

**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
технології проектування приладів»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані
технології»
на тему: «Система автоматизованого контролю перенавантажень
автотранспорту в русі»**

Виконав: студент IV курсу, групи ПМ-91

Прибильський Антон Ігорович _____

Керівник: Старший викладач, АСНК ПБФ

Зайцев Віктор Миколайович _____

Рецензент: Доцент, д.т.н., доцент,

Козир Олег Васильович _____

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

Студент _____

Київ - 2023 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПМ9111. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	63	
3	A1	ДП ПМ9111. 01.000 СК	Складальний кресленик	1	
4	A1	ДП ПМ9111. 02.000 ТК	Складальні одиниці	1	
5	A1	ДП ПМ9111. 03.000 ТК	Ілюстраційний лист	1	
6	A1	ДП ПМ9111. 04.000 ТК	Графічний матеріал	1	

				ДП ПМ9111.001.00	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Прибильський.			Лист	Листів
Керівн.	Зайцев В.М.			1	1
Консульт.				КПШ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПБ Гр. ПМ-91	
Н/контр.					
Зав.каф.	Киричук Ю.В.				

**Пояснювальна записка до дипломного проєкту
на тему: «Система автоматизованого контролю
перенавантажень автотранспорту в русі»**

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 технології проектування приладів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Юрій КИРИЧУК

«__»_____2023 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту
Прибильського Антона Ігоровича

1. Тема проєкту «Система автоматизованого контролю перенавантажень автотранспорту в русі», керівник проєкту Зайцев Віктор Миколайович, старший викладач, затверджені наказом по університету від «30» 05 2023 р. № 2051-с
2. Термін подання студентом проєкту 15 червня 2023 р.
3. Вихідні дані до проєкту 3.1. Границі вимірювальних зусиль, m – НГВ-180,0; НмГВ -5.0; 3.2. Тип вимірювальної системи – електромеханічна на базі тензометричних перетворювачів; 3.3. Кількість датчиків вимірювального пристрою -4; 3.4. Границя відносних приведених похибок перетворювача $\pm 0,1\%$; 3.5. Тип пружного елемента –зсувний або розтягу-стиску; 3.6. Робочий коефіцієнт перетворення 2,0 мВ/В.
4. Зміст пояснювальної записки 4.1. Огляд та аналіз існуючих конструкцій вимірювання зусиль; 4.2. Розробка конструкції та принципів схем ваг. 4.3.Розробка принципів схем тензорезисторного перетворювача; 4.5. Розрахунок метрологічних характеристик тензорезисторного датчика сили; 4.6. Технологічна частина проєкту.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5.1 Складальний кресленик ваг-1; арк. Ф А1. 5.2.Лист складальних одиниць – 1арк. ф А1; 5.3.Лист робочих креслеників деталей- 1 арк.ф А1; 5.4. Лист схем та графічних залежностей -1 арк.ф А1;

6. Консультанти розділів проекту

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

7. Дата видачі завдання 30 квітня 2023 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 2023 р.	
2.	Виконання пояснювальної записки ДП	05 червня 2023 р.	
3.	Виконання технологічного розділу ДП, передача на перевірку та одержання підпису консультанта	05 червня 2023 р.	
4.	Виконання графічних матеріалів ДП	05 червня 2023 р.	
5.	Подання керівнику для перевірки: ДП та тексту його остаточного варіанту в електронному вигляді, одержання відгука на ДП	10 червня 2023 р.	
6.	Одержання рецензії на ДП	12 червня 2023 р.	
7.	Подання ДП на кафедру, одержання грифу «До захисту допущено» у завідувача кафедри	12 червня 2023 р.	
8.	Подання ДП, відгука та рецензії в екзаменаційну комісію університету	12 червня 2023 р.	
9.	Захист дипломного проекту в екзаменаційній комісії університету	20 червня 2023 р.	

Студент _____ Антон ПРИБИЛЬСЬКИЙ

Керівник _____ Віктор ЗАЙЦЕВ

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект бакалавра на тему «Система автоматизованого контролю перенавантажень автотранспорту в русі». Проект складається із вступу , двох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Проект містить 63 сторінку, 4 таблиці, 27 рисунків, список використаних джерел з 29 найменувань, 4 додатків.

Метою дипломного проекту є розробка автоматизованої системи вимірювання ваги автомобілів в русі. У проектно-конструкторській частині проекту проаналізовані існуючі типи систем та окремі впроваджені конструкції , які застосовуються в світовій практиці для зважування автотранспорту в русі. Обґрунтована доцільність та актуальність проектування системи платформового типу з перетворювачами, які уявляють окремі конструктивні елементи. Розглянуті характеристики двох типів ваговимірювальних тензорезисторних перетворювачів з зсувним пружним елементом та пружним елементом розтягу-стиску.

У другій частині були проведені розрахунки технологічності конструкції вимірювального перетворювача для оцінки доцільності виробництва вимірювального перетворювача зсувного типу. Розроблені схема складального складу та технологічна схема складання перетворювача.

Ключові слова: ваговимірювальний перетворювач, тензодатчик, вимірювання ваги, зважування автомобілів у русі.

ABSTRACT

Bachelor's degree project on the topic "Automated control system for overloading vehicles in motion". The project consists of an introduction, two chapters, conclusions, a list of references and appendices. The project consists of 63 pages, 4 tables, 27 figures, a list of references consisting of 29 titles, and 4 appendices.

The purpose of the thesis project is to develop an automated system for measuring the weight of cars in motion. In the design and development part of the project, the existing types of systems and some implemented designs used in world practice for weighing vehicles in motion are analyzed. The expediency and relevance of designing a platform-type system with transducers representing separate structural elements are substantiated. The characteristics of two types of weighing strain gauge transducers with a shear elastic element and a tensile-compression elastic element are considered.

In the second part, we calculated the manufacturability of the transducer design to assess the feasibility of manufacturing a shear-type transducer. The scheme of the assembly warehouse and the technological scheme of the transducer assembly were developed.

Keywords: weighing transducer, strain gauge, weight measurement, weighing of vehicles in motion.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП	11
1 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	12
1.1 ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ НА ОСНОВІ КРИТИЧНОГО ОГЛЯДУ АНАЛОГІВ WIM-СИСТЕМ.....	12
1.2 WIM-СИСТЕМИ: РІЗНОВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ .	16
1.3 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ.....	22
1.4 ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ WIM-СИСТЕМ.....	24
1.5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ.....	25
1.6 ОПИС АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ АВТОМОБІЛІВ В РУСІ	27
1.6.1 СИСТЕМА KITRAFFIC DIGITAL WIM.....	27
1.6.2 СИСТЕМА SIWIM.....	30
1.6.3 БОРТОВА СИСТЕМА ЗВАЖУВАННЯ ON-BOARD WIM ВІД TRANSCORE (БОРТОВІ WIM).....	34
1.7. ОСНОВНІ ТЕХНІКО-МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ.....	36
1.8 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ	40
1.9 РОЗРАХУНОК ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	42
1.9.1 ВИБІР ТЕНЗОРЕЗИСТОРА	42
1.9.2 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ РОЗТЯГУ-ЗТИСКУ	43
1.9.2 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ РОЗТЯГУ СТИСКУ	45
1.9.3. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ЗСУВНОГО ТИПУ	48
1.10 АНАЛІЗ КАТЕГОРІЇ ТОЧНОСТІ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ	50
ВИСНОВОК ДО ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКОГО РОЗДІЛУ	52
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	53
2.1 ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЇ НА ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ.....	53
2.2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ	55

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3	РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ СКЛАДАЛЬНИХ РОБІТ	56
2.4	РОЗРОБКА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ	57
2.5	РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ	58
	ВИСНОВОК.....	59
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

WIM (Weigh in Motion) – система автоматичного вимірювання ваги транспортних засобів під час руху.

B-WIM (Bridge Weigh-in-Motion) – Мостові WIM системи.

OBW (On-Board Weigh-In-Motion) – Бортові WIM системи.

In-Road WIM – Дорожні WIM системи.

ТУ – технічні умови.

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика.

ФЧХ – фазова - частотна характеристика.

АЦП – аналого - цифровий перетворювач.

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Динамічне зважування транспорту є важливим елементом управління дорожнім рухом, яке забезпечує виконання нормативних вимог до максимальної маси транспортних засобів та їх навантаження. Застосування WIM-систем дозволяє уникнути перевантаження доріг, мостів та інших споруд, що забезпечує збереження та продовження їх експлуатації.

Окрім того, розробка ефективних та надійних WIM-систем є важливою для забезпечення безпеки та ефективності транспортного руху. Недооцінка маси навантаження на транспортний засіб може призвести до нещасних випадків на дорозі, а також до пошкодження дорожнього покриття та інших дорожніх споруд.

На даний момент, існує низка проблем та недоліків, пов'язаних з WIM-системами, такі як точність вимірювань, стійкість до впливу погодних умов та інших факторів, що можуть впливати на результати вимірювань. Тому, метою даної дипломної роботи є аналіз сучасних технологій та методів динамічного зважування транспорту, їх переваг та недоліків, а також розробка рекомендацій для вдосконалення WIM-систем з метою забезпечення їх ефективності та надійності.

У рамках роботи будуть проведені дослідження та аналіз літературних джерел, виконано порівняння різних технологій та методів динамічного зважування транспорту, розроблено та запропоновано методи вдосконалення WIM-систем, що дозволить підвищити їх ефективність та точність вимірювань.

Отримані результати дослідження можуть бути корисними для вирішення проблем, пов'язаних з динамічним зважуванням транспорту, а також для покращення безпеки дорожнього руху та збереження дорожньої інфраструктури у відмінному стані.

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

1.1 ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ НА ОСНОВІ КРИТИЧНОГО ОГЛЯДУ АНАЛОГІВ WIM-СИСТЕМ

Зважування в русі (WIM) – це технологія, яка може використовуватися для різних приватних і громадських цілей, пов'язаних з вагою та навантаженням на вісь автомобілів і залізничних транспортних засобів. Системи WIM встановлюються на автомобільні або залізничні колії, або на самому транспортному засобі, і вимірюють, зберігають та передають дані про транспортний потік або конкретний транспортний засіб. Для систем WIM існують певні специфічні умови, які впливають на якість та надійність вимірюваних даних системи WIM, а також на тривалість роботи датчиків та самої системи.

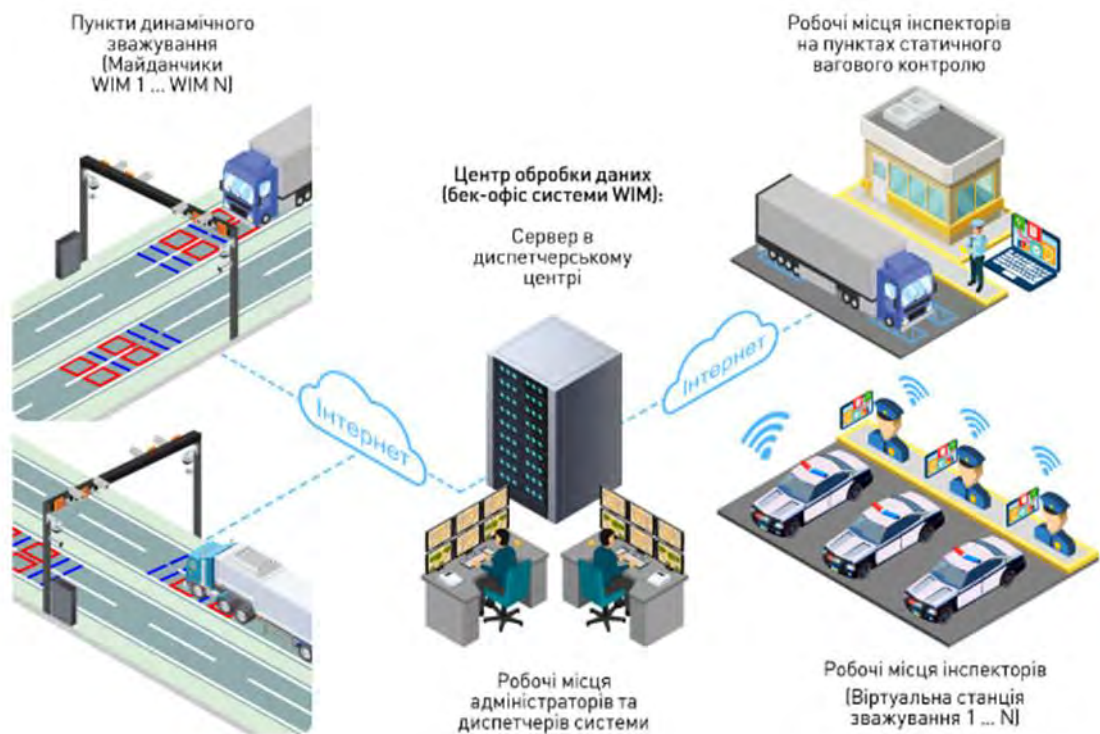


Рис. 1.1 - Архітектура автоматизованої системи динамічного зважування [1]

Принцип роботи WIM полягає у вимірюванні ваги транспортного засобу, який проїжджає через спеціально встановлені на дорозі сенсори. Для цього використовуються три основні типи сенсорів: п'єзоелектричні, деформаційні та акустичні. Кожен з цих типів сенсорів має свої переваги та недоліки.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1. П'єзоелектричні перетворювачі є найбільш поширеними для вимірювання швидкозмінних механічних величин – сили, прискорення, тиску. Основою конструкції таких перетворювачів є п'єзоелектричні чутливі елементи, які генерують електричні заряди при дії механічної напруги, яка створюється вимірювальною фізичною величиною.



Рис. 1.2 - П'єзоелектричний чутливий елемент [27]

Коли транспортний засіб проїжджає через п'єзоелектричний сенсор, його вага змінює форму сенсора, що призводить до генерації електричного сигналу, який потім перетворюється електронною частиною системи.

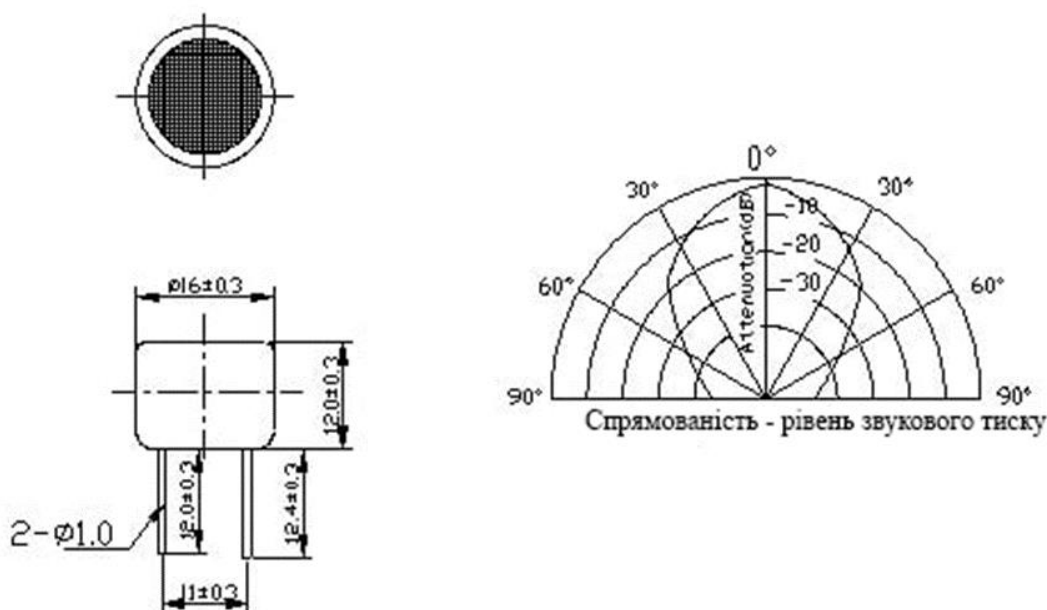


Рис. 1.3 – Геометричні розміри та діаграма спрямованості п'єзоелектричного перетворювача [27]

					Арк.
					13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

2. Деформаційні сенсори, як правило, містяться в металевих платах, які згинаються під вагою транспортного засобу. Вони менш поширені, ніж п'єзоелектричні сенсори, оскільки вони менш точні та менш надійні.

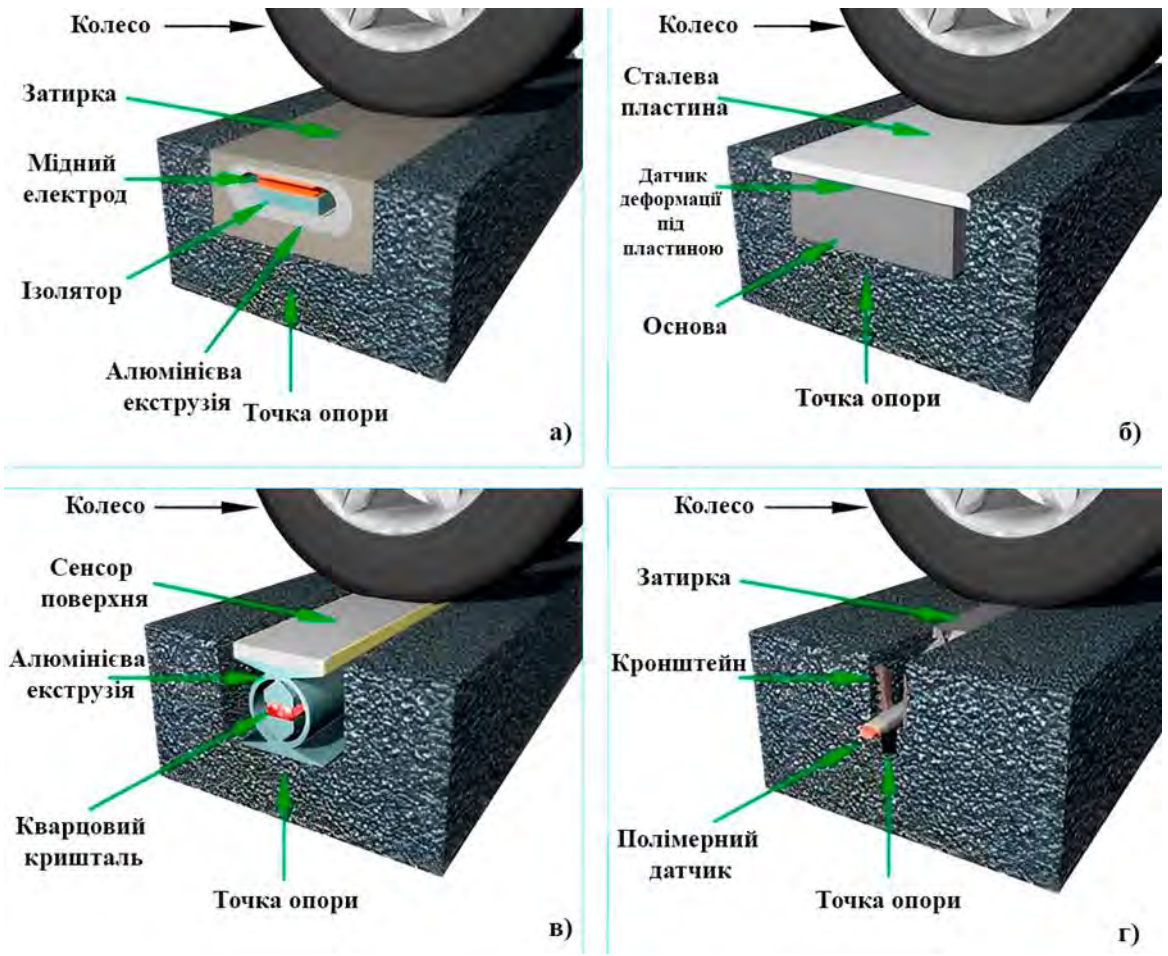


Рис. 1.4 - Технології датчиків WIM для дорожнього покриття: (а) ємнісний датчик, (б) згинаюча пластина, (в) п'єзокварцовий, (г) п'єзоелектричний або п'єзополімерний стрижень [25]



Рис. 1.5 - Акустичні сенсори

Після того, як вага транспортного засобу виміряна, вона передається до WIM-системи для обробки та аналізу. Отримані дані можуть бути використані для різних цілей, таких як визначення вагового контролю, збору статистики про вантажні перевезення на дорозі та планування ремонтних робіт дорожнього покриття.

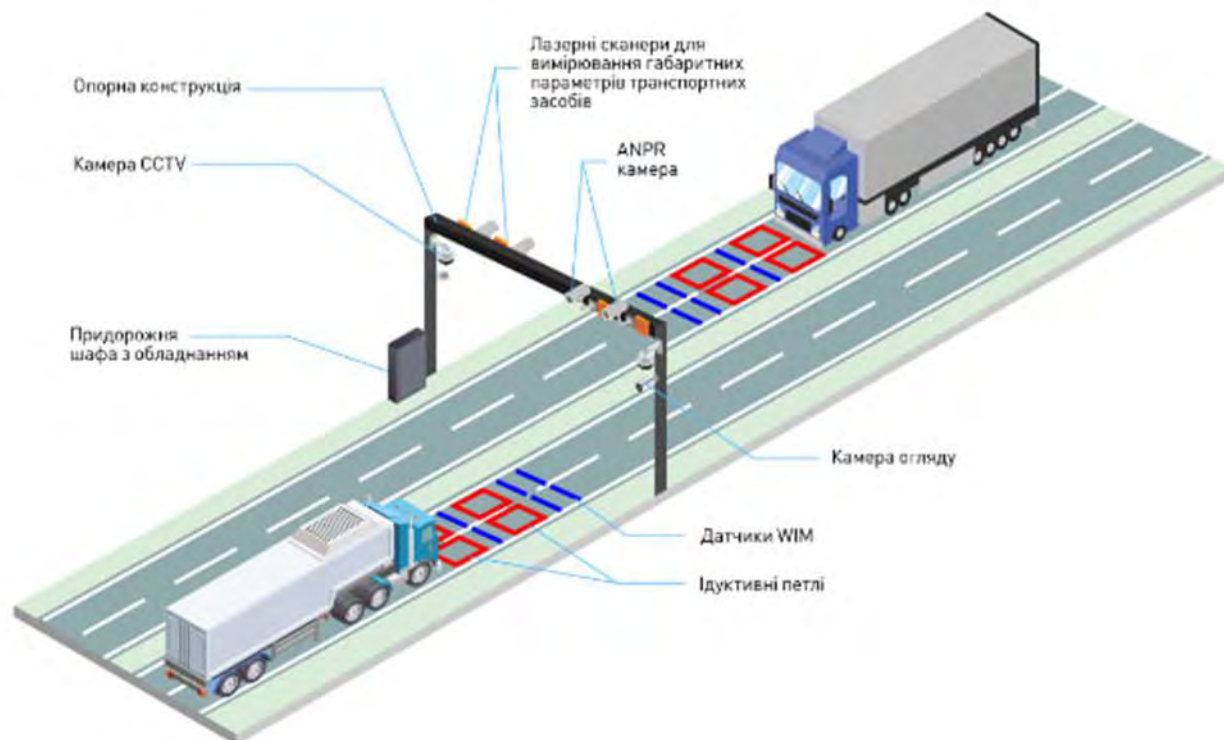


Рис. 1.6 - Пункт динамічного зважування WiM [1]

Один з найбільш важливих параметрів, які визначають WIM-системи - це маса транспортного засобу. Однак деякі системи можуть також визначати інші параметри, такі як відстань між віссю транспортного засобу та розподіл ваги на кожен вісь. WIM-системи можуть бути розташовані на дорогах різного рівня, включаючи автостради, міські дороги та промислові зони. Деякі системи можуть бути встановлені на дорозі, інші можуть бути мобільними та переносними.

						Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

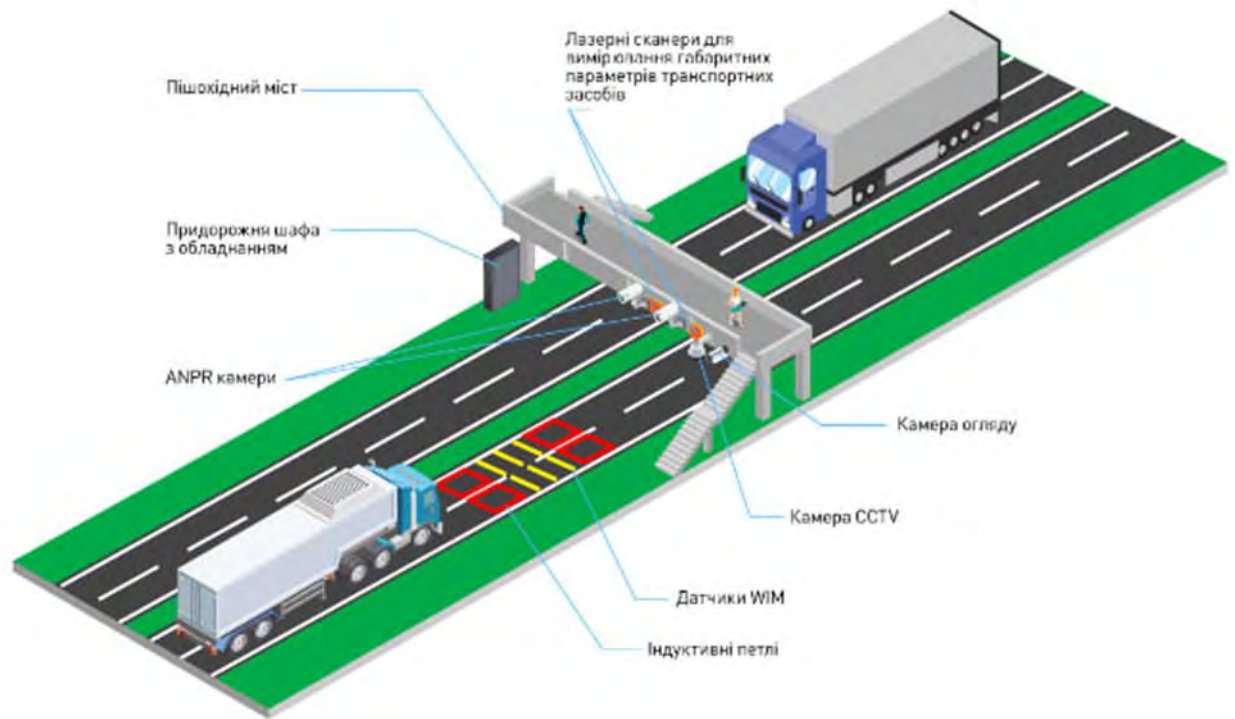


Рис. 1.7 - Обладнання для вимірювальних майданчиків WIM [2]

Одним із головних застосувань WIM-систем є контроль вантажоперевезень на дорогах. Такі системи дозволяють контролювати вагу транспортних засобів та перевіряти, чи дотримуються вони встановлених обмежень щодо максимальної ваги. Крім того, WIM-системи можуть допомогти в зборі даних для статистики та планування ремонтних робіт дорожнього покриття.

1.2 WIM-СИСТЕМИ: РІЗНОВИДИ, ОСОБЛИВОСТІ ВСТАНОВЛЕННЯ

Загалом, повна система WIM складається з набору вагових датчиків, які вбудовані у дорожнє покриття або прикріплені до мосту, а також придорожнього блоку, що включає всю електроніку, таку як блок обробки даних, засоби зберігання і передачі даних. Залежно від конкретного застосування, до системи WIM можуть бути додані різноманітні додаткові датчики, наприклад датчики температури і прогину, що допомагають компенсувати зміни в реакції датчика, або камери для фотографування та розпізнавання номерних знаків для контролю вагового режиму.

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчики WIM можуть мати різні форми, такі як стрічкові, смугові, вагові або пластинчасті. Стрічкові датчики є вузькими, ніж ширина шини, і отримують сигнал вимірювання, коли колесо або вісь знаходяться над ними. Тому для отримання сили, що діє на колесо/вісь, необхідно знати швидкість транспортного засобу і інтегрувати сигнал у часі. Ширина пластинчастих датчиків або шкал у напрямку руху більша, ніж ширина шини, тому вони миттєво вимірюють силу, що діє на колесо. Існує багато різних технологій вимірювання, які можуть бути використані як для пластинчастих, так і для стрічкових датчиків WIM.



Рис. 1.8 - Різні технології, що використовуються в WIM-системах [25]

1. Дорожні датчики:

Дорожні датчики - це один з видів вагових датчиків, що використовуються в системах зважування в русі (WIM). Ці датчики монтується в дорожнє покриття і можуть включати ваги, пластини, смуги або бруски [3]. Правильне встановлення дорожніх датчиків має вирішальне значення для забезпечення точного вимірювання ваги.

Типи дорожніх WIM:

1. Пластини



Рис. 1.9 – WIM система на основі плит

2. Смоуги

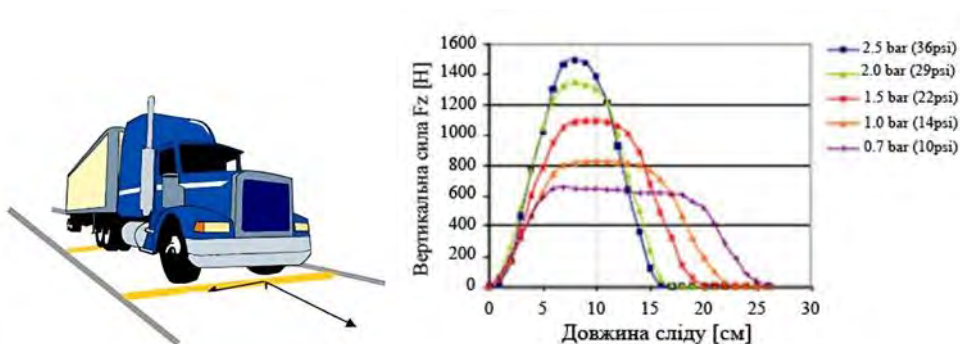


Рис. 1.10 та 1.11 – WIM система на основі смуг

Особливості встановлення, на які слід звернути увагу:

- Розташування: Дорожні датчики повинні бути встановлені на потрібній ділянці дороги в такому місці, яке б мінімізувало похибки зважування через несприятливі характеристики місцевості [4]. Місце розташування слід обирати на основі таких факторів, як: швидкість руху, інтенсивність, шорсткість дорожнього покриття, фізичні характеристики ділянки [5].
- Тип покриття: Повинен забезпечувати достатню структурну підтримку і не бути схильним до розтріскування або деформації під великими навантаженнями. Дорожнє покриття має бути гладким і рівним для забезпечення точного вимірювання ваги.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

- Розкопки: Для встановлення дорожніх датчиків необхідно розкопати дорожнє покриття. Розкопки слід проводити обережно, щоб не пошкодити покриття і забезпечити правильну глибину та кут встановлення датчиків [4].

- Тип датчика: Залежить від конкретного застосування та вимог до вимірювань. Для дорожніх WIM зазвичай використовуються тензорезистори або тензометричні датчики [3].

- Калібрування: Дорожні датчики слід регулярно калібрувати для забезпечення точних вимірювань ваги. Калібрування передбачає налаштування датчиків для врахування будь-яких змін у дорожньому покритті або характеристиках датчиків.

- Обслуговування: Дорожні датчики потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення належного функціонування. Обслуговування може включати очищення датчиків, перевірку на пошкодження та заміну будь-яких несправних компонентів [4].

Належне встановлення та обслуговування дорожніх датчиків має важливе значення для забезпечення точного вимірювання ваги в системах WIM. При встановленні дорожніх датчиків важливо враховувати такі фактори, як місце розташування, тип покриття, тип датчика, калібрування та технічне обслуговування.

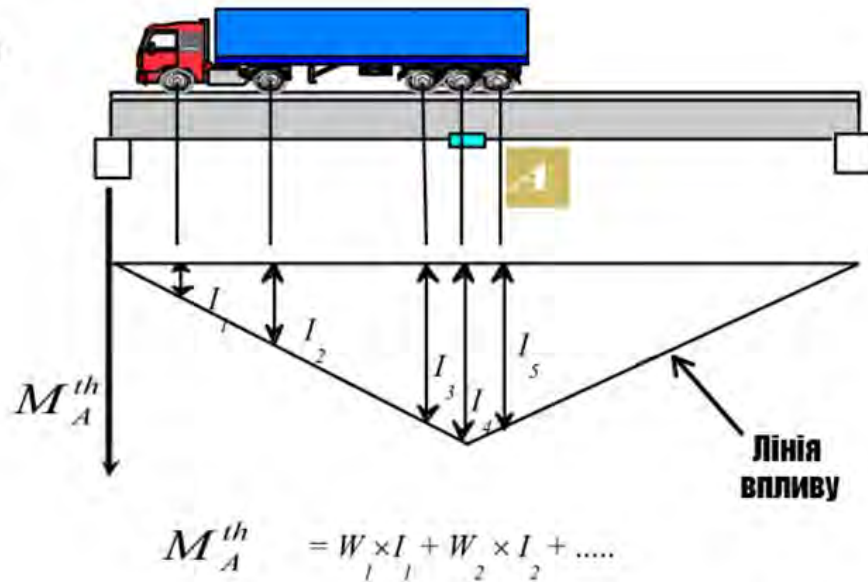
2. Мостові WIM (B-WIM):

Використовують датчики деформації або тензометричні датчики, встановлені на мосту для вимірювання ваги транспортних засобів, що проїжджають по ньому [3].

Встановлення B-WIM передбачає використання існуючого мосту або водопропускної труби для зважування транспортних засобів, що проїжджають над спорудою [6].

						Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Концепція В-WIM



1.12 – Концепція В-WIM системи [26]

Зазвичай використовують датчики деформації або тензометричні датчики для вимірювання ваги транспортних засобів.

Ось деякі ключові аспекти процесу встановлення:

- Датчики: Потрібно обрати відповідні тензорезистори або датчики деформації для конкретного типу моста і матеріалу.

- Встановлення датчиків: Встановлення тензодатчиків на критичних структурних компонентах мосту, таких як ортотропний настил біля пілону або інші несучі елементи [7].

- Додаткові датчики: Можуть бути додані додаткові датчики, такі як датчики температури, відхилення для компенсації коливань у реакції або камери для оглядових знімків та розпізнавання номерних знаків.

- Збір та передача даних: Такі засоби зв'язку, як модеми або стільникові модеми для передачі даних встановлюються на вимірювальній системі. У старих установках або там, де відсутня комунікаційна інфраструктура, системи В-WIM можуть працювати в автономному режимі, зберігаючи дані для подальшого фізичного збору.

- Калібрування та обслуговування: Регулярне калібрування та технічне обслуговування встановлених датчиків необхідні для забезпечення точних і надійних вимірювань протягом тривалого часу.

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Бортові WIM:

У цьому типі датчики встановлюються на самому транспортному засобі для вимірювання його ваги [3].

Встановлення бортової системи WIM передбачає вимірювання ваги транспортного засобу під час руху.



1.13 – Електронний термінал В-WIM системи [26]

Ось деякі ключові аспекти процесу встановлення:

- **Вибір датчика:** Датчики можуть включати тензOMETричні датчики, датчики навантаження, датчики тиску та акселерометри (залежить від транспортного засобу та застосування).

- **Встановлення датчиків:** Датчики потрібно встановити на критично-важливих несучих компонентах автомобіля, таких як осі або системи підвіски.

- **Додаткові датчики:** Залежно від застосування, до системи можуть бути додані та підключені різні додаткові датчики (швидкості, довжини та поперечного положення коліс).

- **Збір та передача даних:** На вимірювальній системі встановлюються засоби зв'язку, такі як модеми або стільникові модеми, для передачі даних. У старих установках або там, де відсутня інфраструктура зв'язку, бортові системи WIM можуть працювати самостійно, зберігаючи дані, які будуть оброблені та проаналізовані пізніше.

- Калібрування та обслуговування: Регулярне калібрування та технічне обслуговування встановлених датчиків необхідні для забезпечення точних і надійних вимірювань протягом тривалого часу.

Особливості встановлення бортових систем WIM залежать від конкретного типу та застосування [9].

1.3 СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ

1. Дорожні датчики

WIM використовують датчики, встановлені в дорожньому покритті, для вимірювання ваги транспортних засобів, що проїжджають над ними [3]. Ці системи мають різні сфери застосування та обмеження.

Сфери застосування:

- Моніторинг дорожнього руху: Дорожні WIM допомагають контролювати вагу транспортних засобів, не порушуючи транспортний потік, надаючи дані для управління рухом [10].

- Захист дорожнього покриття: Виявляючи транспортні засоби з надмірною вагою, системи WIM можуть допомогти захистити дорожню інфраструктуру від пошкоджень.

- Моніторинг безпеки та забруднення: Системи WIM сприяють підвищенню безпеки дорожнього руху та зменшенню забруднення шляхом виявлення транспортних засобів, які перевищують вагові обмеження.

- Контроль ваги: Дорожні системи WIM можуть бути використані для забезпечення дотримання вагових норм та моделювання попиту на вантажні перевезення.

Обмеження:

- Точність: Вимірювання ваги транспортного засобу в динамічному стані є складним завданням і такі фактори, як шорсткість дорожнього покриття, тип шин, тиск в шинах і характеристики підвіски можуть впливати на точність датчиків [11].

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Встановлення та обслуговування: Належне встановлення та обслуговування дорожніх датчиків WIM мають вирішальне значення для їх довговічності та надійності, що в деяких випадках може бути складним завданням.

- Вартість: Високоякісні WIM-системи мають високу вартість. Тому розробка і дослідження недорогих WIM-систем є актуальною задачею. Незважаючи на ці обмеження, дорожні системи WIM пропонують значні переваги в різних сферах застосування, і сучасні дослідження спрямовані на підвищення їх точності, довговічності та економічної ефективності.

2. Мостові WIM (B-WIM)

B-WIM використовують датчики, прикріплені до мосту, для вимірювання ваги транспортних засобів, що проїжджають через нього [3].

Сфери застосування:

- Оцінка мостів: Технологія надає якісну інформацію для економічно ефективної, екологічної та зручної для користувача оцінки мостів.

- Інформація про транспортне навантаження: Пропонує неруйнівні засоби збору даних про транспортне навантаження, використовуючи існуючі мостові конструкції [13].

- Контроль ваги: Можна використовувати для точного, надійного та ефективного контролю ваги.

Обмеження:

- Точність: Можуть впливати такі фактори, як варіації вихідного сигналу датчика, додаткові температурні похибки та відхилення вимірювальних напрямків від номінальних [3].

- Інсталяція та обслуговування: Правильне встановлення та обслуговування датчиків мають вирішальне значення для їх довговічності та надійності.

- Вартість: Високоякісні системи можуть бути дорогими.

						Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Бортові WIM

WIM використовують датчики, встановлені на самому транспортному засобі, для вимірювання його ваги.

Сфери застосування:

- Транспортна та логістична галузь: Бортові WIM-системи забезпечують точні та ефективні рішення для зважування, сприяючи підвищенню ефективності та точності в транспортній та логістичній галузях [8].

Обмеження:

- Точність: На точність бортових систем WIM можуть впливати такі фактори, як шорсткість дорожнього покриття, тип шин, тиск у шинах та характеристики підвіски.

- Встановлення та обслуговування: Правильне встановлення та обслуговування бортових WIM-датчиків має вирішальне значення для їх довговічності та надійності, що в деяких випадках може бути складним завданням [14].

- Вартість: Високоякісні бортові WIM можуть бути дорогими, і розробка недорогих бортових WIM-систем – це актуальна задача [11].

1.4 ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ WIM-СИСТЕМ

1. Дорожні датчики

Переваги:

- Не залежать від погоди або стану дорожнього покриття: На роботу систем WIM на основі дорожнього покриття не впливають погодні умови або стан дорожнього покриття.

- Встановлення та обслуговування є досить доступним.

- Може визначати вагу широкого спектру транспортних засобів.

Недоліки:

- Може залежати від швидкості автомобіля.

- Може залежати від відстані між осями транспортного засобу.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Мостові WIM (B-WIM)

Переваги:

- Надають дані по кожному транспортному засобу, як і системи WIM для дорожнього покриття, а також додаткові дані для структурного аналізу мостів [15].
- Місця зважування невидимі для водіїв, що запобігає ухиленню перевантажених транспортних засобів від контролю.
- Портативність дозволяє легко переміщатися без шкоди для точності.

Недоліки:

- Обмежено місцями з відповідними мостами.

3. Бортові WIM

Переваги:

- Може вимірювати навантаження на окреме колесо, вісь або групу осей [16].
- Встановлюються на транспортні засоби, дозволяючи передавати дані про вагу у будь-який час з транспортного засобу, що рухається.

Недоліки:

- На точність можуть впливати такі фактори, як шорсткість дорожнього покриття, тип шин, тиск у шинах та характеристики підвіски.

1.5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ

1. Дорожні датчики

Дорожні датчики є важливим компонентом систем WIM, а їх ефективність і точність мають вирішальне значення для надійних вимірювань. Точність, у першу чергу, залежить від датчиків і підвищення їхньої точності та терміну служби було широко досліджено.

Однак, такі фактори, як шорсткість дорожнього покриття, тип шин, тиск в шинах і характеристики підвіски можуть впливати на точність дорожніх датчиків WIM.

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Різні типи дорожніх датчиків, такі як лінійні кварцові датчики та п'єзоелектричні кабелі, були протестовані на точність, термін служби, калібрування та зручність використання. Результати показують, що лінійні кварцові датчики працюють краще, ніж п'єзоелектричні кабелі, але процедури калібрування можуть бути трудомісткими і дорогими. Термін служби датчиків може бути збільшений за рахунок більш глибокого встановлення, де це можливо [17].

Незважаючи на ці виклики, постійні дослідження та розробки спрямовані на підвищення ефективності та точності дорожніх датчиків WIM для різних застосувань.

2. Мостові WIM (B-WIM)

Системи B-WIM використовують інструментальні мости для зважування транспортних засобів, що проїжджають через міст. Сучасні B-WIM надають ідентичні дані по кожному транспортному засобу, як і системи WIM для дорожнього покриття, а також вимірюють деформації, лінії впливу, коефіцієнти розподілу навантаження та динамічне посилення навантаження, що покращує структурний аналіз мостів [15]. Системи B-WIM використовуються в більш ніж 20 країнах, в основному для короткострокових вимірювань тривалістю до одного місяця [18].

Точність систем B-WIM була протестована та покращена з часом. Наприклад, дослідницький проект під назвою BridgeMon мав на меті розширити використання B-WIM до довгострокових вимірювань і підвищити точність результатів [18]. В одному тематичному дослідженні було оцінено точність системи B-WIM, встановленої на автомобільному мосту на заході Франції, і результати показали, що точність системи відповідає європейським специфікаціям WIM. Однак важливо зазначити, що на точність систем B-WIM можуть впливати такі фактори, як тип мосту, розміщення датчиків та процедури калібрування [19]. Загалом, системи B-WIM пропонують надійний і точний метод вимірювання ваги транспортного засобу, а постійні

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дослідження та розробки спрямовані на подальше покращення їхніх характеристик.

3. Бортові WIM

Системи бортового зважування OBW, також відомі як бортові WIM, встановлюються на транспортних засобах, а не на інфраструктурі, що дозволяє передавати дані про вагу в будь-який час з транспортного засобу, що рухається. Датчики систем OBW можуть бути встановлені для вимірювання навантаження на окремі колеса, осі або групи осей і можуть базуватися на різних принципах вимірювання [16]

Ці системи контролюють значення ваги безперервно з певною частотою дискретизації, подібно до систем In-Road WIM. Точність бортових систем WIM залежить від датчиків, які застосовуються і процедур калібрування [11, 20].

1.6 ОПИС АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ АВТОМОБІЛІВ В РУСІ

1.6.1 СИСТЕМА KITRAFFIC DIGITAL WIM

Система KiTraffic Digital WIM побудована на перевірених технологіях кварцових датчиків і може бути використана для широкого спектру застосувань, включаючи контроль за дотриманням правил дорожнього руху, моніторинг дорожнього руху та управління активами.

Система складається з набору датчиків, вмонтованих у дорожнє покриття. Кожен кварцовий п'єзодатчик має довжину 1,5 або 2 метри, і їх можна комбінувати різної довжини, щоб забезпечити покриття на півсмуги або на всю ширину смуги.

Кварцовий п'єзодатчик WIM має ширину близько 2 дюймів і товщину 2 дюйми, а його вага становить від 12 до 20 фунтів залежно від довжини [21]. Датчики відстежують силу та деформацію дорожнього покриття,

						Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коли по ньому проїжджають автомобілі, і ці дані використовуються для визначення ваги та швидкості транспортного засобу.

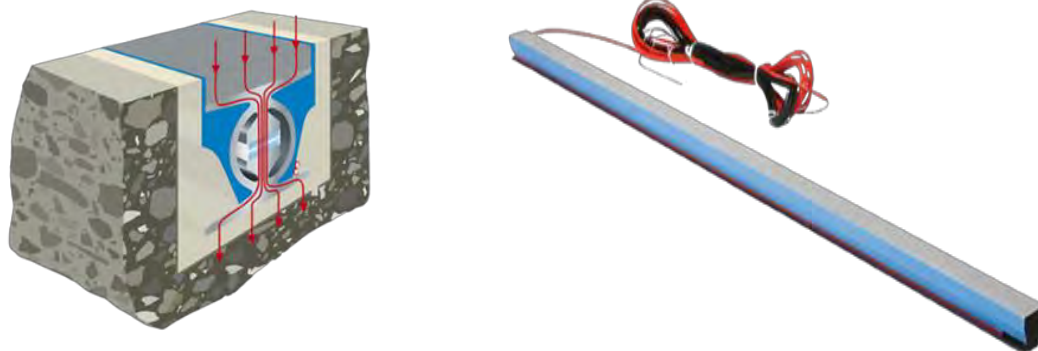


Рис. 1.14 - Кварцовий п'єзодатчик та конструкція його вбудови [21]

Кварцовий п'єзоелектричний датчик WIM - це датчик сили на основі кристалів кварцу.

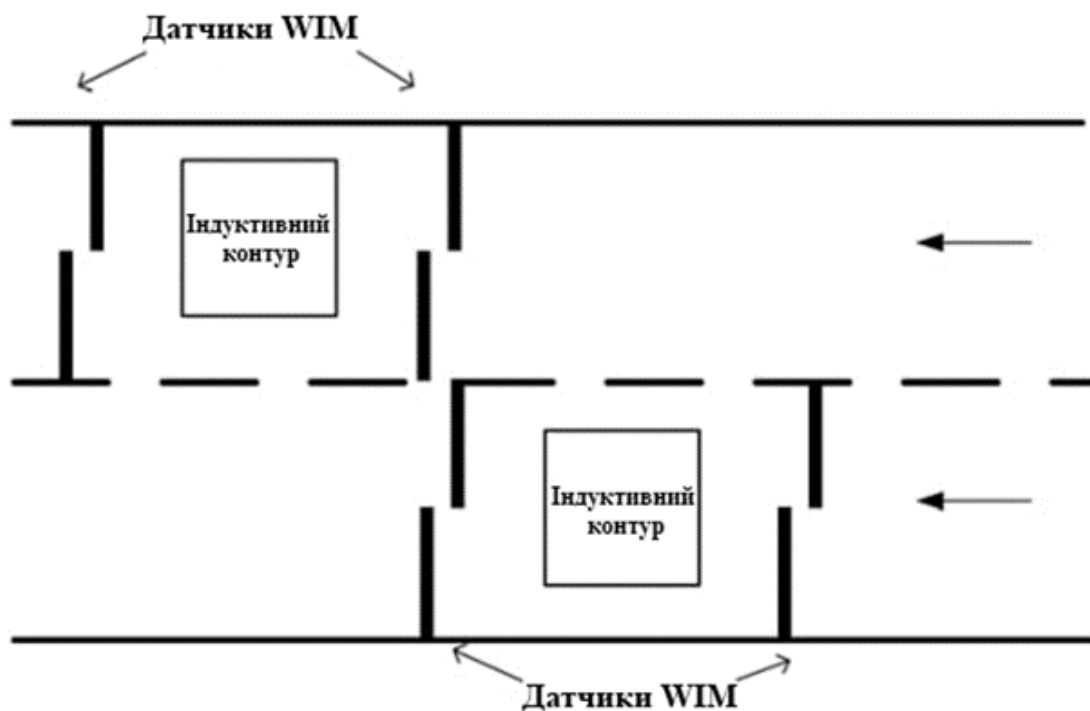


Рис. 1.15 - Кварцові п'єзодатчики з подвійним порогом спрацьовування в шаховому порядку [21]

Вертикальні сили, що виникають під час руху колеса по датчику, передаються на кристали кварцу у датчику. Кварцові елементи генерують електричний заряд, пропорційний прикладеним вертикальним силам.

Переваги:

- Кварцові п'єзоелектричні датчики WIM можна вбудовувати в асфальтне покриття (товщиною понад 100 мм) або в асфальтобетонне покриття. Асфальтобетонне покриття є набагато більш міцним тому реалізується більш надійна вимірювальна система .

- Зазвичай безпосередньо датчики не потребують жодного обслуговування.

- У разі утворення колійності верхню частину датчика можна відшліфувати, щоб пристосуватися до поверхні покриття, що збереже точність вимірювання.

- У порівнянні з полімерними датчиками, кварцовий матеріал датчика має унікальну перевагу - він набагато менш чутливий до температурних коливань, але при цьому коштує дорожче, ніж інші п'єзоелектричні датчики.

- Кварцовий п'єзоелектричний датчик, на противагу датчикам на основі тензорезисторів або згинаючих пластин, не потребує значного технічного обслуговування, але його необхідно калібрувати кожні 12-18 місяців, щоб відповідати вимогам стандартів точності систем WIM.

Недоліки:

- Оскільки датчик покладається на структурну опору дорожнього покриття, якщо на міцність дорожнього покриття суттєво впливають умови навколишнього середовища (розм'якшення матеріалу через високі температури, високий вміст вологи в ґрунті), це може вплинути і на вихідні дані датчика, навіть якщо сам матеріал датчика не піддається впливу температури.

- Вузкопрофільні датчики мають меншу точність, ніж ширші згинальні пластини або тензодатчики, через невизначеності, спричинені вимірюванням лише частини відбитка шини в кожний момент часу, які мають випадковий характер.

						Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Як і в будь-якій дорожній WIM-системі, нерівності дороги, які спричиняють небажану динаміку транспортного засобу, відіграють вирішальну роль у якості одержаної інформації.

Основні можливості системи:

- Швидкість: технологія може вимірювати швидкість транспортного засобу до 120 км/год.

- Вага: Пристрій може визначати вагу вантажівок вагою до 40 т.

- Розмір шин: Обладнання може вимірювати шини діаметром до 20 дюймів.

- Ширина смуги: система підходить для смуг шириною до 4 метрів.

1.6.2 СИСТЕМА SIWIM

Система SiWIM компанії Cestel вимірює прогин мостового полотна за допомогою тензометричних датчиків, розташованих на нижній стороні моста. Прогин потім використовується для обчислення ваги транспортного засобу. Технологія повністю портативна і може бути реалізована за один день без необхідності перекриття дороги. SiWIM зважує автомобілі та збирає дані для інспекцій мостів на існуючих мостах [22].



Рис. 1.16 - Встановлення В-WIM [21]

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Система забезпечує:

- збір даних про вагу автомобілів, що проїжджають мостами.

Ця інформація може бути використана для виявлення автомобілів з надмірною вагою, а також для розробки планів управління дорожнім рухом і захисту мостів.

- дотримання вагових обмежень на мостах.

Технологія SiWIM може бути використана для виявлення вантажівок з надмірною вагою та штрафування порушників.

- збір даних про відстань між осями та вагу транспортних засобів.

Ця інформація може бути використана для побудови стратегій покращення транспортного потоку та зменшення заторів.

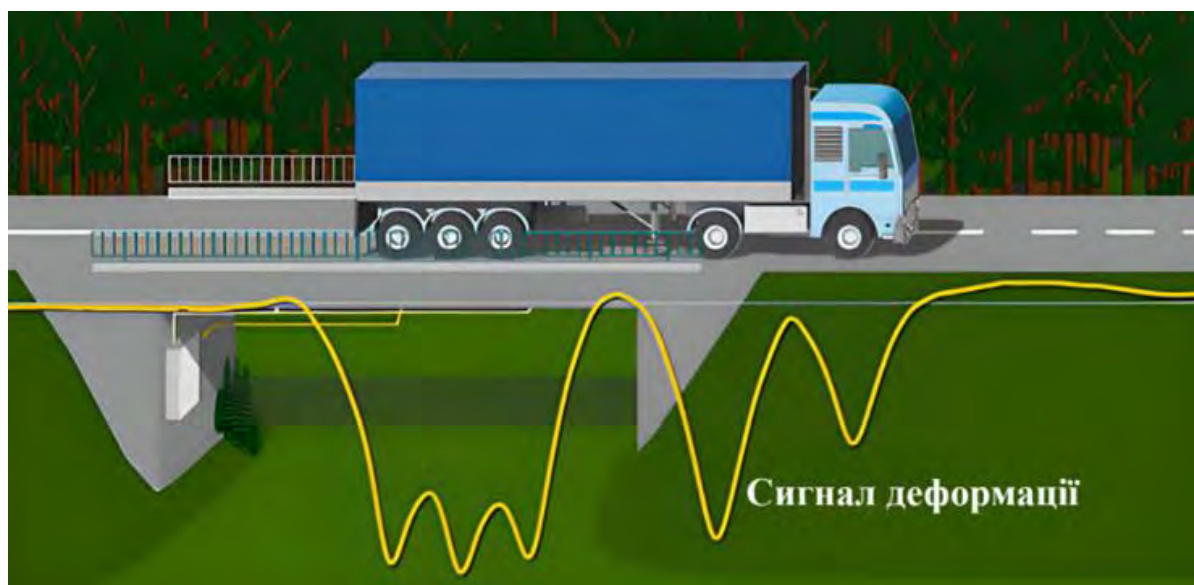


Рис. 1.17 – Характер деформації, яка реєструється WIM [23]

Технологія SiWIM має точність +/- 5% для повної маси і +/- 2% для навантаження на вісь [23]. Система також є надійною та довговічною, її створено для роботи в екстремальних погодних умовах, що переважають на мостах. Технологія SiWIM також адаптується і може бути пристосована до індивідуальних вимог кожного транспортного агентства.

Основні можливості системи:

- зважувати транспортні засоби вагою до 100 тонн.
- вимірювати навантаження на вісь і повну масу.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



Рис. 1.18 - Встановлення В-WIM [15]

Переваги:

- Система SiWIM повністю портативна і може бути встановлена за один день без перекриття доріг. Це робить її економічно вигідним рішенням для транспортних організацій, які потребують тимчасового зважування автомобілів, наприклад, під час перевірки мостів або операції з контролю за вагою.

- Система SiWIM розроблена таким чином, щоб витримувати суворі кліматичні умови, притаманні мостам, такі як мінусові температури, дощ та сніг.

- Оскільки датчики SiWIM розташовані під мостом, вони не становлять загрози для водіїв.

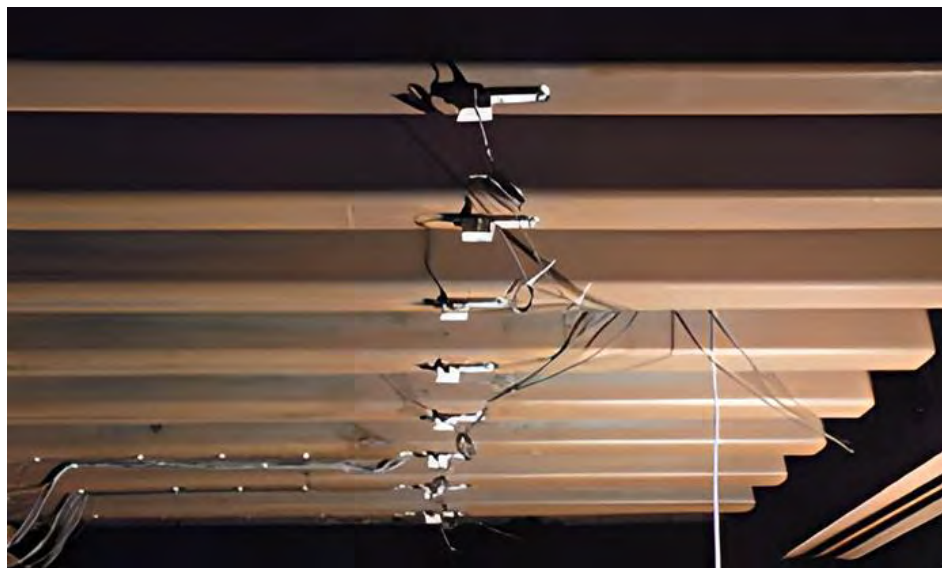


Рис. 1.19 - Встановлення В-WIM [15]

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки:

- Коли систему SiWIM переміщують на нове місце, її необхідно перекалібрувати, щоб відобразити реакцію моста на зміну навантаження, що робить ці системи унікальними для кожного місця.

- Кілька змінних факторів послаблюють сигнал тензодатчика і знижують точність даних, отриманих від цих пристроїв:

- присутність іншого транспорту на мосту під час зважування вантажівки (що значно збільшує шум у ваговому сигналі) та відсутність задокументованої інформації у дорожніх службах про очікувану реакцію конструкції мосту на різні умови навантаження обмежують точність оцінки навантаження на основі даних з датчиків SiWIM є найбільш значущими з цих факторів.

- тип конструкцій та умови руху обмежують застосування SiWIM. Вони краще працюють на крихітних однопрогонових мостах з добре задокументованими структурними реакціями. Вони підходять для мостів з низькою інтенсивністю руху (бажано, щоб під час вимірювання мостом проїжджала лише одна вантажівка).

- Залежно від топографії під мостом і висоти мосту, встановлення датчиків SiWIM може вимагати особливих міркувань безпеки.

- Регулярне технічне обслуговування може бути необхідним, щоб гарантувати точність і надійність системи.



Рис. 1.20 - Встановлення датчика В-WIM [22]

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.6.3 БОРТОВА СИСТЕМА ЗВАЖУВАННЯ ON-BOARD WIM ВІД TRANSCORE (БОРТОВІ WIM)

Датчики для бортових систем зважування можуть бути встановлені для моніторингу навантаження на окремі колісні диски, осі або групи осей і можуть ґрунтуватися на різних концепціях вимірювання.

З сучасних конструкцій можна виділити два типи бортових систем зважування:

1. Статичне бортове зважування [16].



Рис. 1.21 - Статичне бортове зважування [16]

Протягом багатьох років у транспортному секторі використовуються статичні бортові системи зважування. Вони зважують автомобіль, коли він стоїть нерухомо, наприклад, на парковках, у зонах відпочинку або на червоному світлі світлофора. Їхнє основне призначення - оптимізувати управління автопарком і маршрутизацію вантажівок з урахуванням обмежень щодо вантажопідйомності та навантаження.

Найнадійнішою системою на даний момент є статичне бортове зважування. Точність зчитування статичних даних, отриманих за допомогою систем OBW, повинна становити 2% в межах 95% зчитувань, або 500 кг. Для перевірки точності цих вимірювань бортові вагові пристрої регулярно (не рідше двох разів на рік) калібруються на вагових станціях, про що видається сертифікат калібрування.

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Динамічне бортове зважування.

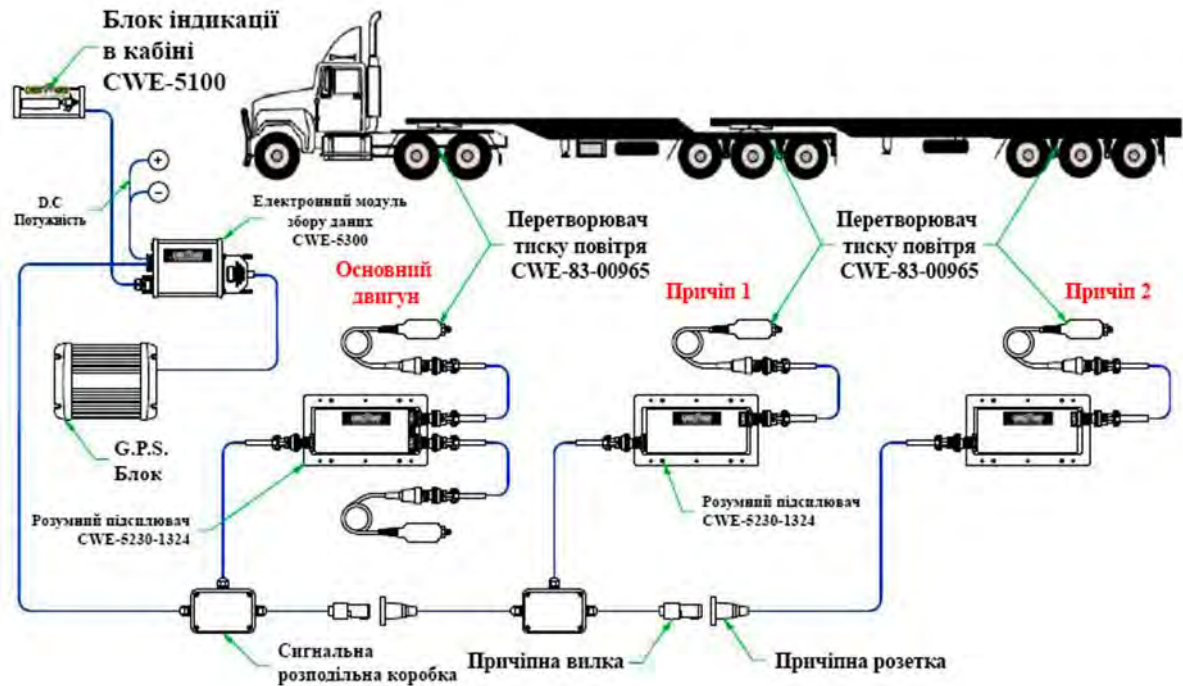


Рис. 1.22 - Динамічне бортове зважування [16]

Значення ваги в динамічній бортовій системі зважування постійно контролюються з певною частотою вибірки. Як і у випадку з In-Road WIM, для оцінки "реальних" статичних значень ваги використовуються складні алгоритми. Для побудови динамічної системи можна використовувати будь-який тип датчиків, наприклад, тензодатчики, тензорезистори, повітряні або гідравлічні датчики тиску, але також можна використовувати додаткові датчики, такі як акселерометри і датчики переміщення.

Залежно від технології датчика, похибка вимірювання становить 1-3%.

Переваги:

- Підвищення ефективності: Бортові системи WIM можуть допомогти мінімізувати час і витрати на зважування транспортних засобів.
- Покращене дотримання правил: Бортові системи WIM можуть допомогти в забезпеченні того, щоб транспортні засоби не були перевантажені, а отже, запобігти пошкодженню мостів та іншим проблемам безпеки.
- Підвищення безпеки водія: бортові системи WIM можуть допомогти підвищити безпеку водія, надаючи дані про вагу в режимі реального часу, які

					Арк.
					35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

можуть бути використані для уникнення перевантаження та інших небезпечних впливів на безпеку руху.

Недоліки:

- Вартість: Система є дорогою як у купівлі, так і в експлуатації.
- Обслуговування: Щоб гарантувати оптимальну роботу системи, її необхідно регулярно обслуговувати.
- Точність: На точність системи можуть впливати різні фактори, в першу чергу швидкість транспортного засобу та дорожнє покриття.

Основні характеристики системи:

- Ціна: Вартість On-Board систем починається від \$25 000.
- Швидкість: система може вимірювати швидкість транспортного засобу до 100 км/год.
- Вага: Система може вимірювати масу автомобіля до 100 000 кг.
- Інші фактори: На точність системи може впливати низка факторів, включаючи швидкість транспортного засобу, дорожнє покриття та вагу транспортного засобу.

1.7. ОСНОВНІ ТЕХНІКО-МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ

Основні технічні та метрологічні характеристики включають деформаційну чутливість перетворення в відносну зміну опору, повзучість матеріалу, гістерезис, нестабільність температури та динамічну поведінку.

Чутливість тензодатчика визначається податливістю конструкції пружного чутливого елемента, але певною мірою на неї впливають конструкція, матеріал, тип і певні умови полімеризації клею самого перетворювача та інші менш важливі фактори.

Тензочутливість тензорезисторів визначається за допомогою коефіцієнта відносної тензочутливості:

$$K = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} \quad (1.1)$$

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\Delta\varepsilon_k$ – відносна зміна опору тензорезистора;

де $\Delta\varepsilon_l$ – відносна механічна деформація тензорезистора.

Повзучість виникає, коли вихідний сигнал змінюється при заданому постійному значенні деформації, яке визначається як:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Delta\varepsilon_l}{\varepsilon_l} \quad (1.2)$$

де $\Delta\varepsilon_l$ – зміна вихідного сигналу при відносній деформації ε_l , заданій параметром. Ознакою повзучості є пружна нестійкість підкладки тензорезистора і клею. У певному діапазоні деформації повзучість основної частини тензора не перевищує 0,1...1,1% протягом 1 години після нанесення клею, або не перевищує 1,1...1,6% протягом 6 годин.

Механічний гістерезис та повзучість, виникає внаслідок деякого пружного дефекту підкладки та клею, і визначається параметрично як різниця опорів тензорезисторів для певного значення деформації, за умови, що ці показання деформації зроблені при її плавному зростанні та неухильному зниженні. Для деяких типів тензодатчиків механічний гістерезис знаходиться в межах 0,6...5,2%.

Температурна нестабільність або зміна температури навколишнього середовища до основного значення тензора опору виникає, коли змінюється значення опору тензорезистора або виникає надмірна механічна напруга через температурне лінійне розширення.

Якщо β_d і β_{Π} – відповідно температурні коефіцієнти лінійного розширення тензорезистора і матеріалу чутливого пружного елемента, то відносна деформація тензорезистора внаслідок зміни температури навколишнього середовища на $\Delta\theta$ створить інформативний сигнал

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{\Delta l_{\theta}}{l} = (\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (1.3)$$

при цьому зміна його опору R буде визначатись за формулою

$$\Delta R = kR(\beta_d - \beta_{\Pi})\Delta\theta \quad (1.4)$$

					Арк.
					37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Якщо температурний коефіцієнт матеріалу тензорезистора α (K^{-1}) то зміна значення R опору тензорезистора дорівнює $\Delta R_\alpha = R \cdot \alpha \cdot \Delta\theta$, загальна зміна викликана зміною температури навколишнього середовища на $\Delta\theta$ (K),

$$\Delta R_\theta = R_{\alpha\theta} + kR(\beta_d - \beta_n)\Delta\theta = R[\alpha + k(\beta_d - \beta_n)]\Delta\theta \quad (1.5)$$

Основною динамічною характеристикою тензорезисторів є їх частота власних коливань. Характерні значення для наклеєних тензорезисторів знаходяться в діапазоні 110...310 кГц.

Власна частота тензорезистора впливає на граничну частоту вимірювання досліджуваного процесу, при якій відносною похибкою зміни коефіцієнта тензочутливості можна знехтувати. Для вимірювання змінних деформацій зазвичай вибирають тензорезистивні перетворювачі, власна частота яких у 7-11 разів перевищує частоту деформації.

Важливим параметром тензорезистора є допустима потужність K , яка за певних умов може розсіюватися в тензорезисторі, щоб підвищення температури резистора не перевищувало допустимого значення. Гранична потужність тензорезистора залежить від його власної геометрії, яку можна використовувати як при визначенні K існуючого тензорного резистора, так і при визначенні геометрії розробленого перетворювача, виходячи з заданої допустимої потужності або шляхом вимірювання допустимих параметрів

$$\Delta\theta = PR_T = \frac{P}{S_0\alpha_t} = \frac{P_{уд}}{\alpha_t} \quad (1.6)$$

де R_T - опір тепловий;

S_0 - площа поверхні матеріалу тепловідачі резистора;

α_t - коефіцієнт теплопередачі;

$P_{уд} = \frac{P}{S_0}$ - питома теплова навантаження.

Тепло від тензорезистора до випробовуваної деталі розсіюється через тонку лінію з'єднання та підкладку набагато більше, ніж передається навколишньому середовищу. Тому можна припустити, що майже все тепло, яке є, передається досліджуваній частині, для тонкоплівкових і фольгованих

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тензорних резисторів основною вважається половина поверхні резистора, звернена до досліджуваної частини.

Основна потужність використовуваних нині провідних фольгових тензорних резисторів не залежить від споживаної ними потужності та загальної площі, яку займають чутливі компоненти, тому вона змінюється в незначному діапазоні: $R_{pp}=27..29$ кВт/м².

Розрахуємо величину робочого струму, який проходить через тензорезистор за допомогою співвідношення $P=I^2R$. Для дротяного резистора натягу, радіус якого дорівнює 1, кількість провідників N і діаметр дроту d в сітці чутливого елемента

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} nl \quad R = \frac{4nl\rho}{\pi d^2} \quad (1.7)$$

Особливість приклеєних тензорезистивних перетворювачів є те, що вони є одноразовими перетворювачами, тобто їх неможливо переклеїти з одного об'єкта на інший. Тому функцію перетворення опору робочого тензорезистора визначити не вдається. Для її оцінки визначають функцію перетворення аналогічних так званих зразкових перетворювачів з однієї партії. Звичайно, цей метод оцінки характеристик робочого тензодатчика можна використовувати лише тоді, коли характеристики всієї партії датчиків абсолютно однакові, а залишкова деформація, викликана затвердінням клею при склеюванні ідентична. Досвід показує, що ретельне застосування тензодатчиків і високоякісного клею зазвичай не допускає неузгодженості більше 1,5%. [3]

Слід зазначити, що для склеювання тензодатчиків з досліджуваними деталями для роботи при нормальних температурах використовуються спеціальні клеї - ацетатцелюлозний і бакелітово-фенольний (БФ) клеї для роботи при високих температурах (до 600800). ° С) - силіконові клеї (наприклад, Б-56, ВН-12) і спеціальні клеї на основі рідкого скла або полісилоксану.

Чутливість до деформації готового датчика деформації практично неможливо точно розрахувати, оскільки вона може сильно відрізнятись

						Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від чутливості первинного матеріалу. Впливаючим фактором на процесу повторюємості характеристик являється вигин у кутку дроту, особливо для кільцевих перетворювачів. У цих місцях утворюються ділянки, де не відчувається деформація в напрямку осі вимірювання [3].

Зниження чутливості, викликане цим фактором, тим більше, і чим менше приведена база, тим чутливість може бути знижена на 20...30%.

Наявність секцій дроту, перпендикулярних до напрямку вісі перетворення перетворювача призводить до того, що ефект бокової деформації матиме значний вплив на кінцеву чутливість, де поперечний переріз провідного шару на вигинах може деформуватися. Цей недолік фактично повністю відсутній у фольговому тензорезисторі [3].

1.8 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ

Основною схемою вимірювання в тензодатчиках є мостова схема. Розрізняють три типи мостових схем. Основна відмінність полягає в тому, що кількість плечей мостової схеми поза приладом різна. Найбільш простою і зручною схемою підключення тензорних резисторів є мостова схема лише з одним активним плечем, решта плечей виконані у вигляді стабілізуючих резисторів, розміщених у проміжних перетворювачах або пристроях. З появою та постійним удосконаленням тензорезисторів, що компенсують самонагрівання, використання цього рішення стало зручним. В даний час популярним використанням, особливо при вимірюванні деформації при постійних статичних і квазістатичних процесах, є напівмостова схема, в якій основний вимірювальний резистор використовується як активний резистор, а другий резистор підключений до сусіднього плеча моста. Для швидкої температурної компенсації; інша частина плеча виконана у вигляді стабілізуючого резистора, розміщеного в проміжному перетворювачі або пристрої. Найбільш поширеною є схема з повним мостом, де всі чотири плечі розташовані ззовні пристрою. Ця схема забезпечує найвищі метрологічні характеристики засобів вимірювання. Повна мостова схема самокомпенсує

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цілий ряд похибок- температурних, від впливу з'єднувальних провідників, нелінійності.

На рис. 1.23 представлена схема з'єднання тензопезисторів в повномостові тензорезисторні перетворювачі та об'єднання перетворювачів в ваговимірювальну систему.

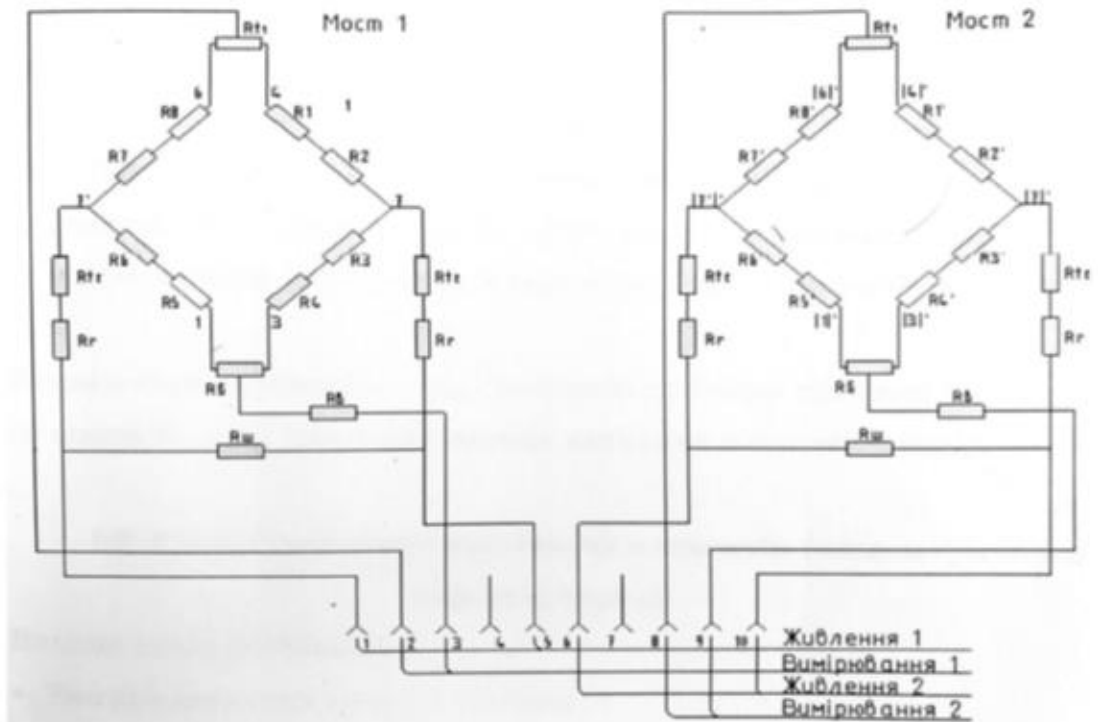


Рис.1.23 Принципова схема тензометричного перетворювача

Вимірювальна система використовує два незалежних повномостових датчика з двома повністю активними резисторами та одним повністю компенсованим резистором у суміжних плечах. Перевагою цієї схеми є те, що вона вимірює лише зміну опору тензорезисторів 1-8, а не їх загальний опір. Однією з переваг цієї мостової схеми є можливість зрівняти міст за рахунок лінійного включення двох тензорних резисторів і допоміжного коригувального резистора R_b в інших двох суміжних плечах.

Для плавної компенсації температурної зміни тензочутливості тензодатчика, що призводить до редагування чутливості датчика сили, термочутливий резистор R_{t2} включається в діагональ, включаючи міст ланцюга живлення резистор R_r .

Встановлення терморезисторів R_{t1} і R_{t2} знижує температурну похибку фольгового тензодатчика сили до 0,1-0,5% на 10°C.

Підключення тензорезисторів до всіх плечей мосту зменшує похибку приблизно в 30 разів. А при включенні в схему терморезисторного моста температурна похибка зменшується ще в 10-20 разів.

Виходячи з цього, температурна похибка датчика сили з фольгованим тензорним резистором знаходиться в межах 0,01 - 0,05%.

На додаток до симетричних і термокомпенсаційних резисторів, мостова схема включає R_1 і R_2 для регулювання необхідних значень вхідного і вихідного опорів моста.

1.9 РОЗРАХУНОК ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Вихідні данні:

- Тип пружного елементу – осьовий;
- Діапазон вимірювальних навантажень – 180т

1.9.1 ВИБІР ТЕНЗОРЕЗИСТОРА

Для розробки перетворювача я вибрав фольгові тензорезистори, які загалом мають кращі технічні та метрологічні характеристики, ніж дротяні тензорезистори, і можуть мати топологію практично будь-якої форми та розміру. Основою тензодатчиків є плівка із синтетичної смоли або папір, просочений клеєм. Товщина основи тензодатчика становить 30-40 мкм, а товщина аркуша паперу - 80-100 мкм. Сітчасті елементи фольгованих тензорів мають прямокутний переріз, який має більш вигідне співвідношення периметра до площі поперечного перерізу, ніж тензорезистори з сітчастими елементами круглого перерізу. Через це фольгові резистори набагато краще розсіюють тепло, дозволяючи мати набагато вищі робочі струми та вихідні сигнали, ніж дротяні резистори того самого розміру. Фольгові тензорезистори набагато менш чутливі в поперечному напрямку, ніж дротяні тензорезистори. Це досягається збільшенням ширини поперечного перерізу тензорної сітки. Технології

						Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виробництва фольгованих тензорних резисторів засноване на використанні фотохімічних процесів і забезпечує виготовлення решіток будь-якої форми з основою 0,3 мм і більше. [3]

Відповідно до ТУ РМО-03 № 97-67 фольгові тензорезистори в якості тензочутливого матеріалу використовують константанову фольгу товщиною 4-6 мкм.

Найбільш поширені наступні типи фольгованих тензорних резисторів, які виробляються серійно:

- Одноелементні тензорезистори 2ФСПА, 2ФШШ, 1ФКСК, 2ФСТК, 3ФКСК, ФК-СА, ФК-СБ, ФС-ПВ, які мають прямокутної сітки;
- Розетки двоелементні 2ФСРВ, ФК-РА, що складаються з двох однотипних сіток під прямим кутом;
- Триелементний тензорний резистор, що складається з трьох однакових сіток під кутами 0° , 90° та 135° або 0° , $+120^\circ$ та -120° .

Для досліджуваного перетворювача я вибрав фольгований тензорезистор типу КФ5 виробництва київської корпорації «ВЕДА»:

- 1) номінальний опір датчика: $R=400$ Ом;
- 2) максимальний струм: 30 мА;
- 3) діапазон робочих температур: $t=$ мінус $40^\circ\text{C}..+40^\circ\text{C}$;
- 4) тензочутливий матеріал – константан;
- 5) товщина фольги – 5 мкм;
- 6) база тензорезистора $l=10$ мм;
- 7) матеріал підкладки – електротехнічний папір;
- 8) тип клею з'єднання -БФ-2;
- 9) діапазон вимірювання деформації: ± 3000 відносних одиниць деформації.

1.9.2 РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ РОЗТЯГУ-ЗТИСКУ

Статична характеристика перетворювача це функціональна залежність вихідного сигналу від вхідного при умові закінчення перехідних процесів.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Це рівняння характеризує рівноважний стан чутливого елемента, що дає можливість аналізувати точність системи в статичному режимі. Залежно від виду статичних характеристик можна виділити такі групи: лінійні або нелінійні.

Для тензодатчиків сили вхідним значенням є навантаження F , а вихідна напруга – $U_{\text{вих}}$.

Функція перетворення для датчика з чотирма тензорезисторами - два з яких наклеєні повздовжньо, а два поперечно до осі пружного елемента розтягу-стиску має наступний вигляд [28]

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} * \frac{K * K_T}{(K+1)^2} * 2(1 + \mu) * \frac{F}{E * S_{\text{пер}}} \quad (1.10)$$

Де K - коефіцієнт симетрії мостової;

K_T – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора;

E – модуль пружності матеріалу пружного елемента;

$S_{\text{пер}}$ – площа поперечного перерізу пружного елемента;

μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу пружного елемента.

Статична характеристика перетворювача наведена на рис. 1.24

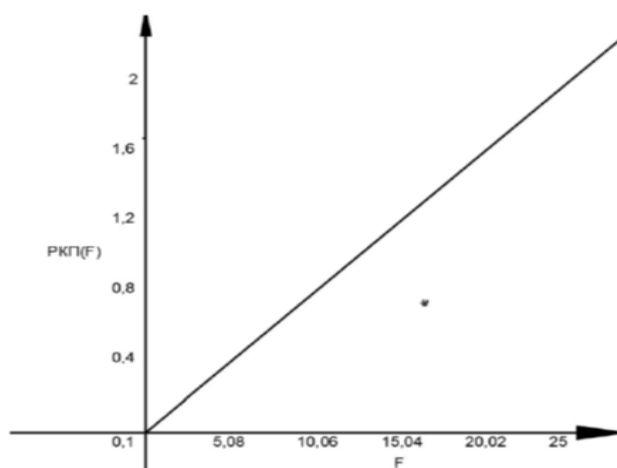


Рис. 1.24 Характеристика перетворювача статична

Враховуючи, що характеристики тензометричного статичного датчика мають лінійну характеристику, це можна записати так:

$$РКП=f(F) \quad (1.11)$$

					Арк.
					44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

1.9.2 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ РОЗТЯГУ СТИСКУ

Для аналізу пружного елемента в динамічному режимі використаємо принцип д'Аламбера та рівняння силової рівноваги [30] :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + cx = F(t) \quad (1.12)$$

де x – вихідний сигнал чутливого елемента -відносної деформації;

m – маса елемента чутливого;

b – коефіцієнт демпфування коливань;

c – жорсткість елемента чутливого;

F – прикладене навантаження;

$m \frac{d^2x}{dt^2}$ – сила інерції

$b \frac{dx}{dt}$ – сила демпфування

cx – сила пружності

Наведемо рівняння в операторному вигляді

$$mp^2x(p) + bpx(p) + cx(p) = F(p) \quad (1.13)$$

На основі даного рівняння визначаємо передаточну функцію

$$W(p) = \frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{mp^2+bp+c} \quad (1.14)$$

Комплексний коефіцієнт передачі отримаємо при підстановці

$$p=j \cdot \omega$$

$$W(j\omega) = \frac{1}{-m\omega^2+jb\omega+c} \quad (1.15)$$

де ω – власна частота недемпфованих коливань.

Модуль передаточної функції запишемо

$$|W(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(c-m\omega^2)^2+b^2\omega^2}} \quad (1.16)$$

Амплітудно-частотна характеристика визначається за формулою

$$A(\omega) = \frac{|W(\omega)|}{|W(0)|} = \frac{1}{\frac{1}{c}\sqrt{(c-m\omega^2)^2+b^2\omega^2}} \quad (1.17)$$

						Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведемо перетворення

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-\frac{m\omega^2}{c})^2 + \frac{b^2\omega^2}{c^2}}} \quad (1.18)$$

Необхідно врахувати, що

$$\frac{c}{m} = \omega_0^2$$
$$\frac{b}{m} = 2\zeta\omega_0 \quad (1.19)$$

де ω_0 – власна частота коливань пружного елемента.

ζ – коефіцієнт затухання коливань ($\zeta = 0,1$) [28]

Приведемо рівняння АЧХ

$$\frac{b^2\omega^2}{c^2} = \frac{4\zeta^2\omega_0^2m^2\omega^2}{c^2} = \frac{4\zeta^2\omega^2\omega_0^2}{\omega_0^4} = \frac{4\zeta^2\omega^2}{\omega_0^2} = 4\zeta^2y^2$$

Де Y – відношення частот

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1-y^2)^2 + 4\zeta^2y^2}} \quad (1.22)$$

На основі рівняння АЧХ отримали графік, що наведено на рис. 1.25

Розрахуємо частоту власних коливань [28]

$$\omega_0 = \frac{0.249}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.23)$$

де ρ густина матеріалу з якого виготовлено пружний елемент;

l – довжина пружного елемента

$$\omega_0 = \frac{0.249}{l} \sqrt{\frac{210 \cdot 10^9}{7850}} = 5366 \text{ (1/с)}$$

Для отримання частоти власних коливань у Гц, використаємо залежність $2 \cdot \pi \cdot f = \omega$ та побудуємо графічну залежність.

					Арк.
					46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

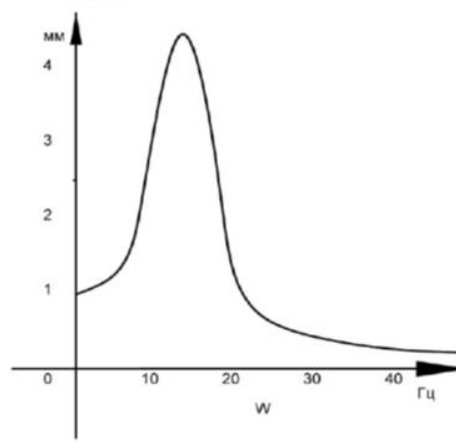


Рис. 1.25 АЧХ перетворювача

Розрахуємо фазову характеристику

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{b\omega}{c-m\omega^2} = -\arctg \frac{2\zeta\omega_0\omega}{\omega_0^2-\omega^2} \quad (1.25)$$

Графік фазо-частотної характеристики приведено на рис.1.26

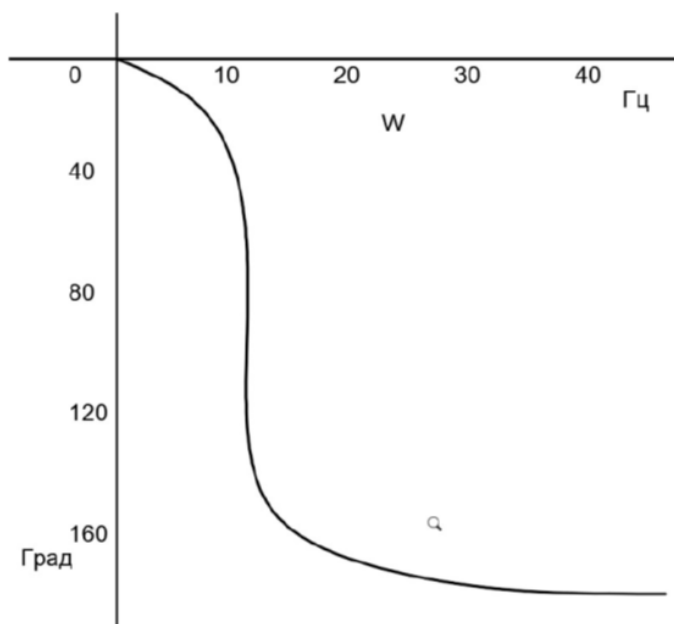


Рис. 1.26 ФЧХ перетворювача

Перехідну характеристику визначимо за формулою [30]

$$h(t) = 1 - e^{-2\pi\omega_0\zeta t} \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos(2\pi\omega_0\sqrt{1-\zeta^2}t + \arctg \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}) \quad (1.28)$$

Графік наведено на рис. 1.27

					Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	47

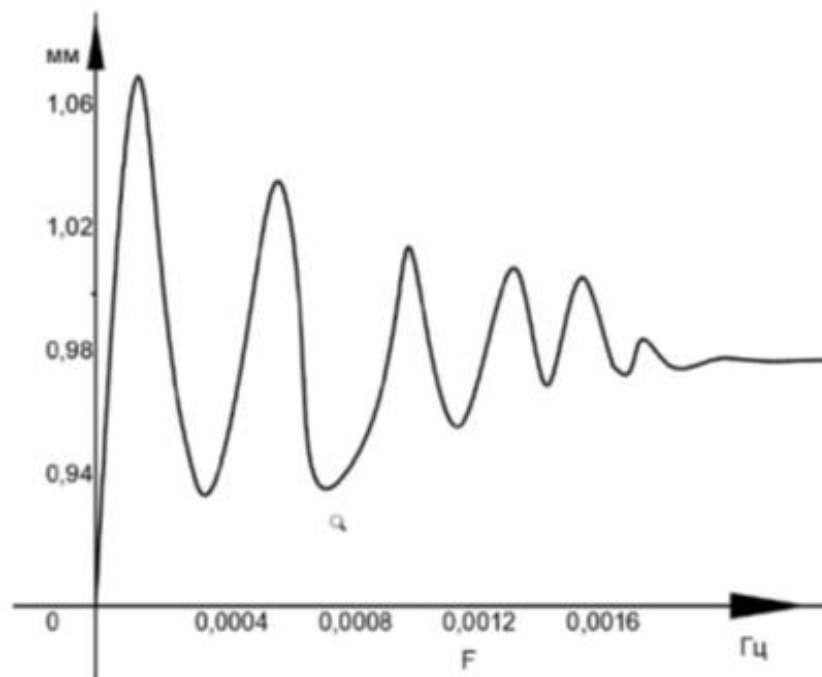


Рис. 1. 27 Перехідна характеристика перетворювача

1.9.3. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕНЗОДАТЧИКА З ПРУЖНИМ ЕЛЕМЕНТОМ ЗСУВНОГО ТИПУ

Розрахуємо геометричні розміри пружного елемента, обравши за матеріал сталь 35ХГСА. Розрахунок чутливості перетворювача в статичному режимі виконаємо за формулою [28]:

$$РКП = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{K \cdot K_T}{(k+1)^2} \cdot \frac{\frac{3}{2} Q}{E S_{пер} 2G} \quad (1.27)$$

де K - коефіцієнт симетрії мостової схеми;

K_T – коефіцієнт тензочутливості тензорезисторів датчика;

E – модуль пружності матеріалу пружного елемента;

$S_{пер}$ – площа поперечного перерізу датчика

$$S_{пер} = b \cdot h \quad (1.28)$$

Отримуємо

$$b = \frac{k}{(k+1)^2} 4K_T \frac{3}{2} \frac{1}{РКП} \frac{F}{4G} \quad (1.29)$$

					Арк.
					48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

Тоді як

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.30)$$

μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу пружного елемента.

Підставимо у формулу (1.29) маємо

$$b = \frac{k}{(k+1)^2} 4K_T \frac{3}{2} \frac{1}{\text{РКП}} \frac{F2(1+\mu)}{4E}$$

Обираємо такі значення

$K=1$; $K=2,1$; $\mu = 0,3\%$; $F=4$ МН; $Y=210$ ГПа; $\text{РКП}=2$ мВ/В; $h=0.15$ м.

На основі даних проведемо розрахунки

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left(\frac{1 \cdot 2.1}{(1+1)^2} \cdot 2(1+0.3) \cdot \frac{25 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \right) + 0.15^2} \approx 2,5 \text{ мм}$$

Провівши розрахунки будимо вважати що вигин всіх балок однаковий.

Статичний момент

$$S_{max} = \frac{2D}{3\pi} \frac{\pi D^2}{8} - \frac{2d}{3\pi} \frac{\pi d^2}{8} = \frac{D^3 - d^3}{12} = \frac{(64 \text{ мм})^3 - (52 \text{ мм})^3}{12} = 10128 \text{ мм}^3 \quad (1.31)$$

Поперечна сила

$$Q = \frac{P}{2} = \frac{5000 \text{ кг}}{2} = 2500 \text{ кг} \quad (1.32)$$

Ширину поперечного перерізу

$$b = D - d = 12 \text{ мм} \quad (1.33)$$

Момент інерції поперечного перерізу

$$J_y = \frac{\pi D^4}{64} - \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = \frac{3.14((64 \text{ мм})^4 - (52 \text{ мм})^4)}{64} = 709305,66 \text{ мм}^4 \quad (1.34)$$

Дотичне напруження

$$\tau = \frac{QS_{max}}{J_y b} = \frac{2500 \text{ кг} \cdot 10128 \text{ мм}^3}{709305,66 \text{ мм}^4} = 35,69 \text{ Па} \quad (1.35)$$

Модуль пружності при крученні

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{210 \cdot 10^9 \text{ Па}}{2(1+0,28)} = 85,03 \cdot 10^9 \text{ Па} \quad (1.36)$$

Деформація елемента чутливого

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{35,9 \text{ Па}}{82,03 \cdot 10^9 \text{ Па}} = 0,435 \cdot 10^{-9} \quad (1.37)$$

$$\varepsilon = \pm \frac{\gamma}{2} = \pm \frac{0,435 \cdot 10^{-9}}{2} = \pm 27 \cdot 10^{-6} \quad (1.38)$$

1.10 АНАЛІЗ КАТЕГОРІЇ ТОЧНОСТІ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

Аналіз категорії точності – це складний аналіз взаємодії набору похибок-систематичних, гістерезису, нелінійності, випадкових, зміни початкового та робочого коефіцієнтів перетворення під впливом кліматичних факторів, в першу чергу від температури.

Для оцінки категорії точності ваговимірювальних перетворювачів згідно норм OIML R60 просумуємо перші п'ять найбільших складових загальної основної похибки. Вважаємо що складові загальної похибки випадкові та некорельовані між собою, тому сумування виконаємо геометрично

$$\delta = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_{\Gamma}^2 + \gamma_{\text{н}}^2 + \alpha_{\text{к}}^2 + \beta_{\text{к}}^2} \quad (1.39)$$

де λ – стабільність коефіцієнтів перетворення (неповторюючість);

γ_{Γ} - гістерезис перетворення при навантаженні та розвантаженні;

$\gamma_{\text{н}}$ - нелінійність статичної характеристики;

$\beta_{\text{к}}$ - зміна НКП при зміні температури на 10° С;

$\alpha_{\text{к}}$ - зміна РКП при зміні температури на 10° С.

Значення похибок обирають відносно вказаних аналогів категорії точності С3-OIML R60. Результати розрахунків виконаних згідно виразу (1.39) в EXEL представлені в таб.1.

Розраховані похибки не перевищують заданих в завданні на проектування границь.

						Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1

Параметр	HBM, C16A	Vishay, Model 65088	Zemic, HM14K	Keli Sensing, ZCF
λ	0,0167	0,01	0,02	0,02
γ_{Γ}	0,017	0,015	0,016	0,03
γ_{H}	0,018	0,015	0,015	0,03
β_{K}	0,014	0,01	0,011	0,02
α_{K}	0,008	0,007	0,015	0,02
δ	0,034	0,026	0,035	0,055

									Арк.
									51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

ВИСНОВОК ДО ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКОГО РОЗДІЛУ

На основі проведеного аналізу аналогів WIM-систем можна зробити висновок, що заданому рівню точності визначення маси рухомого автотранспорту 1,0%, який дає право на застосування штрафних санкцій, задовольняють системи платформного типу з конструктивно виділеними ваговимірювальними перетворювачами тензорезисторного типу.

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 ОЦІНКА КОНСТРУКЦІЇ НА ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ

Об'єктом технологічної частини є платформа для вимірювання ваги, яка є складовою частиною вагової системи.

Технологія конструкції - властивість, яка дозволяє виготовляти конструкцію найбільш раціональними і простими способами. Враховуючи характеристики продукту, технологію проектування обладнання та його компонентів слід розглядати відповідно до масштабу виробництва продукту та рівня серійного виробництва в умовах єдиного виробництва.

Конструкція буде технологічною, якщо вона має найкоротший виробничий цикл і найменшу трудомісткість, а також якщо вона має найбільшу можливість уніфікації і стандартизації складальних одиниць і деталей, автоматизації процесу складання з мінімумом матеріалів і обладнання.

Для всіх виробів при виконанні проектування на технологічність ставляться такі завдання:

- 1) використання стандартних деталей;
- 2) використовувати однорідні компоненти;
- 3) використовуйте уніфіковані деталі;
- 4) можливість застосування типового процесу.

Для зручності і наочності розрахунків наведемо таблиці з переліками і кількістю однорідних і неоднорідних деталей, складальних одиниць або вузлів.

Таблиця 2.1 – Перелік вузлів приладу

№	Найменування	Кількість
1	СК1	2

Таблиця 2.2 Не уніфіковані деталі

№	Найменування	Кількість
1	Пружина	2
2	Основа	2
3	Балка	1

4	Прокладка	2
5	Кришка	8

Таблиця 2.3 Уніфіковані деталі

№	Найменування	Кількість
1	Болт затиску	4
2	Болт уступу	4
3	Клемник	4
4	Гайка	4
5	Шайба уступу	4
6	Шайба пружина	8
7	Гермовідвід	2
8	Підкладка	2
9	Тензоризистор	8
10	АЦП	2

Показники оцінки технологічності:

1. Уніфіковані показники для конструкції виробу:

$$K_y = \frac{N_y + n_y}{N + n}$$

де N_y, n_y — кількість складових одиниць і деталей у конструкції;

N, n — число всіх складальних одиниць у виробі та всіх деталей в ньому.

$$K_y = \frac{42 + 0}{42 + 17} = 0.61$$

За уніфікованим показником ця складова одиниця є технологічною.

2. Індекс складності конструкції виробу:

$$K_{сб} = \frac{N}{n}$$

де N — кількість складальних одиниць у виробі;

					Арк.
					54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

n – число всіх деталей у виробі

$$K_{сб} = \frac{32}{58} = 0,54$$

Чим більше значення коефіцієнта $K_{сб}$, тим вища технологічність виробу.
Чим більше значення коефіцієнта, тим простіше складання і легше контролювати якість процесу складання.

Із загальних умов технологічності можна провести порівняльний аналіз:

Якщо $K_{сб} < 0,2$ - низька;

$K_{сб} = 0,2 \dots 0,4$ - задовільна;

$K_{сб} > 0,4$ - відмінна.

Завдяки показнику складності конструкції $K_{сб} > 0,4$ технологічність відмінна.

3. Застосувати уніфікований індекс процесу складання

$$K_{тп} = \frac{Q_{тп}}{Q_n}$$

$Q_{тп}$ – число типових технологічних операцій, уніфікованих в умовах випуску виробу даного профіля;

Q_n – число всіх необхідних операцій для складання заданого виробу.

$$K_{тп} = \frac{3}{4} = 0.75$$

Визначенні умови порівняльного аналізу:

$K_{тп} < 0,5$ – низька технологічність;

$K_{сб} = 0,5 \dots 0,75$ – задовільна технологічність;

$K_{сб} > 0,75$ – добра технологічність.

Показник уніфікації застосовуваних складальних процесів $K_{сб} > 0,75$ задовольняє технологічність.

2.2 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ

Проектування процесу складання вимагає вибору найбільш доцільного процесу і способу складання, визначення послідовності з'єднання деталей і

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складальних одиниць, налагодження і контролю вузлів, а також налагодження і контролю виробів за допомогою заданих пристроїв і інструментів.

Поділ пристрою на складальні одиниці призводить до скорочення виробничого циклу і його виготовлення за рахунок організації паралельного складання складальних одиниць.

Проектування процесу технічного складання включає наступні етапи:

- На основі вибору форми організації складання з урахуванням конструктивних особливостей і умов взаємозаміни виробу;
- Вибір способу складання ґрунтується на показнику взаємозамінності та використовуваній формі організації складання.

2.3 РОЗРАХУНОК ТОЧНОСТІ СКЛАДАЛЬНИХ РОБІТ

Розрахунок точності складання визначається фізичною взаємозамінністю приладу, тобто необхідне значення вихідного параметра в заданому діапазоні виходить у всій партії розроблених приладів. Вихідні фізичні параметри пристрою є похідними багатьох основних параметрів і властивостей, з якими він знаходиться у визначених функціональних залежностях. Тому фізичну взаємозамінність також називають функціональною взаємозамінністю.

Визначення похибки ширини пружних елементів, що використовуються в донних вагових пристроях.

Для цього типу датчика вихідна напруга визначається

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} \cdot \frac{k}{(k+1)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{жив}} \cdot \frac{k}{(k+1)^2} \cdot k_T \cdot 4 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{bh} \cdot \frac{F}{E}$$

Тоді отримуємо

$$b = \frac{k}{(k+1)^2} \cdot k_T \cdot 4 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{h \cdot \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}}} \cdot \frac{F}{E}$$

де k_T – коефіцієнт тензочутливості, $k_T=2,1 \pm 0,1$;

F – максимальне навантаження, $F=30000 \pm 600H$

h – вхідний опір датчика, $h=35 \pm 0,01$ мм

					Арк.
					56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

E – модуль пружності, $E=210\pm 10\cdot 10^9$

$$\frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}} - \text{РКП}, \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{жив}}} = 2,21 \pm 0,002 \frac{\text{МВ}}{\text{В}}$$

Якщо припустити, що ці величини розподілені нормально та $k=1$, звідси ми отримуємо похибку вихідної напруги

$$\delta_b = \sqrt{(1.6)^2 \cdot (0.01 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1^2 + (2.6)^2 \cdot (0.002 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1^2 + (2.7 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0.1^2} = 0.00027 \text{ м}$$

становить 0,46% від товщини балки. Отримана похибка задовольняє умови роботи.

2.4 РОЗРОБКА СХЕМИ СКЛАДАЛЬНОГО СКЛАДУ

Схема складальної одиниці побудована на основі конструктивного аналізу виробу. Усю конструкцію виробу можна умовно поділити на окремі менш складні елементи, а інші елементи — на менш складні вузли. Схема складальної одиниці - це схема розгалуженої структури з'єднання кожного елемента, приналежності до кожної деталі виробу, і внутрішнього взаємозв'язку. Відповідно до ГОСТ 2.101-68 до виробів відносяться: деталі, складальні одиниці, комплекси.

Деталь — найпростіша конструктивна одиниця. Складальні одиниці можна отримати шляхом складання деталей. На найнижчому рівні деталі із зазначеними номерами позначаються прямокутниками відповідно до специфікацій, найменувань деталей та їх номерів. Вище, на другому етапі, розташовуються зібрані одиниці складання першого етапу. Складові одиниці вторинного синтезу ще вище, оскільки зв'язок складніший за простий зв'язок. Сам продукт знаходиться поверх схеми.

Схема в основному використовується для аналізу та синтезу продукту під час процесу складання, а також для оцінки складності продукту в процесі підготовки до виробничого процесу. Розроблена схема монтажу наведена в додатку А.

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СКЛАДАННЯ

На основі схеми складальної одиниці будують схему процесу складання.

Послідовність монтажу, спосіб забезпечення з'єднання, похибка і зміст процесу регулювання, виявлення і контролю визначаються технологічним планом конкретного прецизійного зважування шпали.

Схема технічного складання допомагає аналізувати конструкцію компонентів з технічної точки зору, дозволяючи змінити конструкцію обладнання та спростити технологічний процес.

Верхня горизонтальна лінія використовується як загальна збірка виробу, а вертикальні лінії та інші нижні горизонтальні лінії використовуються як вузлова збірка. Розроблена технічна схема складання наведена в додатку Б.

						Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У дипломному проекті бакалавра на основі огляду аналогів та аналізу вагових систем у русі розроблено концепцію вагової системи для зважування автомобілів у русі.

Під час огляду було виявлено, що WIM-системи є потужними інструментами для вимірювання ваги та навантаження на транспортні засоби. Вони здатні використовуватись як для приватних, так і для громадських цілей, спрямованих на забезпечення безпеки та ефективності руху.

Розглянуті різні типи сенсорів, що застосовуються в системах WIM, зокрема п'єзоелектричні та деформаційні. Виявлено, що п'єзоелектричні сенсори є найпоширенішими та надійними, але кожен тип має свої переваги та недоліки, які потрібно враховувати при виборі відповідного рішення.

Також було наведено кілька прикладів використання систем WIM, які показують широкий спектр їх застосування. Зокрема, ці системи використовуються для контролю вантажоперевезень, збору статистики та планування ремонтних робіт дорожнього покриття. Ці приклади свідчать про важливість технології WIM у сучасному транспортному секторі та її потенціал для поліпшення інфраструктури та безпеки дорожнього руху.

Загалом, проведений огляд систем WIM дозволив отримати глибше розуміння їх принципу роботи, переваг та обмежень. Ця інформація буде використана для подальшого дослідження та розробки в рамках дипломного проекту з метою вдосконалення та впровадження систем зважування в русі в реальних умовах. Вибрано компоненти тензодатчика та розраховано основні властивості зсувного тензодатчика. Основними критеріями вибору є точність, швидкість зважування та здатність зважувати в русі. Розроблено методи розрахунку похибки.

						Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SEA Ukraine. (н.д.). Weight-in-Motion. [Электронный ресурс] <https://www.sea.com.ua/ua/weight-in-motion/>
2. SEA Ukraine. (н.д.). Вимірювальні майданчики Weight-in-Motion. [Электронный ресурс] <https://www.sea.com.ua/ua/weight-in-motion/izmeritelnye-plosadki-wim/>
3. IS-WIM. (н.д.). Системи WIM та їх компоненти [Електронний ресурс] <https://www.is-wim.net/what-is-wim/introduction/wim-systems-components/>
4. Federal Highway Administration. (2018р.). Weigh-in-Motion (WIM) Data Collection and Management Guidebook: Part 2 - Advanced Applications (508 Compliant). [Електронний ресурс] [https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/knowledgecenter/wim_guide/wim_guidebook_part2_070918_\(508_compliant\).pdf](https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/knowledgecenter/wim_guide/wim_guidebook_part2_070918_(508_compliant).pdf)
5. Arizona Department of Transportation. (н.д.). SRP-731: Evaluation of Weigh-In-Motion Data for Commercial Vehicle Enforcement. [Електронний ресурс] [https://apps.azdot.gov/files/ADOTLibrary/publications/project_reports/pdf/spr731\(1\).pdf](https://apps.azdot.gov/files/ADOTLibrary/publications/project_reports/pdf/spr731(1).pdf)
6. Springer. (2020р.). Using bridge weigh-in-motion systems to monitor single-span bridge influence lines. [Електронний ресурс] <https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-020-00407-2>
7. Bence Szinyéri, Bence Kővári, István Völgyi, Dénes Kollár, Attila László Joó. (2023р.). A strain gauge-based Bridge Weigh-In-Motion system using deep learning. [Електронний ресурс] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029622015486>
8. Verified Market Research. (2023р.). Global Weigh-In-Motion System Market Size By Vehicle Speed (Low-Speed, High-Speed), By Type (In-road, Bridge Weigh), By End Use Industry (Highway Toll, Oil & Refinery), By Geography And Forecast. [Електронний ресурс] <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/weigh-in-motion-system-market/>

						Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. U.S. Department of Transportation. (2022p.). Guidelines for Portable Weight-In-Motion (WIM) System Installation and Traffic Data Analysis: Instructor's Guide. [Электронный ресурс]

https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/64300/dot_64300_DS1.pdf

10. A.I. Dontu, P.D. Barsanescu, L. Andrusca, N.A. Danila. (2020p.). Weigh-in-motion sensors and traffic monitoring systems - State of the art and development trends. IOP Publishing, 19с. [Электронный ресурс]

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012113>

11. Mohhammad Sujon, Fei Dai. (2021p.). Application of weigh-in-motion technologies for pavement and bridge response monitoring: State-of-the-art review. [Электронный ресурс]

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580521002958>

12. Ales Znidaric, Igor Lavrič. (2010p.). Applications of B-WIM technology to bridge assessment. ResearchGate, 9с. [Электронный ресурс]

https://www.researchgate.net/publication/281551039_Applications_of_B-WIM_technology_to_bridge_assessment

13. Myra Lydon, Desire Robinson, Su E Taylor, Giuseppina Amato. (2017p.). Improved axle detection for bridge weigh-in-motion systems using fiber optic sensors, 9с. [Электронный ресурс]

https://www.researchgate.net/publication/318467321_Improved_axle_detection_for_bridge_weigh-in-motion_systems_using_fiber_optic_sensors

14. METTLER TOLEDO. (2018p.). Proven Reliability and Ease of Use for Vehicle Weight Enforcement. [Электронный ресурс]

https://www.mt.com/dam/mtms/Vehicle_Scales/weigh-in-motion/WIM_Enforcement_Brochure_spreads_EN.pdf

15. IS WIM. Bridge WIM Systems. [Электронный ресурс]

<https://www.is-wim.net/what-is-wim/wim-technologies/bridge-wim/>

16. IS WIM. On-Board weighing. [Электронный ресурс] <https://www.is-wim.net/what-is-wim/wim-technologies/on-board-wim/>

						Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Torbjørn Haugen, Jorunn R. Levy, Erlend Aakre, Maria Elena Palma Tello. (2016p.). A strain gauge-based Bridge Weigh-In-Motion system using deep learning. Traffic Engineering Research Centre, NTNU – The Norwegian University of Science and Technology, 7491 Trondheim, Norway. [Електронний ресурс] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302174>

18. Znidaric, A., Kalin, J., & Kreslin, M. (2016p.). Recent advancements in accuracy and robustness of Bridge WIM systems. У книзі М. Solak (Ред.), Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2012), July 8-12, 2012, Stresa, Lake Maggiore, Italy. Taylor & Francis. [Електронний ресурс] <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315207681-27/recent-advancements-accuracy-robustness-bridge-wim-systems-%C5%BEnidari%C4%8D-kalin-kreslin>

19. Alexandre Brouste. (2021p.). Testing the accuracy of WIM systems: Application to a B-WIM case. Laboratoire Manceau de Mathématiques, Le Mans Université, France. [Електронний ресурс] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026322412100991X>

20. Gustavo Garcia Otto, Jean-Michel Simonin, Jean-Michel Piau, Louis-Marie Cottineau, Olivier Chupin, Leto Momm, Amir Mattar Valente. (2017p.). Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection. Laboratoire Manceau de Mathématiques, Le Mans Université, France. [Електронний ресурс] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817316756>

21. Federal Highway Administration. (2018.). Weigh-in-Motion Technology and Applications: Guidebook (Part 1). [Електронний ресурс] [https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/knowledgecenter/wim_guide/wim_guidebook_part1_070918_\(508_compliant\).pdf](https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/knowledgecenter/wim_guide/wim_guidebook_part1_070918_(508_compliant).pdf)

22. CESTEL. Weigh-in-Motion Systems. [Електронний ресурс] <https://cestel.si/en/>

						Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Ales Znidaric, Igor Lavrič, Jan Kalin. (2010p.). Latest practical developments in the bridge WIM technology. ResearchGate, 9с. [Електронний ресурс]

https://www.researchgate.net/publication/281551030_Latest_practical_developments_in_the_bridge_WIM_technology

24. ResearchGate: Latest practical developments in the bridge WIM technology. [Електронний ресурс]

https://www.researchgate.net/publication/281551030_Latest_practical_developments_in_the_bridge_WIM_technology.

25. IS-WIM (International Society for Weigh-in-Motion): Guide for users. [Електронний ресурс]

https://www.is-wim.net/wp-content/uploads/2020/07/ISWIM_Guide-for-users_press.pdf

26. ResearchGate: Recent developments in bridge weigh-in-motion (B-WIM). [Електронний ресурс]

https://www.researchgate.net/publication/277303613_Recent_developments_in_bridge_weigh_in_motion_B-WIM

27. Piezodisc: Ultrasonic Sensor - Piezoelectric Sensor. [Електронний ресурс]

<http://ua.piezodisc.com/ultrasonic-sensor/ultrasound-sensor-wireless/piezoelectric-sensor.html>

28. Зайцев В. М. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ / В. М. Зайцев, О. К. Нікітін. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 68 с.

29. Румбешта. В. О. Технологія складання, регулювання та випробування приладів.: Підручник. – К: 2013. – 360 с.

30. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1970. - 392 с.

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		