідно повздовжня та поперечна деформації ПЕ,

які згідно закону Гука лінійно залежать від діючої ваги.

Статична характеристика ваговимірювального датчика має лінійний вигляд і її можна представити наступним виразом:

$$U_{вих} = f(F) = S \cdot F, \quad (5)$$

де, $S = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta F} = \frac{U_{вих_max}}{F_{max}}$ називається чутливістю датчика, та нормується в

технічному завданні на проектування через РКП при НГЗ ваговимірювального датчика. Визначимо вихідний сигнал в мВ при нарузі живлення мостових схем датчиків $U_{жив} = 6$ В

$$U_{вих_max} = U_{жив} \cdot РКП = 6 \text{ В} \cdot 2,0 \frac{\text{мВ}}{\text{В}} = 12,0 \text{ мВ.}$$

$$F = \frac{НГЗ}{4} = \frac{80m}{4} = 20 \text{ м} = 2 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

$$\text{От же, } S = \frac{U_{вих_max}}{F_{max}} = \frac{12,0 \text{ мВ}}{2 \cdot 10^5 \text{ Н}} = 6 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{мВ}}{\text{Н}} \right).$$

Таким чином статична характеристика перетворювача буде мати вигляд:

$$U_{вих}(\text{мВ}) = 6 \cdot 10^{-5} \times F$$

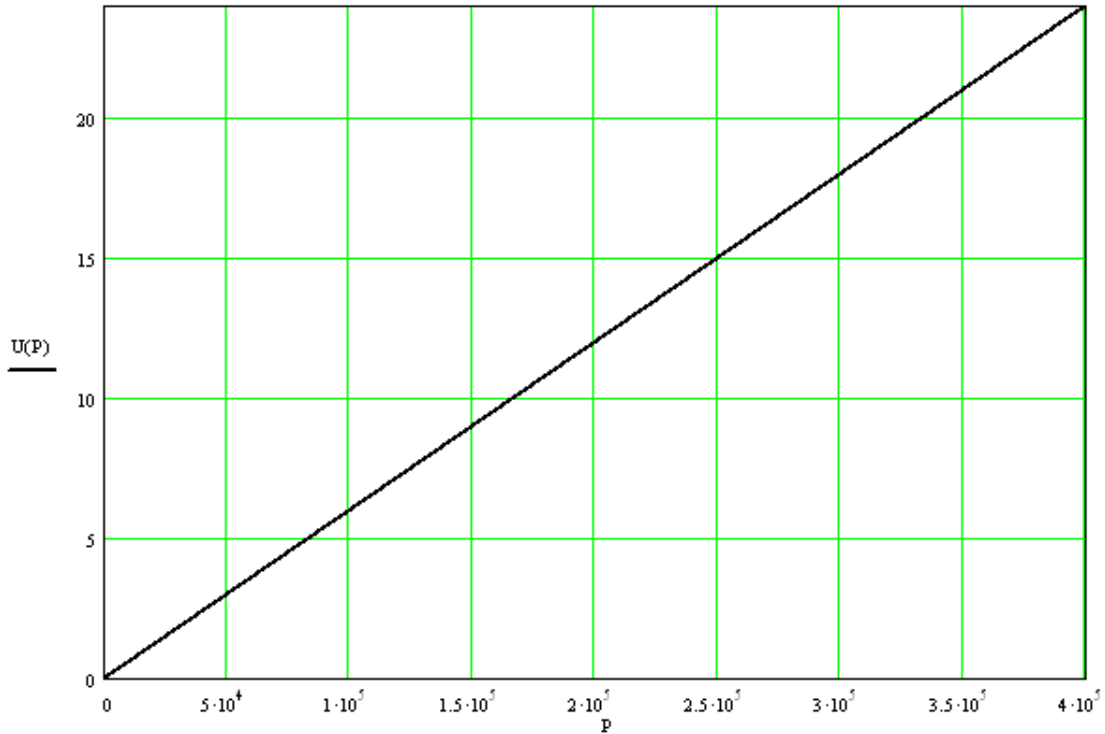


Рисунок 3.4 - Статична характеристика ваговимірювального датчика

3.5. Розрахунок динамічних характеристик ваговимірювального датчика

Для аналізу реакції ваговимірювальних датчиків на змінні вхідні зусилля визначимо наступні повні динамічні характеристики :

1. Диференціальні рівняння – оператори які характеризують перетворення вхідних функцій $F(t)$ в вихідні функції $U(t)$;
2. Амплітудно - та фазочастотні характеристики;
3. Перехідний процес - реакцію ПЕ на скачкоподібний вхідний сигнал.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

3.5.1. Диференціальні рівняння перетворення зусиль ваговимірювальними датчиками в динамічних режимах

Розрахункова та конструктивна схеми тензорезисторного датчика представлені на рис. 3.5.[2]

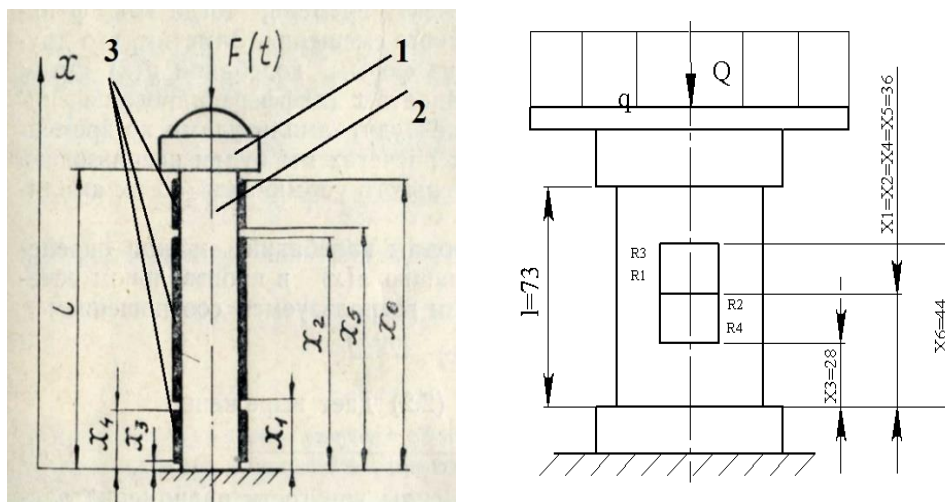


Рисунок 3.5 - Розрахункова та конструктивна схеми ваговимірювального датчика

Зусилля $F(t)$ в напрямку осі Ox через інерційну перехідну деталь 1, яка має масу $M=0,25$ кг діє на пружний елемент 2 та викликає його подовжні та поперечні деформації. Пружний елемент уявляє прямий циліндричний стрижень. Стрижень має довжину $L=80$ мм, площа перерізу $S=650$ мм², густина матеріалу $\rho=7,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, модулі пружності $E=2,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, та $\mu=0,3$.

Дія стискаючого ПЕ зусилля приводить до зменшення поздовжніх розмірів стрижня, а поперечних — до збільшення. Припустимо що перед навантаженням датчика довільний переріз ПЕ мав координату x_n . Під навантаженням він змістився і зайняв положення x . Зміна координат становить

$$y(x) = x - x_n$$

вона називається зміщенням перерізу з координатою x_n . Похідна

$$\varepsilon(x) = \frac{dy}{dx}$$

визначить відносну деформацію ПЕ в точці x_n .

Розмір відносної деформації – це інформативний параметр про розмір

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

прикладеного навантаження. Для його вимірювання на стрижні закріплюють тензорезистори, зміна опору яких пропорційна його відносній деформації. Статична характеристика ТР – залежність відносної зміни опору $\Delta R/R$ від відносної деформації ПЧЕ,

$$\Delta R / R = k_T \varepsilon_{cp}$$

де ε_{cp} — усереднений розмір відносної деформації ПЕ на ділянці розташування ТР; k_T — коефіцієнт тензочутливості.

Для збільшення чутливості датчика і компенсації температурних похибок на ПЕ розміщують 4 або 8 ТР, що з'єднуються в одну мостову схему. Поздовжні ТР (координати початку x_1 , кінця x_2) сприймають деформацію стиску ПЕ, а поперечні (координати початків x_3 і x_5 , кінців x_4 і x_6) — сприймають деформацію розтягу ПЕ. Залежність між подовжньою ε_{noz} і поперечною ε_{non} деформаціями для ізотропних матеріалів має вигляд

$$\varepsilon_{non} = -\mu \varepsilon_{noz} .$$

В зоні лінійних залежностей між механічними напругами і деформаціями поздовжні переміщення $y(x)$ перерізів ПЕ описуються диференціальним рівнянням в часткових похідних [1]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2\delta \frac{\partial y}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} , \quad (6)$$

де $c = \sqrt{E/\rho}$ — швидкість поширення зміщень $y(x,t)$ уздовж ПЕ;

δ - відносна ступінь демпфування.

Знайдемо розв'язок рівняння при початкових умовах $y=0, \partial y/\partial t = 0; 0 \leq x \leq l$. Для розв'язку цієї крайової задачі потрібно сформулювати граничні умови.

1. гранична умова. Нижній кінець ПЕ жорстко зв'язаний з опорою, тому $y = 0$ при $x = 0, t > 0$.

2. гранична умова. Рівняння руху маси M [2]:

$$M \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + ES \frac{\partial y}{\partial t} = F(t) \text{ при } x=l, t>0. \quad (7)$$

Розв'язок задачі виконаємо в комплексній площині. Знайдемо зображення за Лапласом функції $y(x, t)$ та її похідних при нульових початкових умовах:

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

$$y(x, t) \doteq \bar{y}(x, p);$$

$$\frac{\partial^n y(x, t)}{\partial t^n} \doteq \frac{d^n \bar{y}(x, p)}{dx^n};$$

$$\frac{\partial^n y(x, t)}{\partial t^n} \doteq p^n \bar{y}(x, p), n=1, 2, \dots$$

Тоді характеристичне рівняння має вигляд

$$c^2 \frac{d^2 \bar{y}}{dx^2} - (p^2 + 2\delta p) \bar{y} = 0. \quad (8)$$

При вводі в розгляд параметра q

$$\frac{d^2 \bar{y}}{dx^2} - q^2 \bar{y} = 0$$

де $q = \sqrt{p^2 + 2\delta p / c}$. Розв'язок представляє суму гіперболічних функцій

$$\bar{y} = Ach(qx) + Bsh(qx).$$

Постійні A та B можна визначити з початкових умов, якщо їх сформулювати в операторній формі:

$$\bar{y} = 0 \text{ при } x = 0;$$

$$Mp^2 \bar{y} + ES \frac{d\bar{y}}{dx} = F(p) \text{ при } x=l,$$

де $F(p)$ — зображення за Лапласом $F(t)$.

Розв'язок рівняння – зміщення в довільному перетині ПЕ [2]

$$\bar{y}(x, p) = \frac{F(p)sh(qx)}{Mp^2 sh(ql) + qESch(ql)}. \quad (9)$$

Вираз для розрахунку відносної деформації ПЕ отримаємо продиференціювавши останнє рівняння:

$$\bar{\varepsilon}(x, p) = \frac{F(p)qch(qx)}{Mp^2 sh(ql) + qESch(ql)}. \quad (10)$$

Представимо диференціальне рівняння перетворення сили в відносну деформацію ПЕ в комплексній площині його передатною функцією [1]:

$$W(p) = \frac{\bar{\varepsilon}(x, p)}{F(p)} = \frac{qch(qx)}{Mp^2 sh(ql) + qESch(ql)}. \quad (11)$$

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.5.2. Частотні характеристики перетворення зусиль ваговимірjuвальними датчиками в динамічних режимах

Використаємо передатну функцію для визначення амплітудно-частотних (АЧХ) та фазо-частотних (ФЧХ) характеристик за допомогою переходу з комплексної в частотну площину $p=j\omega$, де ω — кутова частота гармонійного вхідного сигналу.

$$q = \frac{1}{c} \sqrt{p^2 + 2\delta p} \rightarrow \frac{1}{c} \sqrt{-\omega^2 + 2j\delta\omega} = \frac{\omega}{c} (\alpha + j\beta);$$

$$\alpha = \left[0,5 \left(\sqrt{1 + 4\delta^2/\omega^2} - 1 \right) \right]^{1/2}; \quad \beta = \left[0,5 \left(\sqrt{1 + 4\delta^2/\omega^2} + 1 \right) \right]^{1/2};$$

$$qx = \omega\tau_x(\alpha + j\beta) = y_1 + jz_1; \quad \tau_x = x/c; \quad ql = \omega\tau(\alpha + j\beta) = y + jz; \quad \tau = l/c.$$

Підставим ці значення у формулу (11), знайдемо комплексний коефіцієнт перетворення [2]

$$W(j\omega) = \frac{1}{ES} \frac{U_1 + jV_1}{U_2 + jV_2}, \quad (12)$$

$$\text{де } U_1 = \alpha \operatorname{ch} y_1 \cos z_1 - \beta \operatorname{sh} y_1 \sin z_1;$$

$$V_1 = \alpha \operatorname{sh} y_1 \sin z_1 + \beta \operatorname{ch} y_1 \cos z_1;$$

$$U_2 = \alpha \operatorname{ch} y \cos z - \beta \operatorname{sh} y \sin z - m \omega \tau \operatorname{sh} y \cos z;$$

$$V_2 = \beta \operatorname{ch} y \cos z + \alpha \operatorname{sh} y \sin z - m \omega \tau \operatorname{ch} y \cos z;$$

$$m = M/M_c; \quad M_c = \rho Sl \text{— маса стрижня.}$$

З формули (12) слідує вирази для АЧХ і ФЧХ:

$$A(\omega) = \left[\frac{(U_1^2 + V_1^2)}{(U_2^2 + V_2^2)} \right]^{1/2} = \frac{\left[(\alpha^2 + \beta^2) (\operatorname{sh}^2 y_1 + \cos^2 z_1) \right]^{1/2} / ES}{\left[(\alpha^2 + \beta^2) (\operatorname{sh}^2 y + \cos^2 z) + (m\omega\tau)^2 (\operatorname{sh}^2 y + \sin^2 z) - m\omega\tau (\alpha \operatorname{sh} 2y + \beta \sin 2z) \right]^{1/2}}; \quad (13)$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

$$\theta(\omega) = \arctg(V_1 / U_1) - \arctg(V_2 / U_2) \quad (14)$$

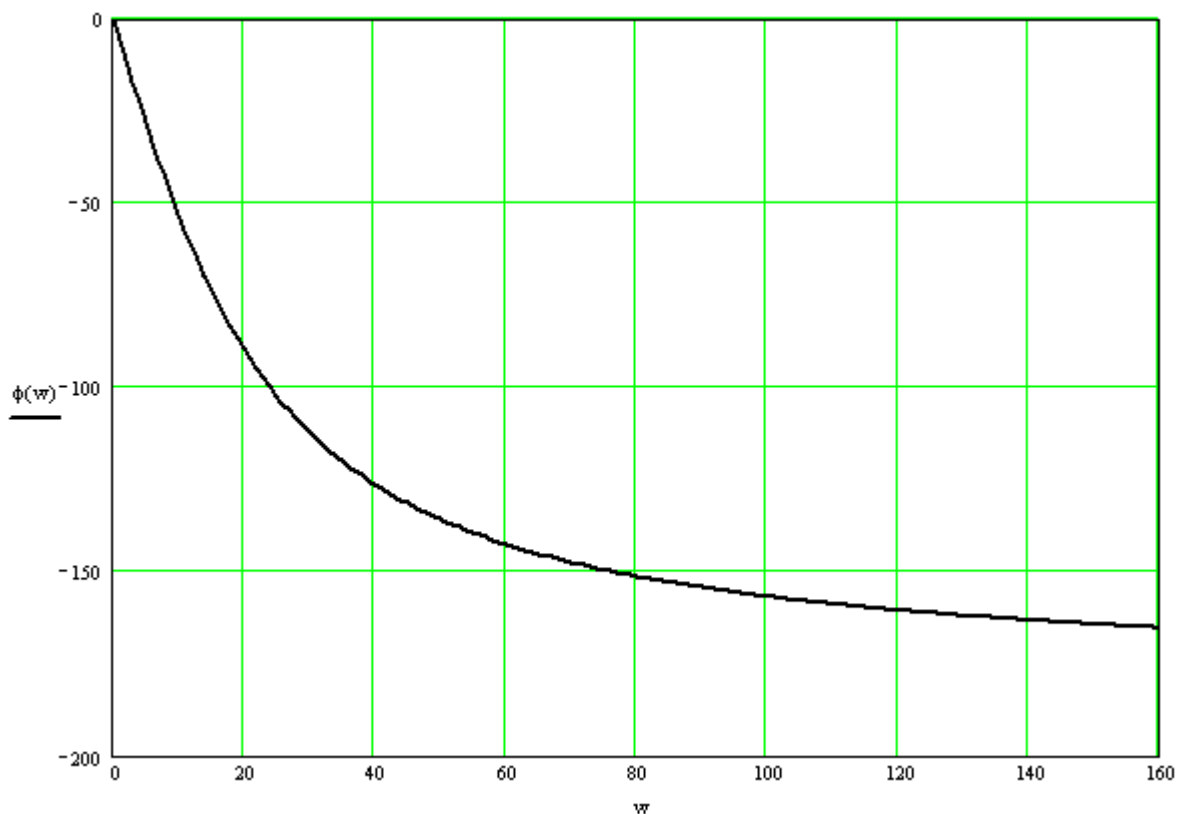


Рисунок 3.6 - Фазо-частотна характеристика перетворювача

Орієнтовні розрахунки одержують якщо не враховувати демпфування коливань. При цьому $\delta=0$, $\alpha=0$, $\beta=1$ і спрощені вирази для АЧХ та ФЧХ приймуть вигляд

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \left| \frac{\cos \omega \tau_x}{ES(\cos \omega \tau - m\omega \tau \sin \omega \tau)} \right|,$$

$$\theta(\omega) = 0.$$

При $\omega = 0$ можна одержати статичний коефіцієнт перетворення- чутливість ПЕ

$$A(0) = k_c = 1/ES.$$

Наближена оцінка динамічної похибки стрижневого ПЕ при гармонійному вхідному впливі

$$\gamma_D(\omega) = \frac{A(\omega) - k_c}{k_c} = \left| \frac{\cos \omega \tau_x}{\cos \omega \tau - m\omega \tau \sin \omega \tau} \right| - 1.$$

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

Для наближених розрахунків використовують АЧХ та ФЧХ ПЕ як систему другого порядку. Математично для такого переходу треба замінити тригонометричні функції першими членами розкладання їх в степеневі ряди

$$\sin \omega \tau \approx \omega \tau, \quad \cos \omega \tau \approx 1 - \omega^2 \tau^2 / 2,$$

і тоді для поздовжніх та поперечних деформацій отримаємо вирази [2]

$$A_{1,2}(\omega) = \left| \frac{1}{ES - \omega^2 l(M + 0,5M_c)} \right|;$$

$$A_{3,4}(\omega) = \left| \frac{\mu}{ES - \omega^2 l(M + 0,5M_c)} \right|.$$

Недоліком наведених формул є те, що вони не враховують демпфування. При відомій степені відносного демпфування ξ , останні формули приймають вигляд:

$$A_{1,2}(\omega) = \frac{1/ES}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\xi\omega T)^2}}; \quad (15)$$

$$A_{3,4}(\omega) = \frac{\mu/ES}{\sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\xi\omega T)^2}}, \quad (16)$$

де $T^2 = l(M + 0,5M_c)/ES = 0.073 \cdot (4 \cdot 10^5) / 2.1 \cdot 10^7 \cdot 6 = 2.3 \cdot 10^{-4}$.

Тоді формула амплітудно-частотної характеристики буде:

$$A_{1,2}(\omega) = \frac{1/1.26 \cdot 10^8}{\sqrt{(1 - \omega^2 (2.3 \cdot 10^{-4})^2)^2 + (2 \cdot 0.2 \omega \cdot 2.3 \cdot 10^{-4})^2}},$$

$$A_{3,4}(\omega) = \frac{0.3/1.26 \cdot 10^8}{\sqrt{(1 - \omega^2 (2.3 \cdot 10^{-4})^2)^2 + (2 \cdot 0.2 \omega \cdot 2.3 \cdot 10^{-4})^2}}.$$

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

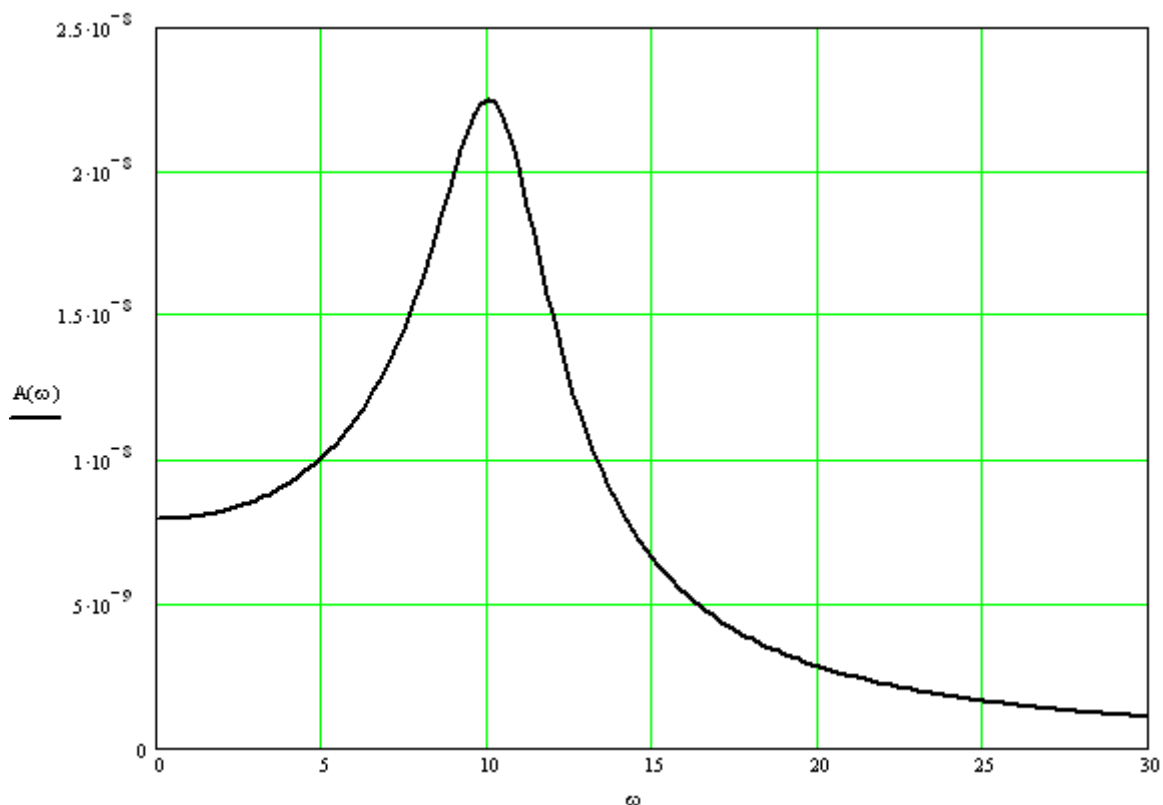


Рисунок 3.7 - Амплітудно-частотна характеристика датчика

3.5.3. Перехідні характеристики ваговимірювальних датчиків

Реакція ваговимірювального датчика на ступінчатий вхідний сигнал - перехідна характеристика - дозволяє проаналізувати такі показники динамічного режиму як швидкодію, тривалість перехідного процесу, перерегулювання, коливальність.

Для визначення функції зміни відносної деформації $\varepsilon(x, t)$ як реакцію на скачок зусилля $F = const$ використовуємо формулу зворотнього перетворення Лапласа [1]

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \frac{\bar{\varepsilon}(x, p) e^{pt} dp}{p},$$

Підставимо у формулу зображення та отримуємо

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} \frac{Fqchqxe^{pt} dp}{p [Mp^2 shql + qESchql]}. \quad (17)$$

Так як всі корені рівняння $F_2(p) = 0$ прості (не кратні), то, як показано в [1], оригінал $\varepsilon(x, t)$ може бути знайдений за формулою

$$\varepsilon(x, t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_1(p_n)e^{p_n t}}{p_n F_2'(p_n)},$$

де p_n — корені рівняння $F_2(p) = 0$.

Перший доданок у формулі (2.9.22.) є стале значення деформації

$$\varepsilon_y(x) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} = \frac{F}{ES},$$

другий доданок — перехідна складова $\varepsilon_n(x, t)$.

При підстановці значень параметрів ПЕ в рівняння $F_2(p)=0$, одержимо рівняння $M(\Omega_n^2 - \delta^2)\sin \alpha_n - (ES/l)\alpha_n \cos \alpha_n = 2j\delta M\Omega_n \sin \alpha_n = 0$, що розпадається на два:

$$M(\Omega_n^2 - \delta^2)\sin \alpha_n - (ES/l)\alpha_n \cos \alpha_n = 0; \quad (18)$$

$$2j\delta M\Omega_n \sin \alpha_n = 0. \quad (20)$$

З урахуванням слабого демпфування коливань ПЕ в першому рівнянні системи (31) варто покласти $\Omega_n \approx \alpha_n c/l$, і тоді

$$Mc^2 \alpha_n \sin \alpha_n - ES l \cos \alpha_n = 0$$

або

$$\alpha_n \operatorname{tg} \alpha_n = 1/m.$$

Загальний вираз для перехідного процесу має вигляд [1]

$$\varepsilon(x, t) = -\frac{F}{ES} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha_n \cos\left(\alpha_n \frac{x}{e}\right) e^{-\delta t} \cos(\Omega_n t - \varphi - \phi)}{\Omega_n \tau \left[1 + 1/m + m\alpha_n^2(1 - \xi^2)^2\right] \sqrt{1 + \beta^2} \cos \alpha_n} \right\}. \quad (21)$$

Знак мінус перед F береться в тому випадку, коли сила спрямована протилежно осі x .

З розгляду формули випливає:

1. Перший член формули описує сталий режим, що настає після закінчення перехідного процесу, тобто при $t \rightarrow \infty$.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

2. Інтенсивність загасання перехідного процесу характеризується множителем $e^{-\delta t}$. Цей множник не залежить від номера гармоніки, i , отже, загасання буде однаковим на всіх частотах власних коливань стрижня.

3. Через те, що члени під знаком суми спадають з ростом α_n , на практиці для опису перехідного процесу досить 5—6 членів суми.

Знайдемо середню відносну деформацію подовжнього тензорезистора, розташованого між точками x_1 і x_2 : [2]

$$\varepsilon_{cp1,2} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon(x,t) dx = -\frac{F}{ES} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \left[\sin\left(\alpha_n \frac{x_2}{l}\right) - \sin\left(\alpha_n \frac{x_1}{l}\right) \right] e^{-\delta t} \cos(\Omega_n t - \varphi - \phi)}{\Omega_n (\tau_2 - \tau_1) \left[1 + 1/m + m\alpha_n^2 (1 - \xi^2)^2 \right] \sqrt{1 + \beta^2 \cos \alpha_n}} \right\}$$

Поперечні тензорезистори сприймають деформації розтягання, зв'язану з подовжньою деформацією співвідношенням

$$\varepsilon_{pop} = -\mu \varepsilon_{pod}$$

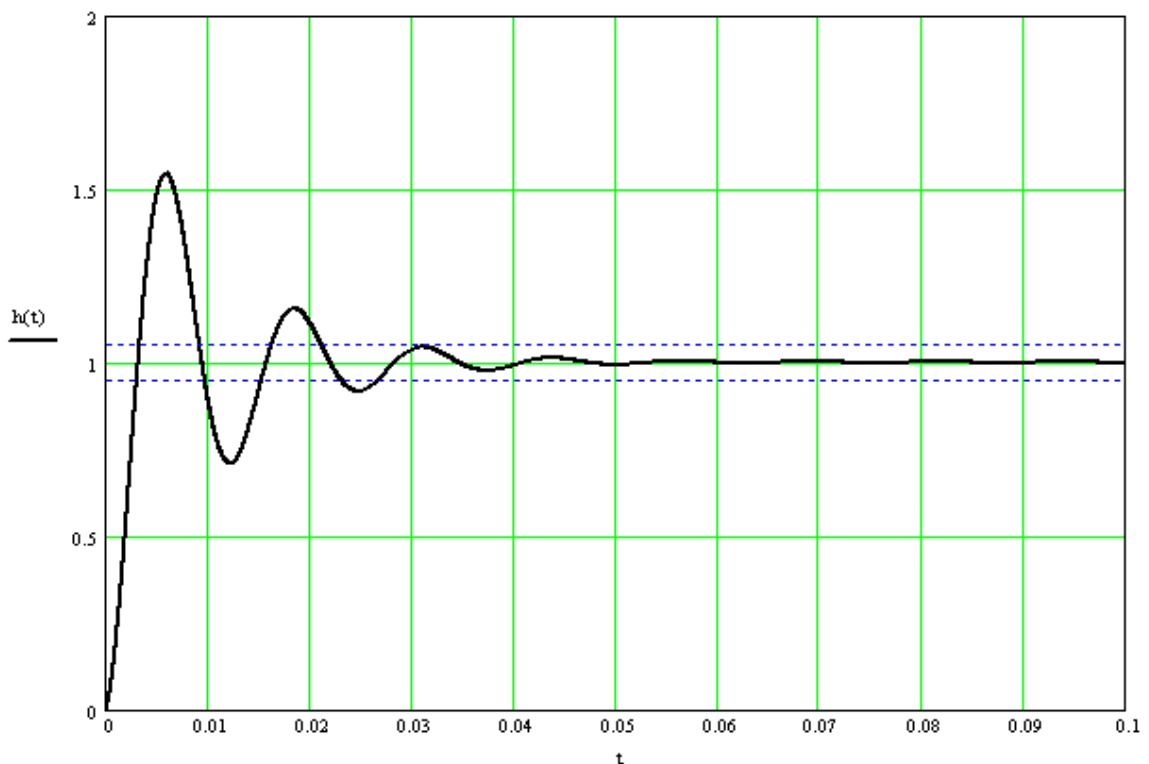


Рисунок 3.8 - Перехідна характеристика перетворювача

Аналогічно визначається середня відносна деформація поперечних тензорезисторів з координатами x_5 , x_6 .

3.6 Вибір вимірювальної схеми тензорезисторного датчика

Застосування мостових схем з чотирма робочими плечами, опір в суміжних плечах яких отримує приріст різних знаків, мають суттєві переваги в метрологічних та експлуатаційних характеристиках при проектуванні тензорезисторних датчиків. Це відноситься до таких параметрів як нелінійність статичної характеристики, температурна стабільність показів та чутливість. Електрична схема такої мостової структури, яка вибрана нами для розроблюваного датчика, зображена на рис.2.13а. Вона уявляє собою тензометричний міст з чотирма робочими плечами в яких знаходяться 12 робочих тензорезисторів, які об'єднані на 4 підложках. Також схема має компенсаційні та балансувальні резистори. Призначення резисторів приведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.

Позначення резисторів уніфікованого ряду ваговимірювальних датчиків

Позначення	Найменування	Кіл	Примітка
<i>R1-R6, R1'-R6'</i>	<i>Тензорезистор АЖВ2.782.040</i>	4	
<i>R7*</i>	<i>Резистор АЖВ5.634.006-01</i>	1	<i>(0...20)Ом</i>
<i>R8*, R8**</i>	<i>Резистори АЖВ5.634.007</i>	2	<i>(13...19)Ом</i>
<i>R9*</i>	<i>Резистор АЖВ5.634.007-02</i>	1	<i>(0...40)Ом</i>
<i>R11*</i>	<i>Резистор С2-33-0.52.2</i>	1	<i>(0...10)Ом</i>
<i>R12*</i>	<i>Резистор АЖВ5.634.006-02</i>	1	<i>(0...10)Ом</i>
<i>R10*</i>	<i>Резистор АЖВ5.634.006</i>	1	<i>(0...4)Ом</i>
<i>x</i>	<i>Вилка 2РМГ 18Б7Ш1Е2</i>		
	<i>Кабель АЖВ6.644.068</i>	1	

*R7**–Резистор компенсації температурного змінення ПКП

*R8**–резистор компенсації температурного змінення РКП

*R9**–Резистор підгонки РКП

*R10**–резистор підгонки ПКП

*R11**–Резистор підгонки Вхідного електричного опору*

*R12**–Резистор підгонки Вихідного електричного опору

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ					

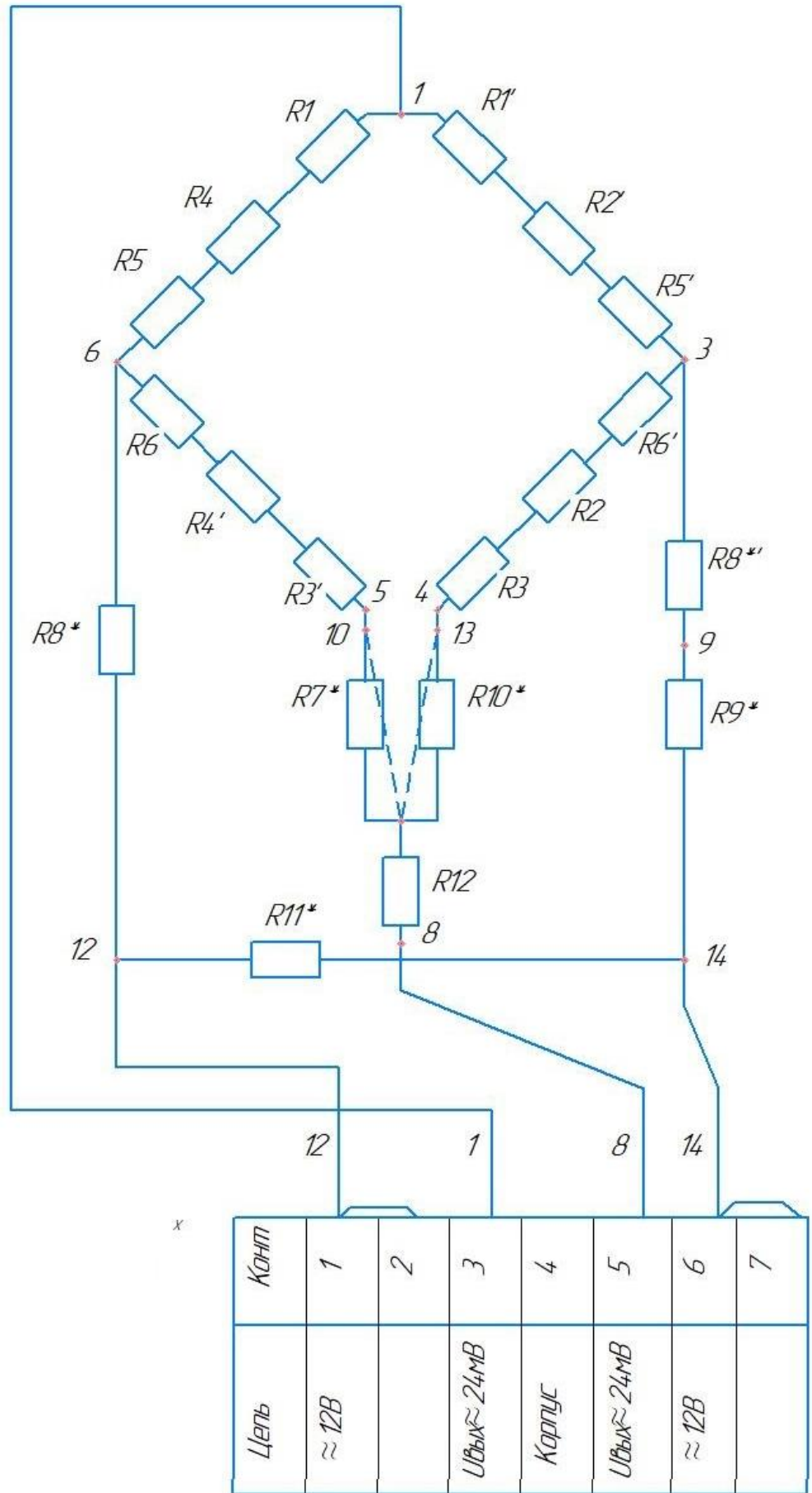


Рисунок 3.9 - Електрична схема тензометричного датчика

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ

Арк.

З метою виконання технічного завдання на дипломне проектування – створення низькопрофільного ваговимірювального датчиках НГЗ 20 т категорії точності С3 (границя допустимої відносної похибки 0,03%) був розроблений тензорезистор ДП 0115.01.002. Основна мета застосування тензорезистора на заміну АЖВ2.782.040 виробництва корпорації «ВЕДА»- компенсація згинних складових загальної деформації. Згинні деформації ПЕ в 10-100 разів перевищують інформативні деформації розтягу-стиску, тому навіть незначні бокові силові впливи приводять до значних рівня 0,2 % похибок вимірювання ваги. Розбивання тензорезисторів які сприймають повздовжні деформації на дві частини та подальше включення їх в одне плече дозволить компенсувати вплив згинних деформацій на рівні електричних сигналів. Кресленик тензорезистора ДП 0115.01.002 наведений на рис. 3.10.

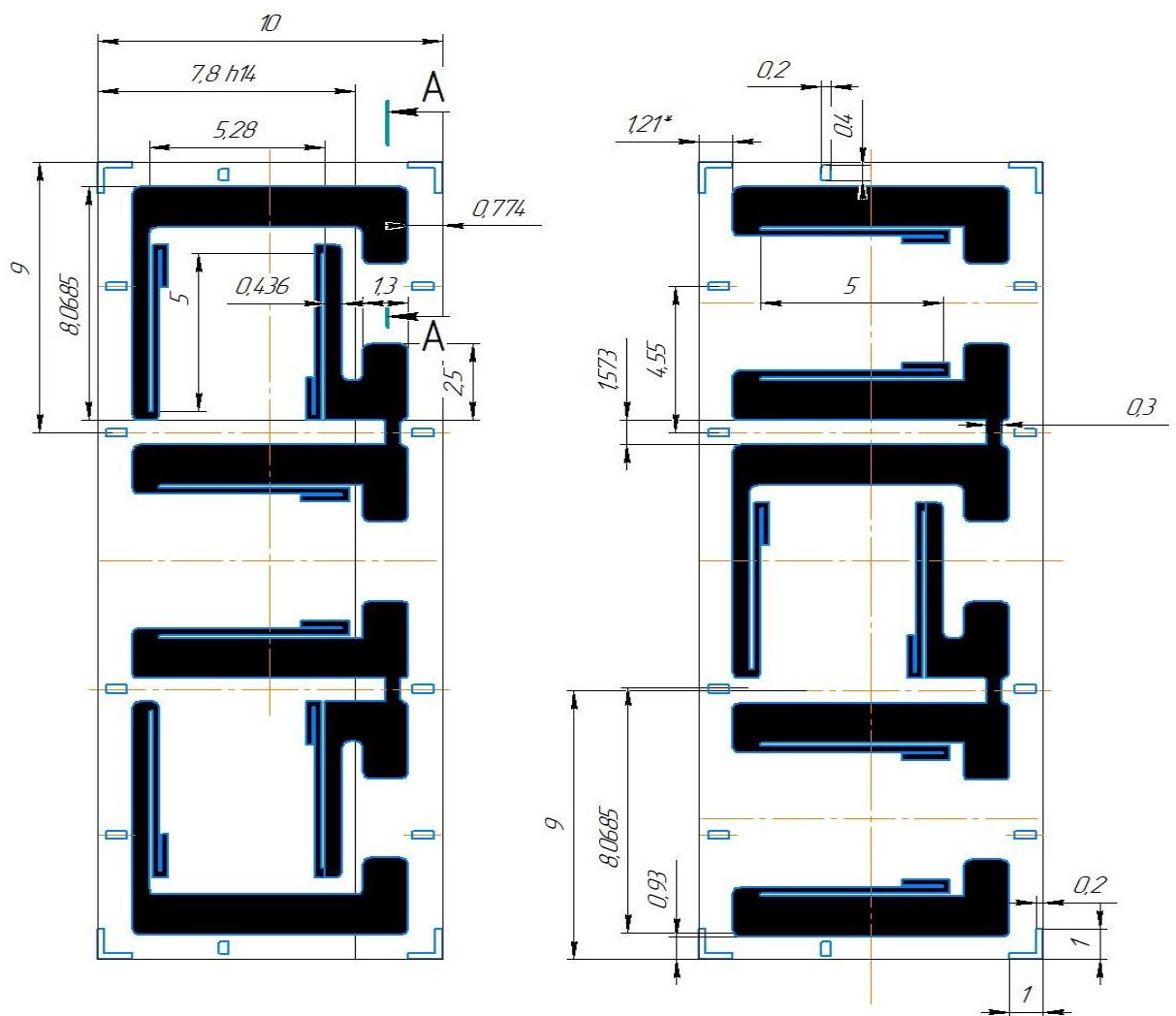


Рисунок 3.10 Тензорезистор ДП0115.01.002

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

3.7 Аналіз метрологічних властивостей тензорезисторного перетворювача

Основні метрологічні характеристики ваговимірювального датчика визначаються тензочутливістю, повним опором, повзучістю, механічним гістерезисом, температурними нестабільностями, динамічними похибками.

Чутливість датчика визначається в основному властивостями матеріалу тензорезистора, матеріалу пружного елемента та конструкцією пружного елемента.

Повзучість датчика визначає пружна недосконалість матеріалу ПЕ. У межах діапазону пружності повзучість тензорезисторних датчиків не перевищує 0,05-0,01% за першу годину після навантаження й, відповідно, 0,01-0,02% за 6 годин.

Механічний гістерезис, обумовлений пружною недосконалістю матеріалу ПЕ та клею, і визначається як приведена до входу датчика різниця значень вихідного сигналу для одного значення деформації, яка досягається при плавному її зростанні й плавному зменшенні. Механічний гістерезис більшості тензодатчиків знаходиться у межах 0,005-0,01%.

Температурна нестабільність тензорезисторних датчиків визначається температурним коефіцієнтом опору та появою додаткових механічних напруг у результаті нерівності температурних коефіцієнтів розширення матеріалу тензорезистора та ПЕ.

Проектні розрахунки похибок тензорезисторних датчиків можна виконати за наступними діапазонами значень їх складових [3]:

- повзучістю $\delta_{\text{п}} = 0,006 - 0,01 \%$;
- гістерезисом $\delta_{\text{г}} = 0,005 - 0,01 \%$;
- нелінійністю $\delta_{\text{н}} = 0,008 - 0,1 \%$;
- температурною похибкою нуля на 10 К $\alpha = 0,01 - 0,02 \%$;
- температурною похибкою чутливості на 10 К $\beta = 0,01 - 0,02 \%$;
- вплив бокових складових зусиль $\delta_{\text{ц}} = 0,01 - 0,2 \%$.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оцінемо границю основної відносної похибки тензорезисторного датчика $\delta_{\text{датчика}}$ за умови некорильованості її складових:

$$\delta_{\text{датчика}} = \sqrt{\delta_{\text{п}}^2 + \delta_{\text{г}}^2 + \delta_{\text{н}}^2 + \alpha^2 + \beta^2 + \delta_{\text{ц}}^2}$$

$$\delta_{\text{датчика}} = (0,018 - 0,22) \%$$

Таким чином, тільки при використанні тензорезистора з компенсацією згинних деформацій ДП 0115.01.002 технічне завдання на дипломне проектування в частині похибок (0,03%) буде виконане.

4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ

Мета створення системи розпізнавання об'єктів – розробка програмного забезпечення для переходу автоматизованої системи вагового обліку продукції, яка перевозиться автотранспортом, до повністю автоматичної.

Об'єктами ідентифікації являються державні номери автомобілів, розпізнавання типу автомобілів та наявність водія/пасажирів при зважуванні.

Система розпізнавання об'єктів, призначена для ідентифікації та класифікації різних об'єктів на зображеннях з використанням сучасних технологій машинного навчання та глибокого навчання.

Основні можливості:

А. Розпізнавання об'єктів: Система здатна визначати та класифікувати різні об'єкти на зображеннях з високою точністю.

Б. Інтеграція OCR: Система може розпізнавати текст на зображеннях.

Технології та інструменти:

- **Моделі розпізнавання об'єктів:** Використання попередньо навченої моделі для швидкого та точного розпізнавання об'єктів.
- **OCR:** Інтеграція Tesseract для розпізнавання тексту на зображеннях.

Процес розробки:

1. **Збір даних:** Збір та анотація великої кількості зображень з різними об'єктами.

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

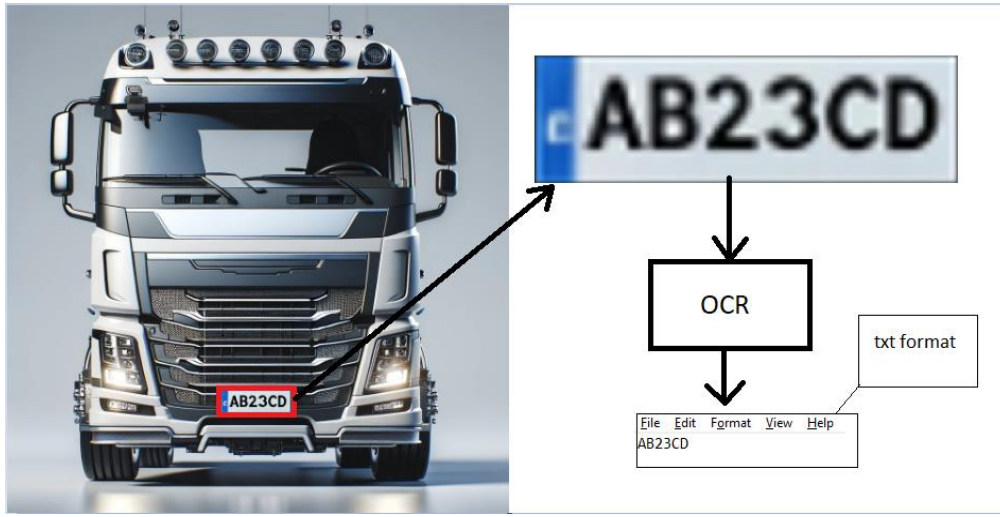


Рисунок 4.2 - Схема послідовності обробки текстової інформації [14]

Зрозуміло, що прямокутник намальований лише у цілях тестування (наприклад, одразу після тренування, щоб побачити, наскільки прогноз нашої моделі є коректним). У реальності наша модель спрогнозує лише координати, де вона думає знаходиться об'єкт (номерний знак) на зображенні, чого нам буде достатньо для вирізання підзображення. Це був короткий та поверхневий опис, як розпізнавання працює у нашому випадку. Тепер я пропоную перейти до кроків створення системи.

4.1 Розробка програмного забезпечення підсистеми збору даних

У моєму випадку саме збір даних був би трохи часозатратним, тому що мені потрібно було б зібрати щось біля 10000 зображень автомобілів у фронтальному виді, і потім для кожного з них зробити txt анотацію де були б збережені координати кожного bounding box (обмежувальної рамки), які охоплюють номерний знак. Фізично це можливо, але доцільніше використати ChatGPT 4o, у якому є влаштована Stable diffusion модель для генерування зображень.

Тому для тренування моєї мережі я вирішив використати штучно згенерований сет зображень, і створити анотацію для них використовуючи вже готову модель YOLO(you only look once).

Для генерування сету мені довелося використати python і декілька додаткових бібліотек, код наведений нижче:

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Main content area of the document, currently blank.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

generate_image: надсилає запит до OpenAI API, яке за допомогою DALL-E згенерує зображення відповідно до текстового опису, що є вхідним параметром функції, збереже його і поверне нам шлях (path) до збереженого файлу.

load_yolo: завантажить всі налаштування для YOLO (weights and biases, kernels тощо).

detect_objects: використає YOLO на щойно згенерованому зображенні і поверне всі bounding boxes (обмежувальні рамки), знайдені на зображенні.

generate_random_bounding_boxes: генерує рамку у випадковому місці на зображенні, для випадку, коли ми згенерували зображення без номерного знаку.

Потім ми у циклі ітеруємо 10000 разів, випадково створюючи зображення з номерним знаком і без. Якщо зображення містить номерний знак, ми пропускаємо його через YOLO, щоб знайти bounding boxes (обмежувальні рамки), і зберігаємо зображення та координати з confidence фактором (я потім поясню, навіщо він потрібен), у дві різні директорії. У випадку, якщо зображення згенеровано без номерного знаку, ми робимо те ж саме, але координати рамок генеруються випадковим чином.

Приклад :

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



120 220 180 90 0.95

Рисунок 4.3 – Результат обробки інформації в YOLO [14]

Анотація: Файл з координатами обмежувального прямокутника для виявленого номерного знака (x, y, ширина, висота, об'єктність).

Після 5 годин генерації мій сет був готовий (5 годин тому що існував ліміт на кількість запитів до ChatGPT, і доводилося чекати додаткові 30 хв щоб продовжити генерацію після кожного перевищення ліміту).

Тепер прийшов час для розробки моделі.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Вибір та розробка програмного забезпечення моделі згорткової нейронної мережі

Для роботи з зображеннями мій вибір архітектури і типу моделі був однозначним, це мала бути CNN.

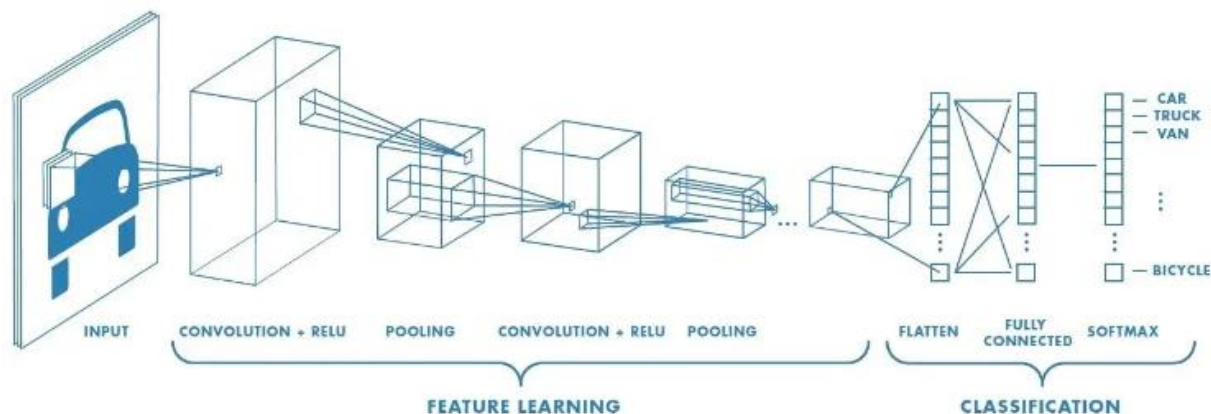


Рисунок 4.4 – Схема послідовності процесів навчання та класифікації CNN[15]

Зазвичай така система складається з 2 частин Fully connected layer (Повністю підключений шар) і Convolutional Layer (Згортковий шар). Ці компоненти працюють разом для ефективного виділення ознак та прийняття рішень на їх основі. Я імплементував невелику демо CNN, яка тренується на MNIST dataset, тобто по-суті це нейронна мережа яка розпізнає в ручну написані числа, і її функціоналу повинно бути достатньо щоб бути натренованою на моєму вище зазначеному згенерованому штучному data сеті, і я буду використовувати вирізки коду з цієї CNN для пояснення роботи компонентів.

У проекті було використано наступні бібліотеки:

Eigen: для роботи з лінійною алгеброю(переважно маніпуляції з матрицями);

OpenCv: для маніпуляцій з зображеннями

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ

Процес розробки:

Підготовка зображення:

Все починається з підготовки зображення, так як я хотів упростити процес Прямого поширення (Forward Propagation), ми спочатку конвертуємо його зображення у grey scale, тобто замість 3-4 каналів (RGB, RGBA) у нас буде лише один (255,255,255) ->(255)



Рисунок 4.5 – Результати конвертації RGB зображення в Gray [14]

Потім ми повинні змінити розширення зображення до юніформно визначеного, тобто якщо ми визначили юніформне розширення як 480x480, розмір всіх зображень буде зміненим до цього юніформного розміру:



Рисунок 4.6 – Результати конвертації зображення 720*720 в 480*480 [14]

MNIST має всі зображення у розмірі 28x28, і конверцію до grey scale, повністю бере на себе

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
cv::Mat image = cv::imread(imagePath, cv::IMREAD_GRAYSCALE);
```

Згорткова частина (Convolutional Part) Пряме поширення (Forward Propagation)

Згорткова частина складається з наступних компонентів : згорткові шари(Convolutional Layers), шари об'єднання(Pooling Layers).

Згортковий шар(Convolutional Layer)

Коли зображення потрапляє у нашу модель спочатку воно проходить через перший згортковий шар. Згортковий шар який містить у собі деяку кількість ядер (kernels), що репрезентують собою деяку кількість пхп матриць з рандомно згенерованими номерами у діапазоні від 0 до 1 (зазвичай 3x3, або 5x5). Візуально це може бути репрезентовано наступним чином:

Convolutional Layer:

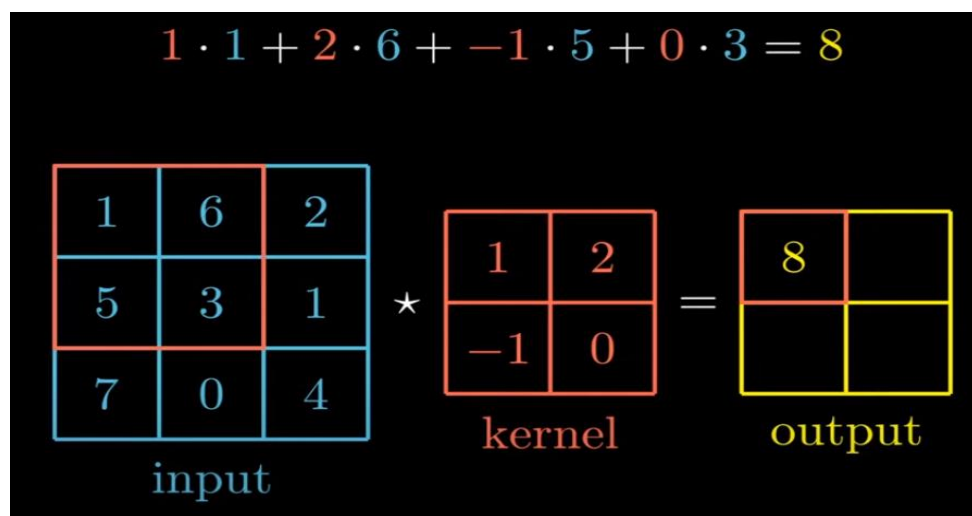
0.5	0.1	0.4
0.56	0.78	0.01
0.41	0.55	0.2
0.8	0.68	0.13
0.23	0.67	0.11
0.43	0.77	0.5
0.99	0.23	0.66
0.33	0.9	0.7
0.44	0.81	0.72

Рисунок 4.7 – Результати генерації матриць згорткового шару [14]

У цьому шарі проходить процес кросс-кореляції (cross-correlation), який представляє собою наступні операції:

5. **Зсув ядра по зображенню:** Ядро (kernel) переміщується по вхідному зображенню (матриці) з певним кроком (stride). На кожному кроці ядро накладається на частину вхідного зображення.
6. **Множення елементів ядра і зображення:** На кожній позиції зсуву кожен елемент ядра множиться на відповідний елемент вхідного зображення. Це елементна (покомпонентна) операція множення.
7. **Сума добутоків:** Результати множення всіх елементів на кожній позиції зсуву підсумовуються, утворюючи одне значення вихідного зображення.
8. **Зміщення ядра на наступну позицію:** Ядро зсувається на наступну позицію згідно з визначеним кроком (stride), і процес множення та сумування повторюється для нової позиції.
9. **Формування вихідного зображення:** Після завершення процесу зсуву по всьому вхідному зображенню формується вихідне зображення (feature map), яке складається з отриманих сум добутоків для кожної позиції зсуву ядра.
10. **Додавання зсуву (bias):** Якщо у моделі передбачено додавання зсуву, то до кожного значення вихідного зображення додається константа (bias).

Цей процес дозволяє виділити та підсилити специфічні характеристики (features) вхідного зображення, такі як контури, текстури та інші деталі, залежно від конфігурації ядра.



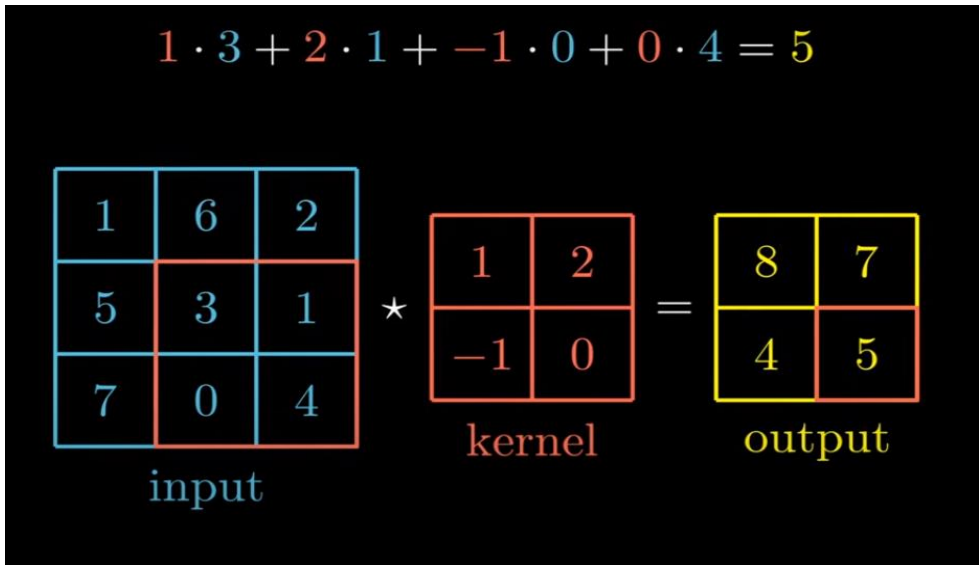
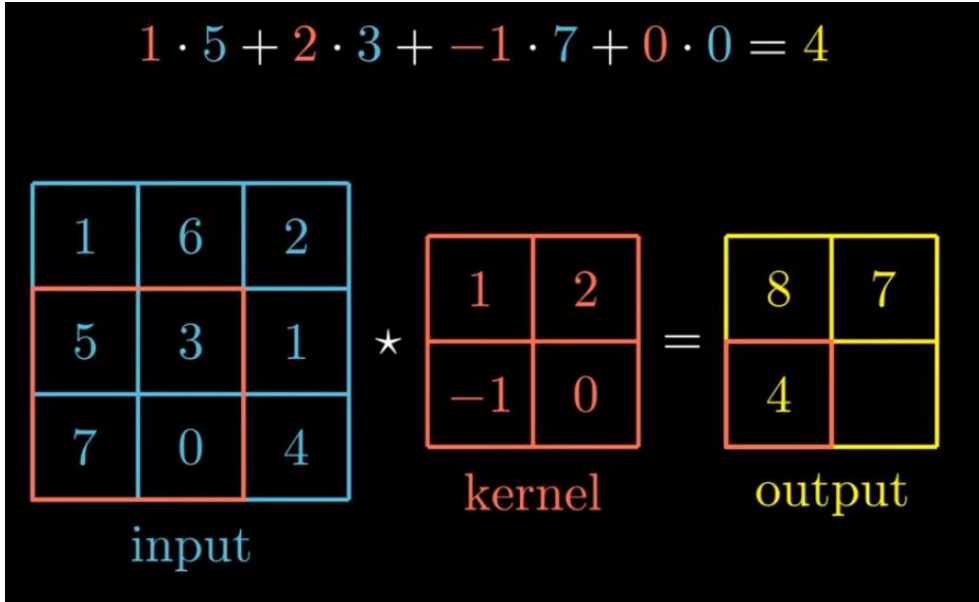
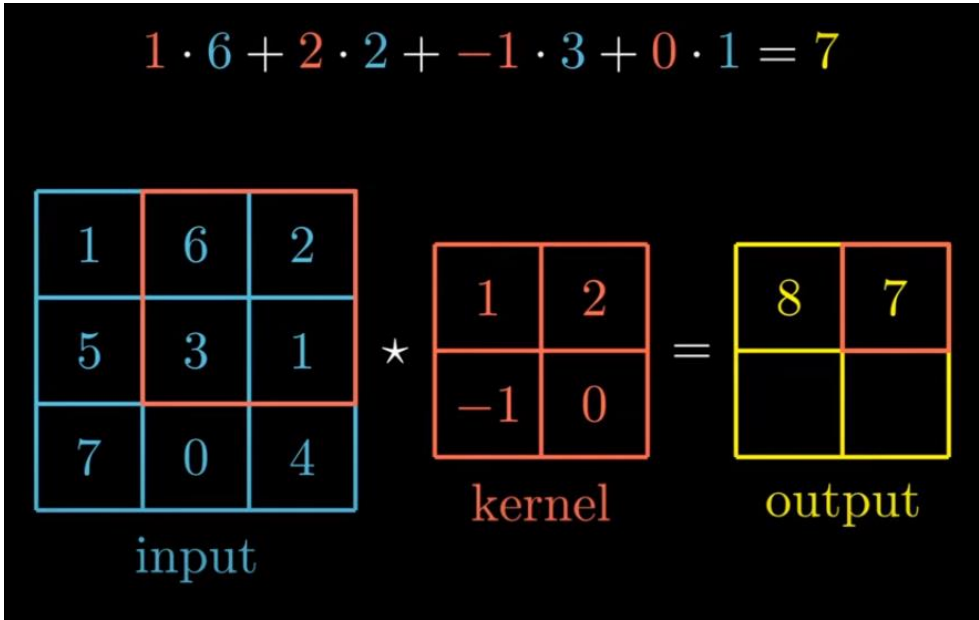


Рисунок 4.8 – Результати процесу кросс - кореляції [15]

Приклад імплементачії у кодї(c++):

код доступний за домовленістю з авторами

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Kernel 0:
-0.934479  0.676625  -0.554193
-0.275777 -0.0601981  0.471348
 0.768346  -0.607514  0.125891

Kernel 1:
-0.934479  0.676625  -0.554193
-0.275777 -0.0601981  0.471348
 0.768346  -0.607514  0.125891

Kernel 2:
-0.934479  0.676625  -0.554193
-0.275777 -0.0601981  0.471348
 0.768346  -0.607514  0.125891

Input Matrix 0:
-0.398127  -0.830623  0.449132  -0.535942  -0.997569
 0.968061  -0.208169  0.792734  0.408463  0.191868
-0.508405  0.723061  0.252368  -0.962085  0.35503
 0.949682  0.966213  -0.132545  0.14302  0.981792
-0.0685701  0.855371  -0.46611  0.081115  0.60041

Input Matrix 1:
 0.149212  0.868322  -0.428121  -0.332872  -0.88915
-0.752391 -0.0962028  0.2344  -0.319096  -0.501647
-0.515891  0.153783  0.190791  0.0703769  0.412668
 0.784313  0.817407  -0.295097  -0.997032  -0.227318
 0.757827  0.330317  0.836616  -0.0241022  -0.658519
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Шар Об'єднання (Pooling Layer)

Наступною ми маємо операцію об'єднання (pooling), яка не є складною, нам просто потрібно зменшити розмір зображення отриманого з попереднього шару (Згортання).

Цей шар подібно до попереднього зсуває ядро по зображенню, єдина різниця заключається в тому, що замість мультиплікації і сумачі всіх елементів, ми просто беремо найбільший елемент з підматриці яку охоплює наше ядро, і записуємо його в результуючу матрицю (я б не сказав що ми маємо ядро ми просто ітеруємо по зображенню коли ми "прикладаємо ядро" щоб знайти найбільший елемент, я назвав це зсуванням ядра тому що так зручніше це уявити):

Max Pooling

Take the highest value from the area covered by the kernel

Example: Kernel of size 2 x 2

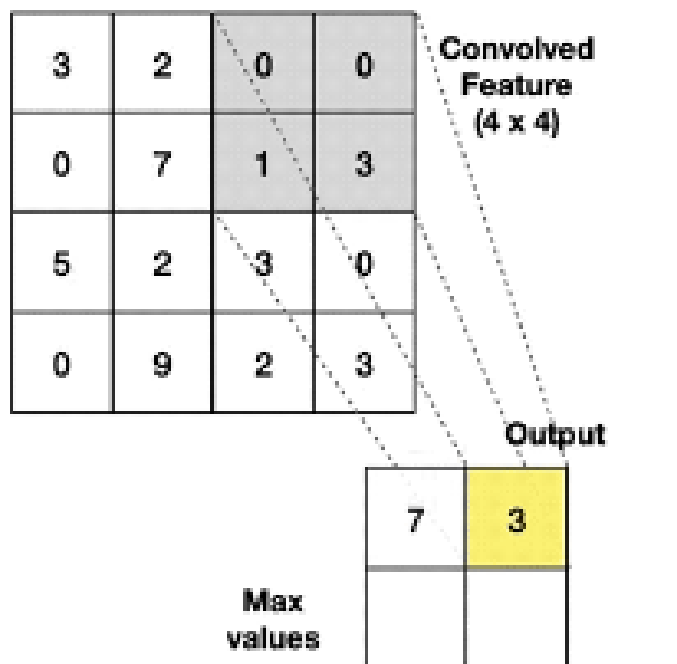


Рисунок 4.12 – Результати операції об'єднання pooling [15]

Імплементація в коді:

```
#include <Eigen/Dense>  
#include <vector>  
#include <iostream>
```

код доступний за домовленістю з авторами

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Input Matrix:
1 2 3 4
5 6 7 8
9 10 11 12
13 14 15 16

Pooled Output Matrix:
6 8
14 16

BackUp Matrix (positions of max values):
0 0 0 0
0 1 0 1
0 0 0 0
0 1 0 1
```

Потім ми знову проводимо вивід поточного шару через наступний шар згортання і повторюємо так до останнього шару об'єднання. Тобто по суті ми маємо бутерброд з цих шарів лежачих один на одному:

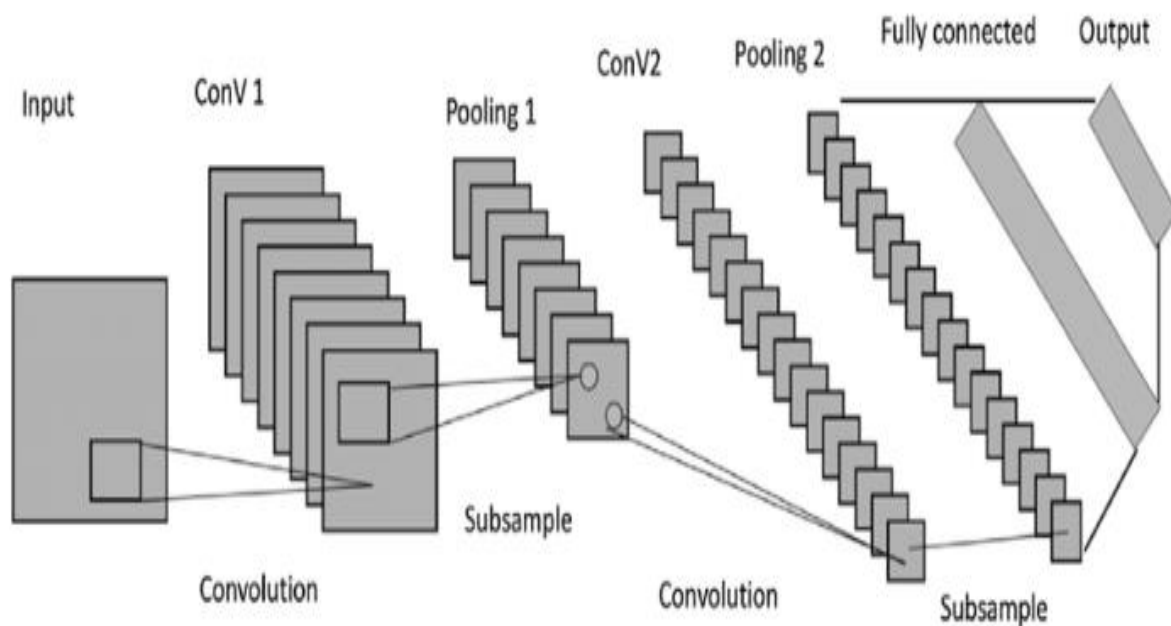


Рисунок 4.13 – Схема виводу поточного шару через наступний [15]

Повнозв'язна частина (Fully Connected Part) Пряме поширення (Forward Propagation)

Повнозв'язна частина нейронної мережі складається з одного або більше повнозв'язних шарів (dense layers), які з'єднують всі нейрони одного шару з усіма нейронами наступного шару. Це дозволяє здійснювати складні нелінійні перетворення і формувати високоурівневі ознаки на основі входу.

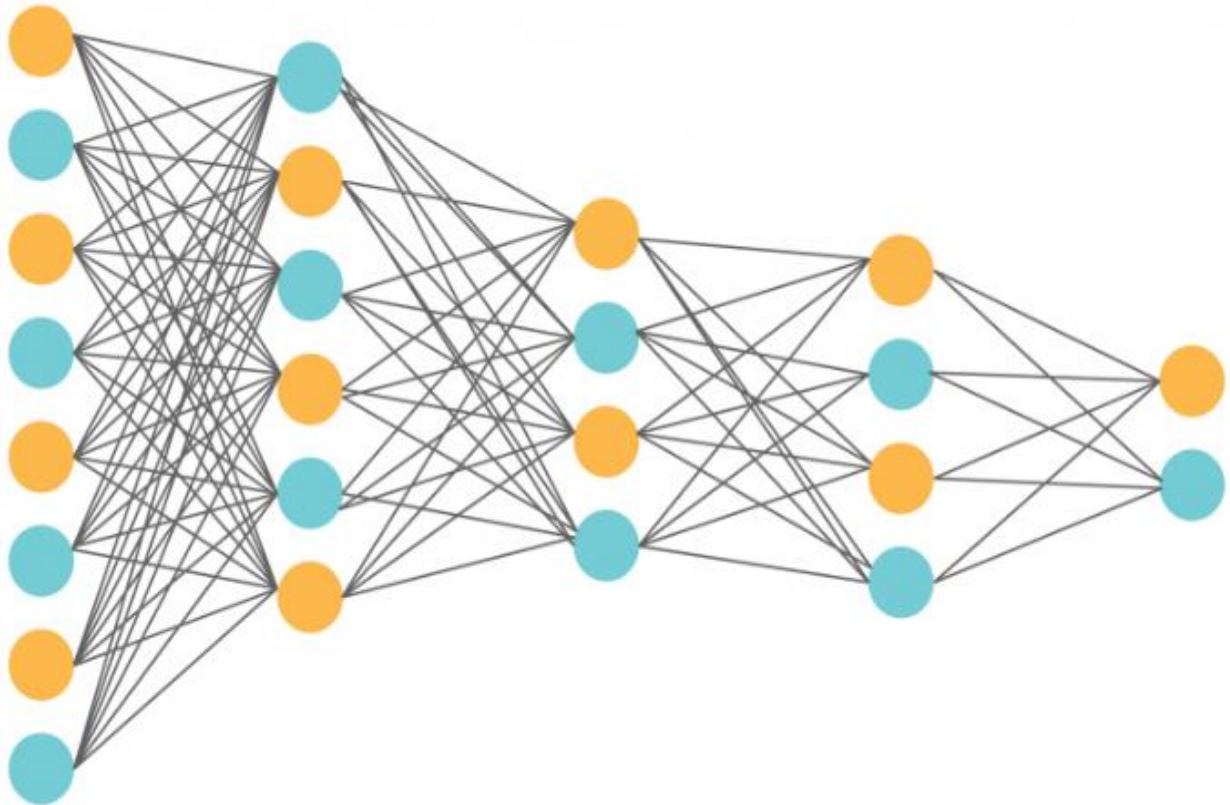


Рисунок 4.14 – Схема зв'язків всіх нейронів одного шару з нейронами інших шарів нейронної мережі [15]

Процес forward propagation (прямого поширення) для fully-connected layer (повністю зв'язаного шару) є ключовим компонентом у багатошарових персептронах і глибоких нейронних мережах. Ось покроковий опис цього процесу:

									Арк.	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ					

1. Ініціалізація

- **Вхідні дані:** Мережа отримує вхідний вектор x , який представляє один зразок даних. Наприклад, для задачі розпізнавання зображень цей вектор може бути сформований з пікселів зображення.
- **Вага і зміщення:** Кожен повністю зв'язаний шар має матрицю ваг W і вектор зміщень b , які ініціалізуються перед початком тренування.

2. Обчислення передактивацій

- Для кожного шару l обчислюється передактивація $z(l)$ за допомогою вагових коефіцієнтів і зміщень.
- Формула для передактивації:

$$z(l) = W(l)a(l-1) + b(l)$$

- Тут:
 - $W(l)$ — матриця ваг для шару l ,
 - $a(l-1)$ — вектор активацій з попереднього шару $(l-1)$,
 - $b(l)$ — вектор зміщень для шару l .

3. Обчислення активацій

- На кожному шарі застосовується функція активації до передактиваційного вектора $z(l)$.
- Формула для активацій:

$$a(l) = f(z(l))$$

- Де f — функція активації, яка може бути нелінійною (наприклад, ReLU, sigmoid, tanh).
- Для першого шару (вхідного шару) $a(0) = x$.

4. Прохід через всі шари

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Цей процес повторюється для кожного повністю зв'язаного шару у мережі.
- Вектор активацій з попереднього шару стає вхідним вектором для наступного шару.

5. Вихідний шар

- У вихідному шарі, залежно від задачі, може використовуватися специфічна функція активації. Наприклад, для задач класифікації часто використовують softmax:

$$\mathbf{y} = \text{softmax}(\mathbf{z}(L))$$

- Де L — останній шар мережі.

6. Обчислення втрати

- Вихідне значення порівнюється з істинним значенням для обчислення втрати (loss).

$$\mathcal{L}(\hat{\mathbf{y}}, \mathbf{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

Імплементация у кодї:

```
#include <iostream>
#include <cmath>
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Що ми отримуємо після запуску коду:

```
Output values:  
0.956893  
0.956893
```

Якщо це був останній шар то нам треба ще додадково буде використати наступну функцію для розрахунку втрати (loss):

код доступний за домовленістю з авторами

Результат після запуску коду:

```
Output values:  
0.956893  
0.956893  
Loss: 0.208751
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повнозв'язна частина (Fully Connected Part) Зворотнє поширення (Backward Propagation)

Після повного процесу прямого поширення через згорткову і повнозв'язану частину, наприклад для MNIST, ми будемо мати результатом щось подібне на :

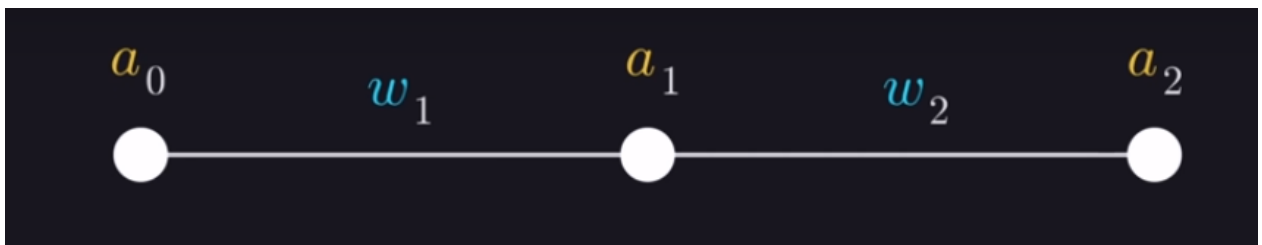
0.7311, 0.6986, 0.8455, 0.5997, 0.6915, 0.7311, 0.5997, 0.7952, 0.6592, 0.8455

На даний момент воно думає що ми маємо 2 або 9 як результат, але проблема в тому що ми очікуємо :

`[0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]`.

, тобто 3, наприклад. Очевидно що передбачення нашої моделі є не дуже точними на даний момент, і ми можемо це виправити шляхом тренування моделі. Якщо коротко, щоб покращити точність передбачення нам потрібно відкалібрувати **ваги і зсуви(weights and biases)** у кожному шарі обох частин моделі. І щоб провести цю калібрацію нам потрібно розрахувати як вони **ваги і зсуви(weights and biases)** кожен вплинули на результат який наша модель видала у останньому шарі. І щоб це зробити нам на допомогу приходить Правило ланцюга (chain rule). Для пояснення буду використовувати скріншоти з [15].

Для початку візьмемо спрощену версію мережі з одним нейроном у кожному шарі:



Розрахунки проходження через мережу і функція втрати:

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z_1 = a_0 w_1 + b_1$$

$$a_1 = A(z_1)$$

$$z_2 = a_1 w_2 + b_2$$

$$a_2 = A(z_2)$$

$$c = C(a_2, y)$$

Похідна від функції за змінною w_2 буде виглядати наступним чином :

$$\frac{\partial c}{\partial w_2} = \frac{\partial z_2}{\partial w_2} \times \frac{\partial a_2}{\partial z_2} \times \frac{\partial c}{\partial a_2}$$

І для w_1 :

$$\frac{\partial c}{\partial w_1} = \frac{\partial z_1}{\partial w_1} \times \frac{\partial a_1}{\partial z_1} \times \frac{\partial z_2}{\partial a_1} \times \frac{\partial a_2}{\partial z_2} \times \frac{\partial c}{\partial a_2}$$

При чому можна помітити що наступна формула то є просто продовження попередньої. Це може бути продовженим таким чином до безкінечності для безкінечної кількості шарів.

Імплементация:

- 1) Розрахувати похідну від функції втрати і функції активації:

						ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

код доступний за домовленістю з авторами

Тут ми розрахуємо :

$$\frac{\partial a_2}{\partial z_2} \times \frac{\partial c}{\partial a_2}$$

2) Потім розрахувати похідну для всіх ваг(weights), зсувів(biases):
код доступний за домовленістю з авторами

3) Розрахунок похідної для вводу(input), що повернути її до попереднього шару і повторити процес у кроці 2).

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

код доступний за домовленістю з авторами

Тепер коли ми маємо ці 3 функції представлені, можна показати як все працює разом:

- 1) Спочатку ми розраховуємо передбачення з теперішніми вагами і зсувами:

код доступний за домовленістю з авторами

- 2) Потім ми розраховуємо похідну для функції втрати(loss function):

код доступний за домовленістю з авторами

- 3) після цього ми обчислюємо градієнти для кожного ваг і зсувів для останнього шару:

```
Lastlayer.UpdateGradient(chainValues);
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) потім ми просто ітеративно через всі внутрішні шари використовуємо функцію `CalculateHiddenLayerChainValues` яка розрачує градієнти відносно вводу(input), що ми передамо до наступного шара(чи краще виразитися до попереднього), і `UpdateGradients` для розрахунку ваг і зсувів на основі градієнтів отриманих з наступного шару (те що передала `CalculateHiddenLayerChainValues`)

Після цього ми просто віднімаємо розраховані градієнти для ваг і зсувів у

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кожному шарі помножено на рейт навчання:

код доступний за домовленістю з авторами

Це дозволить нам відкалібрувати всі параметри з маленькими кроками (так як learning rate зазвичай є числом як 0.1 або нижче) .

Згорткова частина (Convolutional Part) Зворотнє поширення (Backward Propagation)

Pooling Layer:

Після того як ми пропагували наш градієнт до останнього шару (першого шару так як ми ідемо назад), він повинен потрапити до нашої згорткової частини. Перша проблема є тим що ми повертаємо один величезний вектор, нам треба його розділити на матриці спочатку:

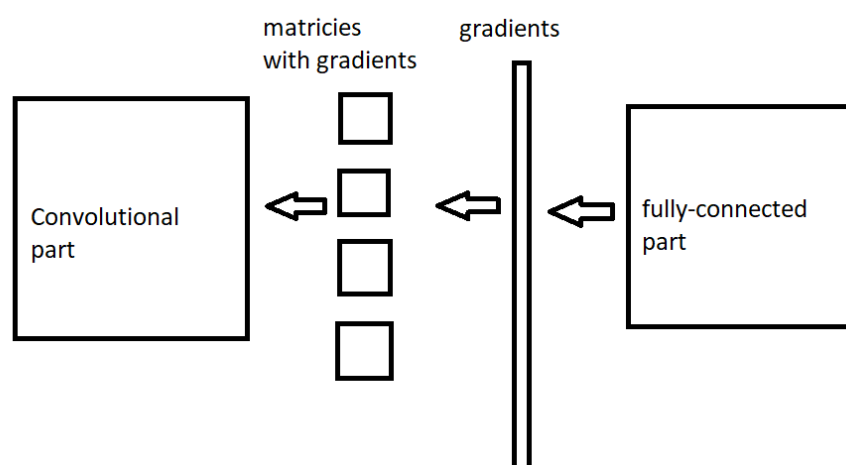


Рисунок 4.15 – Схема зворотнього процесу до згорткової частини [15]

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

Імплементація:

код доступний за домовленістю з авторами

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Reconstructed Matrices:  
1 2 3  
4 5 6  
7 8 9  
  
10 11 12  
13 14 15  
16 17 18
```

Потім нам потрібно буде повернути ці значення на позиції з яких вони були витягнутими для зменшення розміру зображення у прямій пропагації, для цих цілей ми зберігали позиції з яких ми брали найбільше значення в матриці як

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

одиниці у іншій матриці і в нас виходило щось такого типу:

Імплементация:

код доступний за домовленістю з авторами

						Арк.
					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Original Gradients:  
-0.934479  0.676625  -0.554193  
-0.275777 -0.0601981  0.471348  
 0.768346  -0.607514  0.125891  
  
-0.398127  0.949682  -0.208169  
 0.968061 -0.0685701  0.723061  
-0.508405  -0.830623  0.966213  
  
Backup Matrices:  
1 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0  
0 0 1 0 0 0  
0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 1 0  
0 0 0 0 0 0  
  
1 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0  
0 0 1 0 0 0  
0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 1 0  
0 0 0 0 0 0
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Input Matrix:
 1  2  3  4  5
 6  7  8  9 10
11 12 13 14 15
16 17 18 19 20
21 22 23 24 25
Gradient Matrix:
 1  0 -1  0  1
 1  0 -1  0  1
 1  0 -1  0  1
 1  0 -1  0  1
 1  0 -1  0  1
Kernel Matrix (Initial):
 0  0  0
 0  0  0
 0  0  0
Gradient WRT Kernel:
-6 -24  6
-6 -39  6
-6 -54  6
```

І так ми повторюємо для кожного градієнта з кожним вводом, і повертаємо порахований градієнт назад до згорткового шару щоб відкалібрувати ваги в ядрах і зсуви, зсуви до речі рахуються простою сумацією всіх значень у матриці градієнта,

```
gradientsWRTBiases(i) = redirectedGradients[i].sum();
```

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Калібрація ядер і зсувів:

код доступний за домовленістю з авторами

Convolutional Layer:

Залишається лише повернути градієнт з згорткового шару до попереднього Pooling layer щоб повторити процес, і все що нам треба зробити, це провести **конволюцію** між кожною матрицею градієнтів з кожним ядром оберненим на 180 градусів (це важливо).

Імплементация:

код доступний за домовленістю з авторами

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Демонстрація:

```
Output Matrix 0:  
32 32 32  
32 32 32  
32 32 32
```

Тепер те що ми маємо у Output Matrix 0 піде до попереднього Pooling Layer.

І таким чином ми матимемо одну повну ітерацію процесу тренування моделі описаною. Далі потрібно провести десятки тисяч таких операцій звісно, на нашому штучному сеті.

4.3. Результати тренування моделі згорткової нейронної мережі

Я імплементував невеликий Графопобудовник щоб продемонструвати процес тренування:

На початку процесу тренування ми бачимо що помилка тримається на рівні одиниці:

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

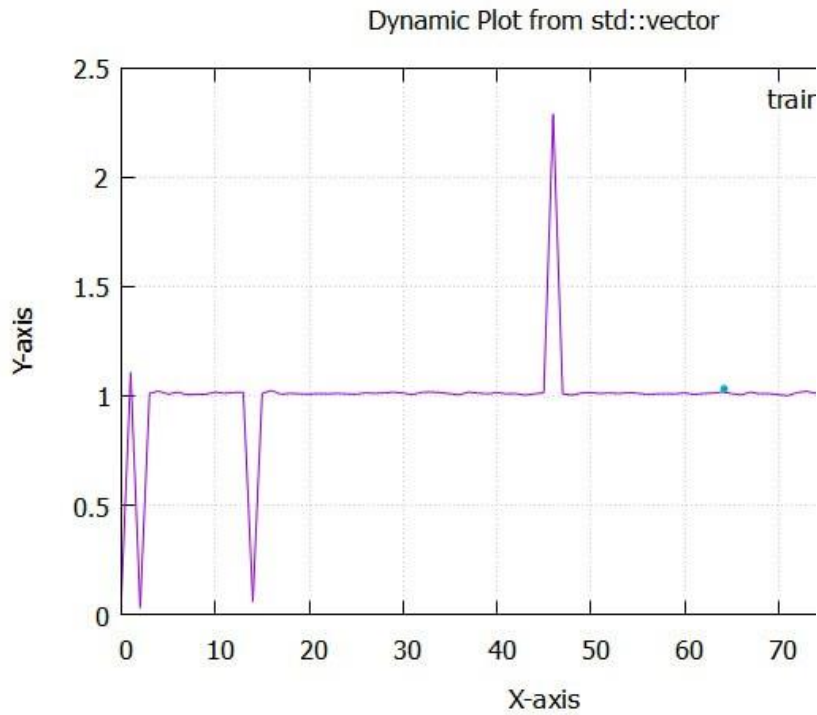


Рисунок 4.17 – Результати початку тренування моделі

Але потім ми можемо помітити просадку:

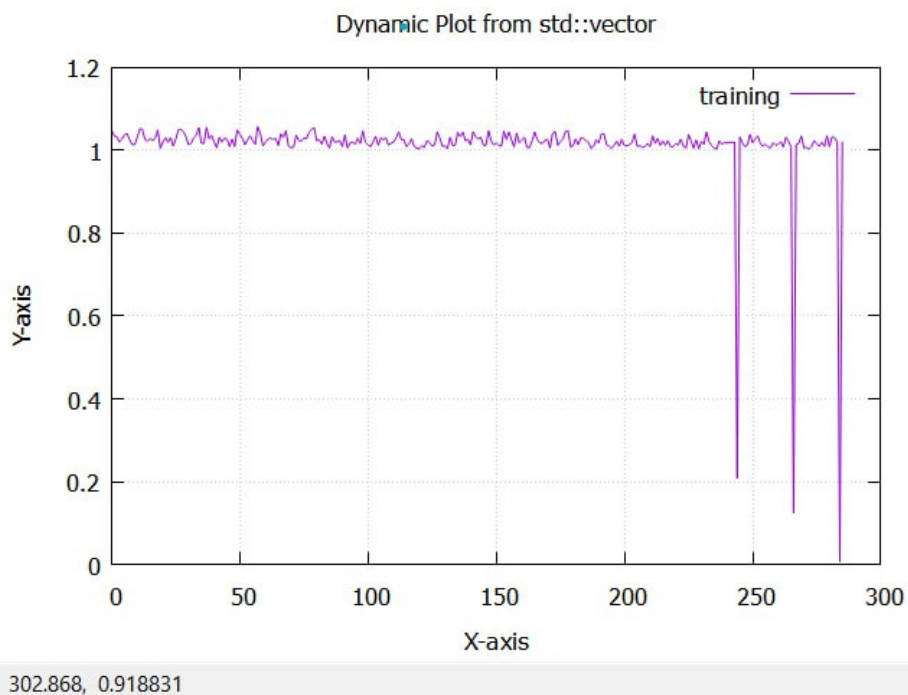


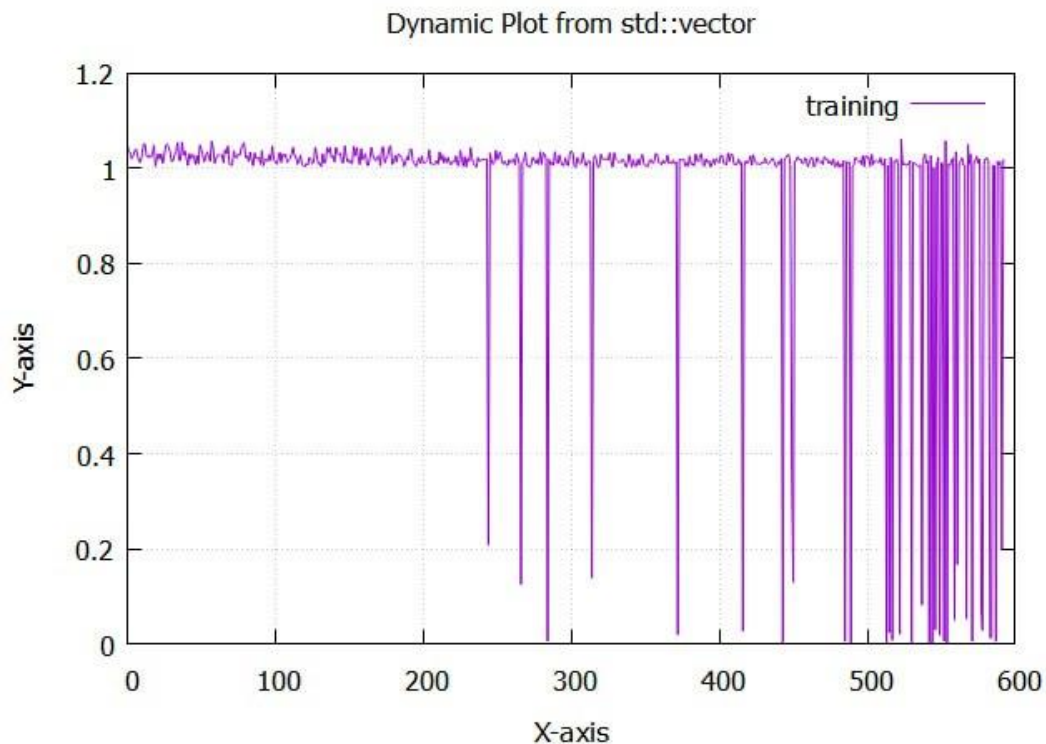
Рисунок 4.18 – Результати тренування моделі

І з часом ці просадки стають все частішими і частішими:

ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ

Арк.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------



614.726 0.210702

Рисунок 4.19 – Результати імплементації моделі

Це означає що наша модель тренується і була імплементована коректно.

Для повної впевненості я ще вивожу частоту з якою наша модель робить правильну відповідь, і через 10000 ітерацій ми досягли точності у 70%:

```

guess Rate: 0.744884
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
guess Rate: 0.744725
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
guess Rate: 0.744765
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
guess Rate: 0.744806
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
guess Rate: 0.744846
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S
guess Rate: 0.744887
Loaded image from: D:/C++/NeuralNetwork/MNIST Dataset JPG format/MNIST Dataset JPG format/MNIST-S

```

Тепер коли ми натренуємо нашу модель на нашому штучно-згенерованому сеті даних, ми будемо мати координати прямокутника який дасть нам змогу вирізати підзображення лише з номерним знаком і помістити його в Tesseract

									Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ				

Tesseract - це оптичний рушій розпізнавання символів (OCR) з відкритим вихідним кодом, який може розпізнавати та конвертувати текст з зображень у редаговані текстові формати. Ось детальне пояснення того, як працює Tesseract:

1. Отримання зображення

Першим кроком у OCR є отримання зображення, яке містить текст. Це може бути відсканований документ, фотографія тексту або будь-який інший формат зображення, який підтримує Tesseract.

2. Попередня обробка

Перед розпізнаванням тексту зображення часто піддається попередній обробці для покращення точності OCR. Загальні кроки попередньої обробки включають:

- **Перетворення у відтінки сірого:** Перетворення зображення у відтінки сірого, щоб зменшити складність зображення та виділити текст.
- **Бінаризація:** Перетворення зображення у двоколірний (чорно-білий) формат для покращення контрастності між текстом і фоном.
- **Шумозаглушення:** Видалення шуму з зображення для зменшення кількості помилок під час розпізнавання.
- **Вирівнювання:** виправлення нахилу або перекосів тексту на зображенні, щоб зробити текст горизонтальним.

4. Сегментація

5. Після попередньої обробки зображення Tesseract розділяє зображення на менші сегменти, такі як:

- **Сторінки:** Якщо зображення містить кілька сторінок, кожна сторінка розглядається окремо.
- **Рядки:** Кожна сторінка ділиться на рядки тексту.
- **Слова:** Кожен рядок ділиться на окремі слова.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- **Символи:** Кожне слово ділиться на окремі символи.

4. Розпізнавання тексту

На етапі розпізнавання Tesseract використовує нейронні мережі для аналізу кожного символу та порівняння його з шаблонами. Цей процес включає:

- **Векторизацію:** Перетворення зображення символів у вектори ознак.
- **Класифікація:** Використання класифікатора для визначення ймовірності відповідності кожного символу до певного символу тексту.
- **Словникова перевірка:** Перевірка розпізнаних слів у словнику для підвищення точності.

5. Постобробка

Після розпізнавання тексту Tesseract може виконувати додаткову обробку для покращення результатів:

- **Корекція помилок:** виправлення помилок розпізнавання на основі контексту.
- **Форматування тексту:** Збереження вихідного форматування тексту, такого як абзаци, відступи та інше.

6. Виведення

Нарешті, розпізнаний текст зберігається у відповідному форматі, такому як текстовий файл, PDF або інший редагований формат.

Цей процес дозволяє Tesseract ефективно перетворювати текст із зображень у цифровий формат для подальшого редагування та аналізу.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Завдання на дипломне проектування по темі «Автоматична система вагового обліку автотранспортування продукції» виконано в повному обсязі.
2. Розробка автоматичних систем обліку продукції, яка перевозиться автотранспортом обґрунтована.
3. Доказана можливість модернізації автоматизованих систем обліку до рівня автоматичних через розробку низькопрофільних ваговимірювальних перетворювачів та програмного забезпечення ідентифікації типу автотранспорту, його державного номеру і присутності водія та пасажирів в автомобілі при зважуваннях.
4. Обґрунтовано застосування в автоматичних системах обліку тензометричного принципу дії ваговимірювального перетворювача.
5. Модернізовано уніфікований ряд тензодатчиків ваги класу точності С3 з висотою пружного елемента 105 мм.
6. Проведені розрахунки статичних та динамічних характеристик ваговимірювальних перетворювачів.
7. Розроблено тензорезистор для чутливих елементів типу “розтяг-зтиск” з компенсацією згинних деформацій.
8. Виконано аналіз можливостей застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для розпізнавання номерних знаків автотранспорту в умовах реального часу.
9. Розроблено та навчено згорткову нейронну мережу для ідентифікації типу автотранспорту на основі зображень, отриманих з камер відеоспостереження.
10. Виконано інтеграцію розробленої CNN з програмним забезпеченням автоматичної системи вагового обліку для автоматичного визначення та реєстрації типу транспортного засобу та його державного номеру.
11. Проведено тестування точності та продуктивності CNN на різних наборах даних, що включають зображення автотранспорту з різних кутів та в різних умовах освітлення.

					ДП ПМ0115. 00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

