

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

КРМ.АКСм – 24.00.000 ПЗ

Група АКСм-24-1

ВАСИЛЬ ФЕДОРИН

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем

Федорин Василь Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК _____
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Проектування апаратно-програмних засобів системи управління положенням
центру ваги автомобіля

(назва роботи)

Комп'ютеризовані системи управління та автоматика

(назва освітньої програми)

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:

Здобувач освітнього ступеня _____ В.І. Федорин
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ к.т.н., доцент Х.В. Паньків
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

_____ д.т.н., професор Л.М. Заміховський
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Паньків Х.В., к.т.н., доцент каф. ІТТС	1.09.2025	1.10.2025
2	Паньків Х.В., к.т.н., доцент каф. ІТТС	1.10.2025	1.11.2025
3	Паньків Х.В., к.т.н., доцент каф. ІТТС	1.11.2025	1.11.2025
4	Паньків Х.В., к.т.н., доцент каф. ІТТС	1.12.2025	1.12.2025

7. Дата видачі завдання 01.09.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд рекомендаційних систем. Постановка задачі	1.10.2025	виконано
2	Огляд існуючих рішень та порівняння підходів до реалізації рекомендаційних систем	1.11.2025	виконано
3	Результати аналізу рекомендаційної системи	1.11.2025	виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2025	виконано

Студент

_____ (підпис)

В.І. Федорин

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Х.В. Паньків

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Федорин В. І. Проектування апаратно-програмних засобів системи управління положенням центру ваги автомобіля. ІФНТУНГ, 2025. 114 с.

Магістерська робота на здобуття освітнього ступеня магістра за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика», спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2025.

У роботі проаналізовано сучасні підходи до визначення та контролю положення центра ваги автомобіля, а також розглянуто вплив зміни його положення на стійкість, керованість і безпеку руху транспортного засобу. Наведено огляд існуючих апаратних і програмних рішень, що застосовуються для вимірювання навантажень, оцінювання розподілу маси та формування керуючих впливів.

У межах дослідження розроблено апаратно-програмні засоби автоматизованої системи управління положенням центра ваги автомобіля, які включають вимірювальні датчики, мікроконтролерну обробку сигналів та програмні алгоритми аналізу й формування рекомендацій щодо перерозподілу навантаження.

Ключові слова: ЦЕНТР ВАГИ АВТОМОБІЛЯ, АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ДАТЧИКИ НАВАНТАЖЕННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, СТІЙКІСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.

ANNOTATION

Fedorin V. I. Design of Hardware and Software Tools for a Vehicle Center of Gravity Position Control System. IFNTUNG, 2025. 114 p.

Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master under the educational and professional program "Computerized Control Systems and Automation", specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics". Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2025.

The thesis analyzes modern approaches to determining and controlling the position of a vehicle's center of gravity and examines the impact of changes in its position on vehicle stability, handling, and traffic safety. A review of existing hardware and software solutions used for load measurement, mass distribution estimation, and control action generation is presented.

Within the scope of the study, hardware and software tools of an automated vehicle center of gravity position control system have been developed, including measurement sensors, microcontroller-based signal processing, and software algorithms for analysis and generation of recommendations for load redistribution.

Keywords: VEHICLE CENTER OF GRAVITY, HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS, CONTROL SYSTEM, LOAD SENSORS, AUTOMATION, VEHICLE STABILITY.

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 114 с., 28 рисунків, 1 табл., 18 джерел.

Об'єкт дослідження – системи управління динамічними параметрами автомобіля.

Предмет дослідження – апаратно-програмні засоби системи управління положенням центра ваги автомобіля.

Мета роботи – проектування та дослідження апаратно-програмних засобів автоматизованої системи управління положенням центра ваги автомобіля з метою підвищення його стійкості, керованості та безпеки руху.

У роботі використано методи математичного моделювання, аналізу динаміки транспортного засобу, обробки сигналів від вимірювальних датчиків та алгоритмічні методи формування керуючих впливів. Апаратна частина системи реалізована на основі датчиків навантаження та мікроконтролерної платформи, а програмна частина забезпечує обробку вимірювальних даних, оцінювання положення центра ваги та формування рекомендацій щодо перерозподілу навантаження.

У дослідженні проаналізовано сучасні методи визначення та контролю положення центра ваги автомобіля, наведено їх переваги та недоліки. Розроблено структурну схему та алгоритмічне забезпечення системи управління, виконано моделювання її роботи та проведено оцінювання ефективності запропонованого рішення.

ЦЕНТР ВАГИ АВТОМОБІЛЯ, АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ,
СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ДАТЧИКИ НАВАНТАЖЕННЯ,
АВТОМАТИЗАЦІЯ, СТІЙКІСТЬ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ.

ABSTRACT

Calculation and explanatory note: 114 p., 28 figures, 1 tables,18 references.

The object of the study is vehicle dynamic parameter control systems.

The subject of the study is hardware and software tools of a vehicle center of gravity position control system.

The purpose of the work is the design and study of hardware and software tools for an automated vehicle center of gravity position control system in order to improve vehicle stability, handling, and traffic safety.

The work employs methods of mathematical modeling, vehicle dynamics analysis, signal processing from measurement sensors, and algorithmic methods for generating control actions. The hardware part of the system is implemented using load sensors and a microcontroller-based platform, while the software part provides processing of measurement data, estimation of the center of gravity position, and generation of recommendations for load redistribution.

The study analyzes modern methods for determining and controlling the vehicle center of gravity position, outlines their advantages and disadvantages, and presents the development of the system's structural diagram and algorithmic support. Simulation of the system operation and evaluation of the effectiveness of the proposed solution were carried out.

Keywords: VEHICLE CENTER OF GRAVITY, HARDWARE AND SOFTWARE TOOLS, CONTROL SYSTEM, LOAD SENSORS, AUTOMATION, VEHICLE STABILITY.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ.....	11
1.1 Метод зважування реакцій опор (платформні та підкладні ваги).....	13
1.2 Метод стендових випробувань на перекидання (Tilt Table Test)	21
1.3 Бортові системи зважування на базі пневматичної підвіски (OBWS)	28
1.4 Метод вимірювання деформації пружних елементів (для ресорної/пружинної підвіски).....	35
2 РОЗРОБКА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ.....	42
2.1 Розробка методу зважування автомобілів	42
2.2 Розробка методики експериментального визначення висоти центру мас транспортного засобу.....	47
2.3 Розрахунок геометричних параметрів вимірювальної балки	57
2.4 Розробка алгоритму пошуку координат коліс і сили їх натиску.....	60
3 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ.....	69
3.1 Розробка структурної схема апаратного комплексу	69
3.2 Режими роботи системи.....	77
3.3 Функціональні можливості та алгоритми корекції	79
4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ.....	86

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Пректування апаратно-програмних засобів системи управління положенням центру ваги автомобіля	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробив		Федорин В.І.						
Перевірив		Паньків Х.В.					7	114
Н. Контр.		Возний				ІФНТУНГ, АКСМ-24-1		
Затвердив		Заміховський						

4.1 Розробка схемотехніки бездротового вимірювального вузла	86
4.2 Розробка протоколу обміну даними по радіоканалу між контролером і вимірювачем.....	92
4.3 Розробка центрального контролера та засобів візуалізації	97
4.4 Підсистема інтерфейсу Modbus RTU.....	104
4.5 Розробка терміналу оператора.....	105
4.6 Розробка карти реєстрів Modbus.....	111
ВИСНОВКИ.....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113

					КРМ.АКС _м -24.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Тематика кваліфікаційної роботи передбачає розробку системи контролю просторового положення центру мас транспортних засобів на основі розподіленого вимірювання профілю вигину балки. В умовах зростаючої інтенсивності вантажних перевезень та підвищених вимог до безпеки дорожнього руху, контроль завантаження транспортних засобів є критично важливим завданням. Неправильне розміщення вантажу призводить до зміщення центру мас, що суттєво підвищує ризик перекидання автомобіля, особливо при маневруванні та гальмуванні. Традиційні системи зважування дозволяють визначити лише загальну масу, але не забезпечують інформації про просторовий розподіл навантаження, що обмежує можливості оперативного контролю безпеки завантаження.

Метою дослідження даної роботи є розроблення комплексної системи визначення просторового положення центру мас транспортних засобів на основі методу аналізу профілю вигину вимірювальної балки з розподіленими тензометричними сенсорами, що забезпечує точне визначення координат центру мас з мінімальною кількістю вимірювальних циклів.

Завданням дослідження є аналіз існуючих методів визначення положення центру мас транспортних засобів, розробка фізико-математичної моделі та методики експериментального визначення просторових координат центру мас, розробка алгоритму розв'язання оберненої задачі для визначення положення та ваги коліс за профілем вигину балки, проектування апаратного комплексу з бездротовими вимірювальними вузлами та розподіленою архітектурою, розробка протоколу обміну даними та програмного забезпечення для обробки вимірювальної інформації та візуалізації результатів.

Об'єктом дослідження є процеси визначення просторового положення центру мас транспортних засобів методом послідовного зважування осей з використанням розподіленого вимірювання деформації балки.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є методи та алгоритми визначення координат центру мас на основі аналізу профілю вигину вимірювальної балки, що враховують розподіл навантаження від коліс та геометричні параметри транспортного засобу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в створенні ефективної системи контролю завантаження транспортних засобів, яка забезпечує оперативне визначення просторового положення центру мас за рахунок використання методу розподіленого вимірювання з мінімальною кількістю обладнання та може бути використана на транспортних підприємствах, пунктах митного контролю, ваговій інспекції та логістичних центрах для підвищення безпеки дорожнього руху та зниження ризику аварій через перекидання транспортних засобів.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ

Забезпечення активної безпеки транспортних засобів є однією з пріоритетних проблем сучасної автомобільної науки та техніки, вирішення якої неможливе без глибокого розуміння динамічних процесів, що супроводжують рух автомобіля. Серед множини конструктивних та експлуатаційних факторів, що визначають поведінку машини на дорозі, ключове місце займають масо-інерційні характеристики, і насамперед — координати центру ваги (ЦВ). Центр ваги є фундаментальною фізичною точкою, до якої прикладена рівнодіюча сил тяжіння і відносно якої розглядаються моменти всіх зовнішніх сил, що діють на автомобіль під час маневрування. Точне знання положення цієї точки є критично важливим, оскільки саме вона визначає характер розподілу нормальних реакцій опорної поверхні між колесами, що, в свою чергу, диктує граничні можливості транспортного засобу щодо стійкості проти перекидання, керованості та гальмівної динаміки.

У теорії руху автомобіля доведено, що висота центру ваги має пряму кореляцію з порогом поперечної статичної та динамічної стійкості. Зі збільшенням висоти розташування вантажу зростає плече перекидального моменту відцентрової сили, що виникає при проходженні поворотів, що суттєво знижує критичну швидкість, за якої можливий відрив коліс від дороги. Для вантажних автомобілів, автобусів та спеціальної техніки ця проблема стоїть особливо гостро через високу змінність параметрів завантаження. Неконтрольоване зміщення вантажу або його неправильне розміщення (надмірне зміщення вгору, назад або вбік) призводить до непередбачуваної зміни реакцій на керованих колесах, що може спричинити втрату курсової стійкості навіть при виконанні штатних маневрів. Статистика дорожньо-транспортних пригод свідчить, що значна частка аварій за участю комерційного транспорту, пов'язаних із перекиданням або складанням

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автопоїзда, зумовлена саме порушенням вагових норм та неправильним центруванням вантажу.

Окрім поперечної стійкості, положення центру ваги визначає ефективність розгону та гальмування. Поздовжня координата ЦВ впливає на перерозподіл ваги між осями під дією інерційних сил: зміщення центру мас назад розвантажує передню вісь, погіршуючи керованість, тоді як зміщення вперед може призвести до раннього блокування задніх коліс при гальмуванні. Сучасні системи активної безпеки (ABS, ESP) використовують у своїх алгоритмах усереднені параметри автомобіля, проте значні відхилення фактичного центру ваги від розрахункового можуть знизити ефективність їх роботи. Тому задача точного визначення координат центру ваги є не лише питанням теоретичних розрахунків на етапі проектування, а й нагальною експлуатаційною потребою, спрямованою на підвищення загального рівня безпеки дорожнього руху.

З огляду на критичну важливість цього параметра, в інженерній практиці розроблено низку методів та засобів для його визначення. Ці методи еволюціонували від найпростіших геометричних побудов та статичного зважування до складних динамічних випробувань та використання інтелектуальних бортових систем. Вибір конкретного методу залежить від поставленої мети (сертифікація нового автомобіля, наукове дослідження чи оперативний контроль перед рейсом), необхідної точності та наявного бюджету. У даному розділі проведено детальний аналіз існуючих підходів до визначення координат центру ваги, класифікованих за принципом дії та умовами проведення вимірювань. Розглянуто як класичні стаціонарні методи, що забезпечують еталонну точність, так і сучасні експлуатаційні методи, які дозволяють автоматизувати процес контролю завантаження. Метою такого огляду є виявлення переваг та недоліків існуючих рішень для обґрунтування вибору найбільш ефективного методу реалізації системи контролю завантаження в рамках даної роботи.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1 Метод зважування реакцій опор (платформні та підкладні ваги)

Забезпечення стійкості та керованості транспортного засобу є фундаментальною проблемою сучасної автомобільної теорії, вирішення якої неможливе без точного знання інерційних параметрів, ключовим з яких є координати центру ваги. У науковій літературі, зокрема у фундаментальних працях Гіллеспі [1], наголошується, що розподіл мас безпосередньо впливає на перерозподіл вертикальних реакцій під час гальмування, розгону та проходження поворотів, що визначає граничні режими руху автомобіля. Саме тому аналіз методів визначення цих координат є першочерговим завданням для інженерів-випробувачів. Серед усього різноманіття підходів найбільш поширеним, апробованим та нормативно закріпленим залишається стаціонарний метод зважування реакцій опор, який базується на законах статичної рівноваги твердого тіла.

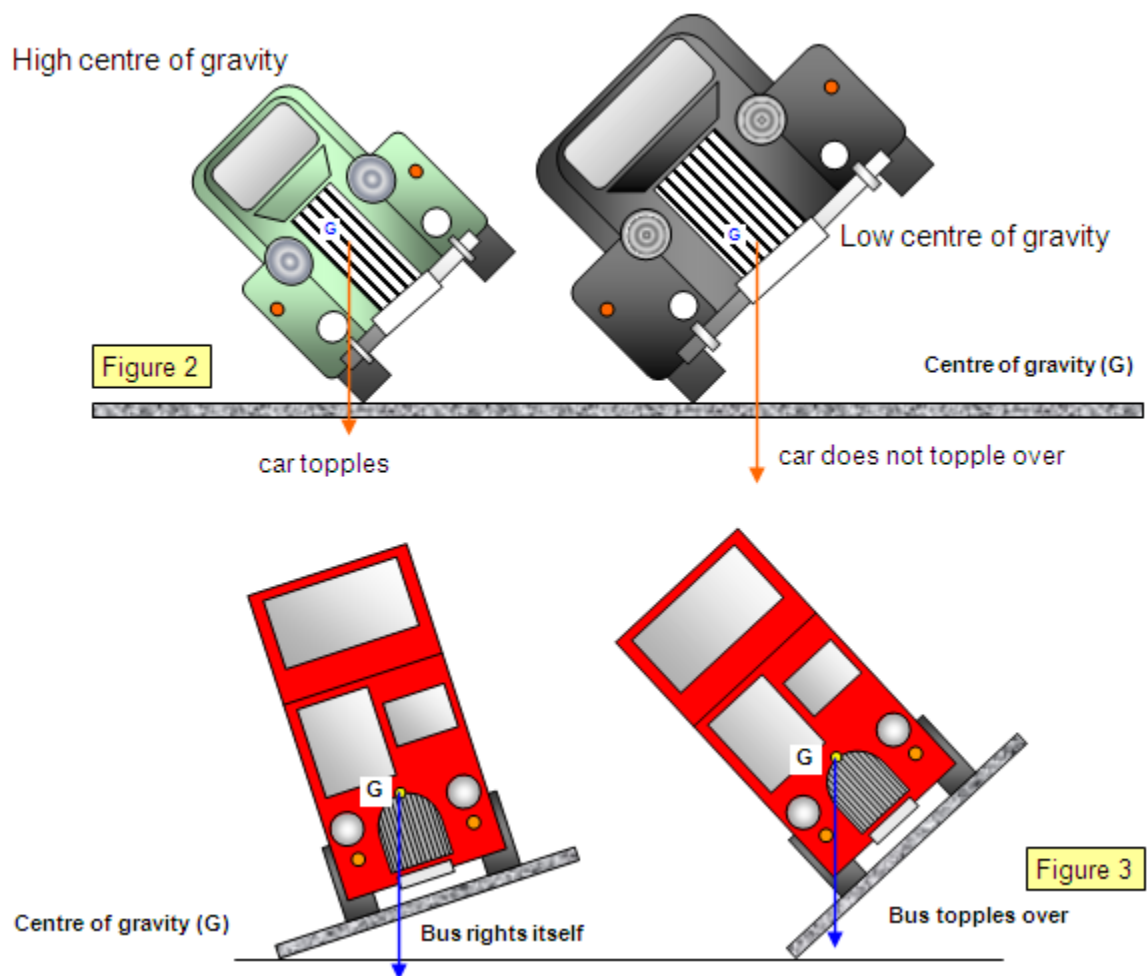


Рисунок 1.1 – Вплив центра мас автомобіля на його стійкість при нахилі

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сутність методу зважування реакцій опор полягає у визначенні вертикальних сил, що діють на колеса автомобіля з боку опорної поверхні, з подальшим аналітичним розрахунок координат центру мас. Як зазначають у своїх дослідженнях Раймпель та співавтори [2], цей метод є «золотим стандартом» для отримання базових параметрів автомобіля, оскільки він забезпечує високу повторюваність результатів за умови дотримання процедури вимірювання. Процес визначення поздовжньої та поперечної координат центру ваги зазвичай не викликає технічних складнощів і реалізується шляхом встановлення автомобіля на горизонтальну поверхню. При цьому важливо, щоб кожне колесо або вісь спиралися на окремий ваговимірювальний пристрій. Відповідно до методики, описаної в стандартах ISO [3], знаючи геометричні параметри автомобіля, а саме його колісну базу та колію, і маючи дані про навантаження на кожне колесо, можна застосувати рівняння моментів сил відносно осей симетрії. Отримані таким чином координати X та Y характеризують положення центру ваги у площині дороги, що є достатнім для базових розрахунків тягово-швидкісних властивостей, однак недостатнім для аналізу перекидання чи бічної стійкості.

Значно складнішим завданням, яке широко обговорюється в технічній літературі, є визначення вертикальної координати центру ваги (Z) за допомогою методу зважування. Вонг у своїй класичній праці з теорії наземних транспортних засобів [4] вказує, що для знаходження висоти центру мас необхідно створити штучний нахил автомобіля або підняти одну з його осей на значну висоту. Цей підхід, відомий як метод підйому осі, вимагає фіксації зміни вагових реакцій при зміні кута нахилу кузова. Коли передня або задня вісь автомобіля піднімається, відбувається перерозподіл навантаження на непідняту вісь, і величина цього приросту прямо пропорційна висоті центру ваги. Математична модель цього процесу базується на тригонометричних залежностях, де точність результату критично залежить від точності вимірювання кута нахилу та зміни ваги. Дослідники, такі як Міллікен [5],

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

звертають увагу на те, що цей метод має суттєві методичні похибки, пов'язані з наявністю пружної підвіски та рухомих рідин у транспортному засобі.

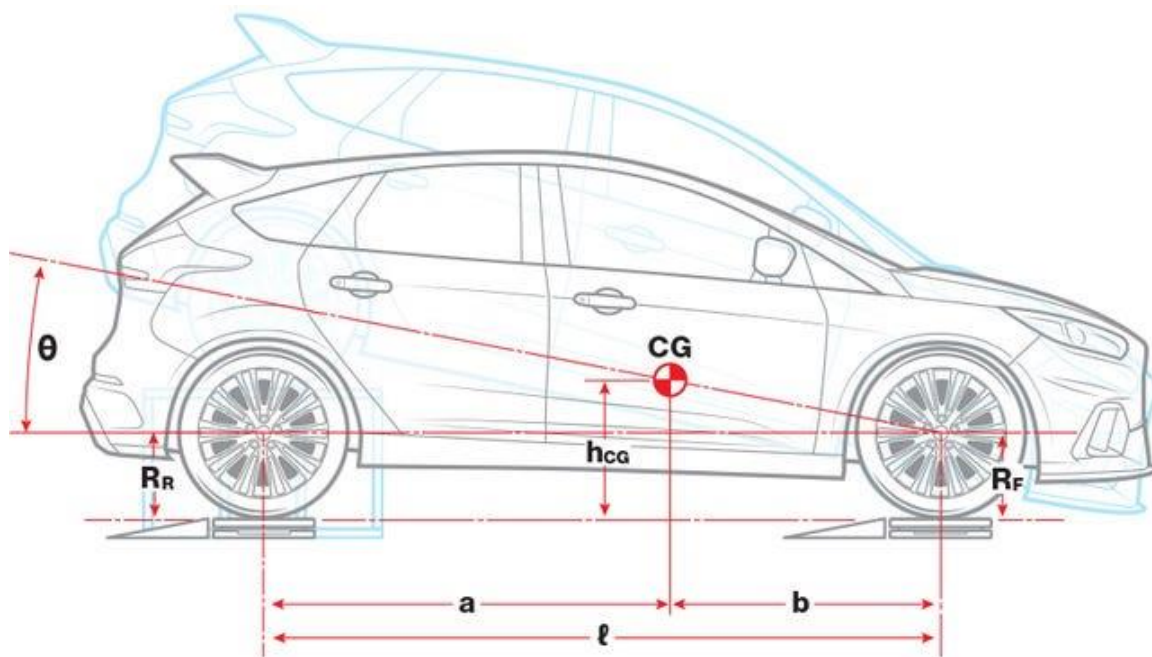


Рисунок 1.2– Метод вимірювання висоти центру мас

При реалізації методу зважування з підйомом осі виникає проблема зміщення центру ваги підресорених мас відносно непідресорених внаслідок деформації пружних елементів підвіски. У роботі [6] автори детально аналізують кінематику підвіски під час таких випробувань і наголошують, що ігнорування ходу підвіски може призвести до значних похибок у визначенні висоти центру ваги. Під час нахилу автомобіля кузов не просто повертається разом із колесами як єдине ціле, а зміщується відносно осей через податливість пружин та шин. Для мінімізації цього ефекту в лабораторних умовах часто застосовують жорстке блокування підвіски за допомогою спеціальних тяг або замінюють амортизатори на жорсткі вставки, що перетворює автомобіль на квазітверде тіло. Проте, як зауважують Гудз та співавтори [7], блокування підвіски є трудомісткою операцією, яка не завжди можлива в умовах експрес-діагностики або при використанні мобільних вимірювальних комплексів.

Що стосується апаратного забезпечення методу, то сучасний ринок пропонує широкий спектр засобів, від стаціонарних платформних ваг до

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

мобільних підкладних систем. У літературі [8] проводиться порівняльний аналіз точності стаціонарних ваг великої вантажопідйомності та портативних систем. Стаціонарні ваги, що використовуються на пунктах вагового контролю або в лабораторіях, забезпечують високу стабільність показань, проте їх використання обмежене прив'язкою до конкретного місця. Натомість, мобільні підкладні ваги, такі як системи виробництва Interscom або HAENNI, набули широкого поширення завдяки своїй універсальності. Ці пристрої являють собою низькопрофільні платформи, виготовлені з високоміцних алюмінієвих сплавів, усередині яких розміщені тензOMETричні датчики. Принцип дії таких ваг ґрунтується на зміні електричного опору тензорезистора при механічній деформації пружного елемента під дією ваги колеса. Сучасні моделі, описані в оглядах діагностичного обладнання [9], оснащуються бездротовими модулями передачі даних, що дозволяє передавати інформацію про навантаження на кожне колесо безпосередньо на комп'ютер або спеціалізований термінал, де спеціалізоване програмне забезпечення автоматично розраховує координати центру ваги.



Рисунок 1.3–Низькопрофільна вага LP600

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливим аспектом, який розглядається в роботах з метрології вимірювань маси ТЗ [10], є вплив похибок самих ваговимірювальних пристроїв та умов проведення експерименту на кінцевий результат. Для підкладних ваг критичним є забезпечення ідеальної горизонтальності майданчика. Навіть незначний нахил опорної поверхні або різниця у висоті самих платформ під різними колесами призводить до паразитного перерозподілу реакцій, що спотворює розрахунок координат, особливо поперечної. Крім того, при використанні методу підйому осі для визначення висоти центру ваги, необхідно враховувати похибку, що вноситься деформацією шин. У дослідженні [11] показано, що зміна радіуса кочення шини під навантаженням та зміщення плями контакту при нахилі автомобіля можуть вносити корективи у геометричні параметри, які використовуються у розрахункових формулах. Для компенсації цих явищ пропонується використовувати платформи з плаваючими верхніми частинами, які нівелюють бічні сили, що виникають при нахилі автомобіля.



Рисунок 1.4– Пункт вагового контролю автомобілів

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Окрему увагу в літературі приділено проблематиці вимірювання центру ваги важких вантажних автомобілів та спецтехніки. У таких транспортних засобах центр ваги може розташовуватися значно вище, ніж у легкових автомобілів, що робить процедуру підйому однієї з осей небезпечною. У зв'язку з цим, у роботі [12] пропонуються методики, що використовують стенди перекидання (tilt tables). Хоча ці стенди частіше використовуються для визначення кута статичної стійкості, їх принцип тісно пов'язаний з методом зважування реакцій. Стенд являє собою величезну платформу, на яку заїжджає автомобіль, і яка потім нахиляється гідравлічними приводами. У цьому випадку вимірюються не лише реакції опор, а й момент відриву коліс від поверхні. Це дозволяє верифікувати дані, отримані розрахунковим методом через зважування реакцій. Проте такі комплекси є надзвичайно коштовними та рідкісними, тому метод підкладних ваг залишається домінуючим в інженерній практиці.

Попри широке розповсюдження, метод зважування реакцій опор має свої обмеження, про які детально йдеться в роботі Подригала та ін. [13]. Основний недолік полягає в статичності методу. Він дає уявлення про положення центру ваги лише спорядженого або повністю завантаженого автомобіля в стані спокою. У реальних умовах руху, через наявність пасажирів, вантажу, який може зміщуватися, та витрату палива, координати центру ваги є змінними величинами. Більше того, метод не враховує динамічну зміну центру ваги під час роботи підвіски. Тим не менш, як зазначено в [14], статичні координати є вихідною точкою для будь-якого динамічного моделювання. Сучасні програмні комплекси для симуляції руху автомобіля (наприклад, CarSim або IPG CarMaker) вимагають введення саме статичних координат центру мас, отриманих методом зважування, як початкових умов.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.5– Зовнішній вигляд промислових сенсорів натискання

Розглядаючи засоби вимірювання, слід згадати про еволюцію чутливих елементів ваг. Якщо раніше використовувалися важільні механізми, то сьогодні стандартом є тензометрія та п'єзоелектричні сенсори. У роботі [15] описуються переваги використання багатокомпонентних вимірювальних платформ, які здатні фіксувати не лише вертикальну реакцію, а й бічні зусилля, що виникають у плямі контакту. Хоча такі системи є значно дорожчими за звичайні підкладні ваги, вони дозволяють точніше врахувати паразитні сили тертя, що виникають при підйомі осі автомобіля, і таким чином підвищити точність визначення Z-координати. Виробники обладнання, такі як Intercomp, впроваджують цифрову обробку сигналу безпосередньо в корпусі ваг, що дозволяє мінімізувати вплив електромагнітних завад, характерних для промислових умов експлуатації.

Також варто відзначити роль автоматизації процесу. У сучасних дослідницьких центрах процедура визначення центру ваги часто інтегрована в загальний цикл перевірки автомобіля на кінцевій лінії складання. Як описано в [16], існують автоматизовані стенди, які самостійно позиціонують автомобіль, проводять зважування, а потім за допомогою роботизованих захватів

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

піднімають одну з осей на задану висоту, виконуючи всі необхідні вимірювання за лічені хвилини. Це виключає людський фактор та помилки, пов'язані з ручним вимірюванням геометричних параметрів (бази, колії, висоти підйому). Програмне забезпечення таких комплексів здатне автоматично компенсувати похибки від стиснення шин та підвіски, використовуючи попередньо завантажені бази даних жорсткості елементів для конкретної моделі автомобіля.



Рисунок 1.6– Вигляд зважувальних пристроїв одночасно під кожним колесом автомобіля

Підсумовуючи огляд методу зважування реакцій опор, можна стверджувати, що він залишається фундаментальним способом отримання масо-інерційних характеристик автомобіля. Його теоретична база, ґрунтуючись на законах класичної механіки, є бездоганною, а основні джерела похибок лежать у площині практичної реалізації та інструментального забезпечення. Розвиток цього методу, як свідчить проаналізована література [17], йде шляхом вдосконалення сенсорів, підвищення мобільності ваговимірювальних комплексів та розробки програмних алгоритмів для компенсації впливу пружних елементів конструкції автомобіля. Для студентської чи наукової роботи саме цей метод є найбільш доступним для відтворення та аналізу, оскільки він дозволяє зрозуміти фізичну сутність

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподілу ваги без необхідності використання складного динамічного обладнання. Використання сучасних підкладних ваг у поєднанні з коректною методикою врахування кінематики підвіски дозволяє досягти точності визначення координат центру ваги, достатньої для більшості інженерних задач, пов'язаних з оцінкою стійкості та керованості транспортних засобів.

1.2 Метод стендових випробувань на перекидання (Tilt Table Test)

У контексті забезпечення активної безпеки транспортних засобів, особливо тих, що мають високе розташування центру мас (вантажні автомобілі, автобуси, спеціальна техніка), визначення межі поперечної стійкості є завданням першочергової ваги. Якщо метод зважування реакцій опор, розглянутий вище, є аналітично-розрахунковим способом отримання координат центру ваги, то метод стендових випробувань на перекидання (відомий у міжнародній практиці як Tilt Table Test) є прямим експериментальним методом визначення критичних параметрів стійкості. У науковій літературі та нормативних документах цей метод часто називають «золотим стандартом», оскільки він дозволяє не просто обчислити гіпотетичну висоту центру ваги, а фізично змодельовати граничний стан рівноваги автомобіля під дією бічних сил, замінюючи відцентрову силу проекцією сили тяжіння.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.7– Підйомник для тестування автомобіля на стійкість до нахилу

Сутність методу полягає у використанні спеціалізованого стендового обладнання, основним елементом якого є масивна платформа, здатна нахилитися відносно поздовжньої осі. Процедура випробування, детально описана в роботах з динаміки важких транспортних засобів [18], передбачає надійне закріплення автомобіля на цій платформі таким чином, щоб уникнути його бічного ковзання, але при цьому не обмежувати роботу підвіски та деформацію шин у вертикальному напрямку. Платформа повільно, з низькою кутовою швидкістю (зазвичай менше 0,5 градуса за секунду), нахилється до моменту, коли колеса одного борту (верхнього по схилу) втратять контакт з опорною поверхнею. Цей момент фіксується як критичний кут статичної стійкості. Фізичний зміст цього експерименту базується на еквівалентності сил: нахил автомобіля на певний кут створює перекидальний момент, аналогічний дії відцентрової сили при русі в повороті з відповідним бічним прискоренням.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

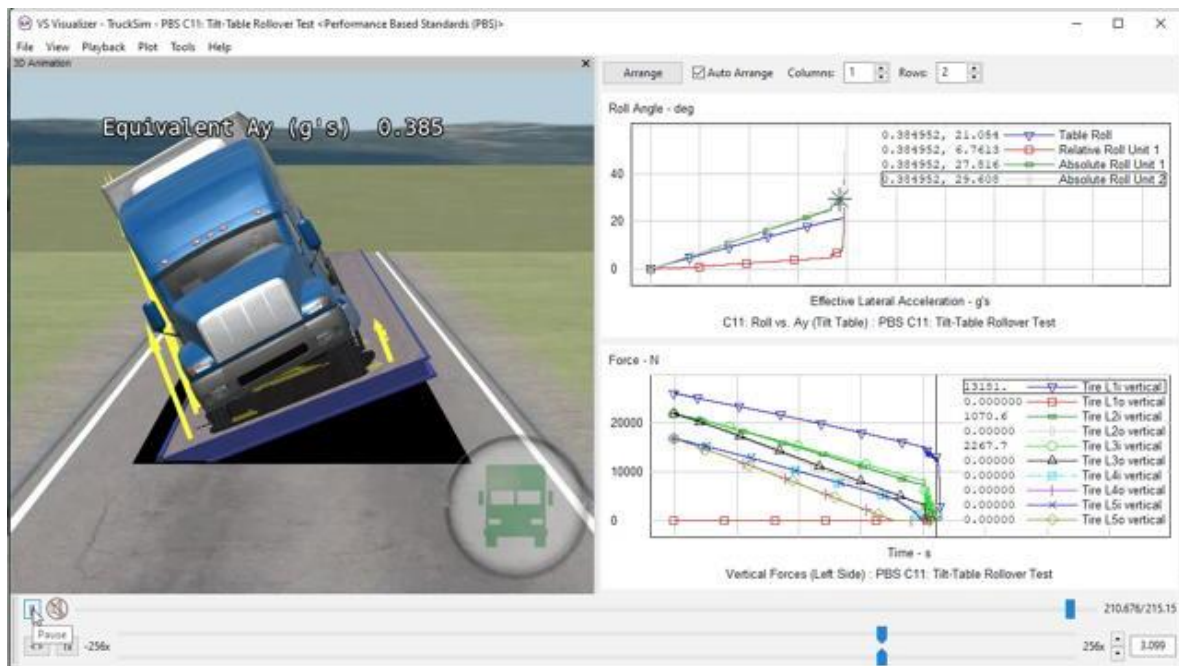


Рисунок 1.8– Зовнішній вигляд тестування автомобіля на положення центру мас

Зв'язок між кутом нахилу платформи та висотою центру ваги описується тригонометричними залежностями. У спрощеній моделі жорсткого тіла тангенс кута нахилу платформи в момент відриву коліс дорівнює відношенню половини колії автомобіля до висоти його центру ваги. Однак, як зазначають дослідники [19], реальний автомобіль є складною системою пружних тіл, тому проста геометрична формула потребує суттєвих корекцій. Під час нахилу платформи відбувається бічний зсув кузова відносно коліс за рахунок податливості підвіски (крен кузова) та бічної еластичності шин. Це призводить до того, що фактичний центр ваги зміщується в бік перекидання, зменшуючи плече відновлювального моменту. Саме здатність методу Tilt Table Test інтегрально врахувати всі ці фактори – кінематику підвіски, жорсткість шин, крутильну жорсткість рами – робить його найбільш точним інструментом для оцінки реальної стійкості, на відміну від розрахункових методів, які часто оперують ідеалізованими параметрами.

Особливу увагу в літературі приділено конструкції та характеристикам випробувальних стендів. Сучасні комплекси типу SRTC (Static Roll Testing

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Complex) є складними інженерними спорудами. У працях, присвячених метрологічному забезпеченню автотранспортних випробувань [20], описуються гідравлічні системи приводу таких платформ, які повинні забезпечувати виключно плавність ходу без ривків, оскільки будь-яке динамічне збурення може спровокувати передчасний відрив коліс і спотворити результати. Поверхня платформи повинна мати високий коефіцієнт зчеплення (зазвичай реалізується за допомогою спеціальних покриттів або імітації асфальтобетону), щоб запобігти бічному ковзанню автомобіля до моменту його перекидання. Крім того, стенди обладнуються високоточними інклінометрами для вимірювання кута нахилу та датчиками навантаження під кожним колесом, які дозволяють зафіксувати момент обнулення реакції опори з високою точністю, виключаючи суб'єктивний фактор візуального спостереження.

Важливим аспектом застосування цього методу є його нормативне закріплення. У міжнародній практиці сертифікації транспортних засобів, зокрема в країнах Європейського Союзу, метод нахилу платформи є обов'язковим для певних категорій транспорту. Наприклад, Правила ЄЕК ООН № 111 [11], що регулюють стійкість автоцистерн для перевезення небезпечних вантажів, вимагають підтвердження статичної стійкості саме шляхом розрахунку або випробувань на стенді перекидання. Це пов'язано з тим, що рідкі вантажі мають специфіку переміщення центру мас при нахилі (ефект вільної поверхні рідини), що значно знижує поріг перекидання. Стендові випробування дозволяють безпечно змоделювати цю поведінку в лабораторних умовах. Аналогічні вимоги висуваються і до двоповерхових автобусів, де високе положення центру ваги є критичним параметром безпеки пасажирських перевезень [2]. Організації, такі як VOSA (Vehicle and Operator Services Agency) у Великій Британії та NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) у США, використовують дані, отримані на таких стендах, для формування рейтингів безпеки та допуску моделей до експлуатації.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Попри високу точність та нормативний статус, метод Tilt Table Test має низку суттєвих обмежень, які детально аналізуються в економіко-експлуатаційних дослідженнях [13]. Перш за все, це надзвичайна вартість та громіздкість обладнання. Будівництво та обслуговування стенду, здатного підняти та нахилити завантажений автопоїзд вагою до 40 тонн, потребує значних капіталовкладень, спеціального фундаменту та великих виробничих площ. Це робить такі комплекси доступними лише для великих автовиробників, національних сертифікаційних центрів та потужних науково-дослідних інститутів. Для пересічного автотранспортного підприємства або пункту технічного контролю наявність такого обладнання є економічно недоцільною.

Крім того, метод є стаціонарним і трудомістким. Підготовка автомобіля до випробувань займає значний час. Як зазначається в роботах з методики експериментальних досліджень [14], критично важливим етапом є встановлення запобіжних пристроїв (страхувальних ланцюгів або ременів). Ці засоби повинні бути налаштовані таким чином, щоб не впливати на розподіл навантаження до моменту втрати стійкості, але миттєво утримати автомобіль від повного перекидання після відриву коліс. Неправильне натягнення страхувальних строп може створити додаткові зусилля, що змінять картину розподілу реакцій опор і призведуть до похибки вимірювання. Також необхідно враховувати вплив тиску в шинах та стану підвіски, що вимагає ретельної попередньої підготовки досліджуваного зразка.

Наукова дискусія навколо методу стендових випробувань на перекидання також торкається питання адекватності заміни динамічних сил статичною проекцією сили ваги. У роботі [15] автори вказують на те, що хоча Tilt Table Test є ідеальним для визначення порогу статичної стійкості (Static Rollover Threshold - SRT), він не враховує динамічні ефекти, які виникають при реальному перекиданні на дорозі. У русі значну роль відіграють кутові прискорення крену, демпфуючі властивості амортизаторів та інерція

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

неподресорених мас. При швидкому маневрі ("лосиний тест", переставка) перекидання може статися при меншому бічному прискоренні, ніж те, що відповідає куту нахилу на стенді, через розгойдування кузова та резонансні явища. Тому результати стендових випробувань слід розглядати як верхню межу стійкості або як базовий параметр для калібрування комп'ютерних моделей, а не як абсолютну гарантію безпеки у будь-яких дорожніх ситуаціях.

Окремий інтерес становить використання методу для валідації інших, простіших засобів визначення центру ваги. Дослідники часто використовують результати, отримані на високоточних стендах SRTC, як еталонні для оцінки похибок портативних методів, таких як зважування з підйомом осі. Порівняльний аналіз, наведений у [6], показує, що розрахунковий метод, який базується на геометричних вимірах та зважуванні, може давати похибку у визначенні висоти центру ваги до 3-5% через неможливість точного врахування деформації шин та сайлентблоків підвіски. Натомість стендовий метод інтегрує ці деформації у кінцевий результат – кут перекидання. Це дозволяє вводити емпіричні коефіцієнти корекції у простіші методики, підвищуючи їх точність для масового застосування.

Технологічний розвиток стендового обладнання не стоїть на місці. Сучасні комплекси оснащуються системами лазерного сканування, які в реальному часі відстежують положення кузова автомобіля відносно платформи. У публікаціях [12] описуються системи, що дозволяють будувати тривимірну модель поведінки автомобіля під час нахилу, фіксуючи не лише момент відриву коліс, а й кінематику скручування рами та зміщення вантажу. Це особливо актуально для вантажних автомобілів з рамною конструкцією, де жорсткість на кручення суттєво впливає на перерозподіл навантажень між осями. Аналіз цих даних дає інженерам цінну інформацію для оптимізації конструкції підвіски та стабілізаторів поперечної стійкості.

Слід також зазначити, що метод стендових випробувань має свої особливості при роботі з транспортними засобами, що перевозять рідини. Як

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вказується в [8], класична методика передбачає випробування з повним завантаженням або порожнім автомобілем. Однак для автоцистерн найнебезпечнішим може бути часткове завантаження, коли вільна поверхня рідини має максимальну площу. Сучасні методики випробувань на стендах передбачають серію тестів з різним рівнем наповнення резервуара для визначення найгіршого сценарію. Це вимагає від обладнання підвищеної вантажопідйомності та заходів безпеки, оскільки динамічний удар рідини при поверненні платформи у вихідне положення може пошкодити як автомобіль, так і сам стенд.

Ще одним аспектом, який обмежує повсюдне використання цього методу, є неможливість його застосування в польових умовах для оперативного контролю. Водій або інспектор на дорозі не мають змоги перевірити фактичне положення центру ваги завантаженого автомобіля за допомогою цього методу. Тому, як зазначають експерти з транспортної логістики [19], метод Tilt Table Test залишається прерогативою етапу проектування, сертифікації та наукових досліджень. Для експлуатаційних потреб розробляються бортові системи моніторингу, алгоритми яких базуються на даних, отриманих саме під час стендових випробувань. Такі системи, використовуючи датчики тиску в пневмопідвісці та акселерометри, можуть оцінювати висоту центру ваги в реальному часі, але їх налаштування (калібрування) неможливе без первинних даних, отриманих "золотим стандартом".

Узагальнюючи огляд літературних джерел стосовно методу стендових випробувань на перекидання, можна зробити висновок про його незамінність у сучасній автомобільній інженерії. Незважаючи на високу вартість та складність реалізації, він забезпечує найбільш достовірні дані про статичну стійкість транспортного засобу. Цей метод слугує своєрідним арбітром, що підтверджує або спростовує результати математичного моделювання та розрахункових методів. Його розвиток спрямований на підвищення

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматизації процесу, впровадження безконтактних методів вимірювання деформацій та інтеграцію з програмними комплексами віртуального тестування. Як зазначається у підсумкових звітах провідних автомобільних інститутів [12], без проведення натурних випробувань на стенді перекидання неможливо гарантувати відповідність транспортного засобу сучасним жорстким вимогам безпеки, особливо в сегменті комерційного транспорту та перевезення небезпечних вантажів. Саме тому, незважаючи на появу нових цифрових технологій, фізичний експеримент на похилій платформі залишається фундаментальним етапом дослідження динаміки автомобіля.

1.3 Бортові системи зважування на базі пневматичної підвіски (OBWS)

У сучасній автомобільній індустрії спостерігається стійка тенденція до переходу від стаціонарних методів контролю вагових параметрів до інтегрованих бортових систем (On-Board Weighing Systems – OBWS). Для вантажних автомобілів, напівпричепів та автобусів, оснащених пневматичною підвіскою, цей підхід став де-факто стандартом завдяки своїй економічній ефективності та технологічній доступності. На відміну від тензометричних датчиків, які вимагають наклеювання на силові елементи мостів або рами, системи на базі пневмопідвіски використовують вже існуючу робочу середу – стиснене повітря, що забезпечує пружні властивості підвіски. У науковій літературі [11] цей метод класифікується як опосередкований метод вимірювання, оскільки маса визначається через тиск робочого тіла в пружному елементі.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

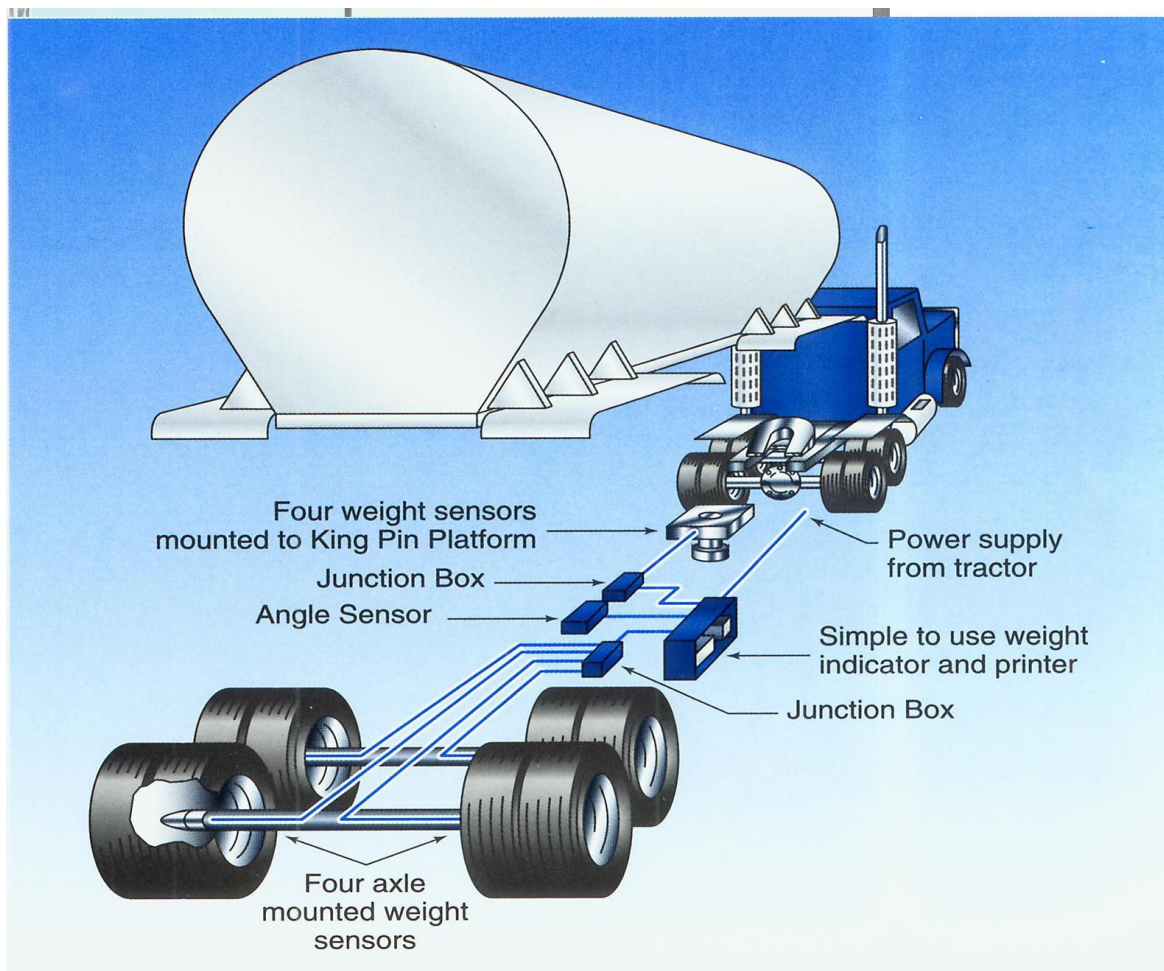


Рисунок 1.9– Системи зважування на осях тягача

Фізичний принцип дії таких систем базується на фундаментальному співвідношенні термодинаміки та механіки, де тиск газу в замкненому об'ємі пропорційний зовнішньому навантаженню, що діє на цей об'єм. У пневматичному балоні (пневморесорі) сила ваги, що припадає на колесо, врівноважується силою тиску стисненого повітря, що діє на ефективну площу мембрани балона. Як зазначають дослідники систем підресорювання [12], ця залежність є близькою до лінійної в робочому діапазоні ходів підвіски, проте вона ускладнюється зміною ефективної площі поперечного перерізу балона при його деформації. Саме тому просте вимірювання тиску манометром не дає точного значення маси. Сучасні електронні контролери використовують складні поліноміальні алгоритми апроксимації, які враховують не лише тиск, а

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

й поточну висоту підвіски (рівень підлоги), оскільки при різному положенні кузова жорсткість і ефективна площа пневмобалона змінюються.

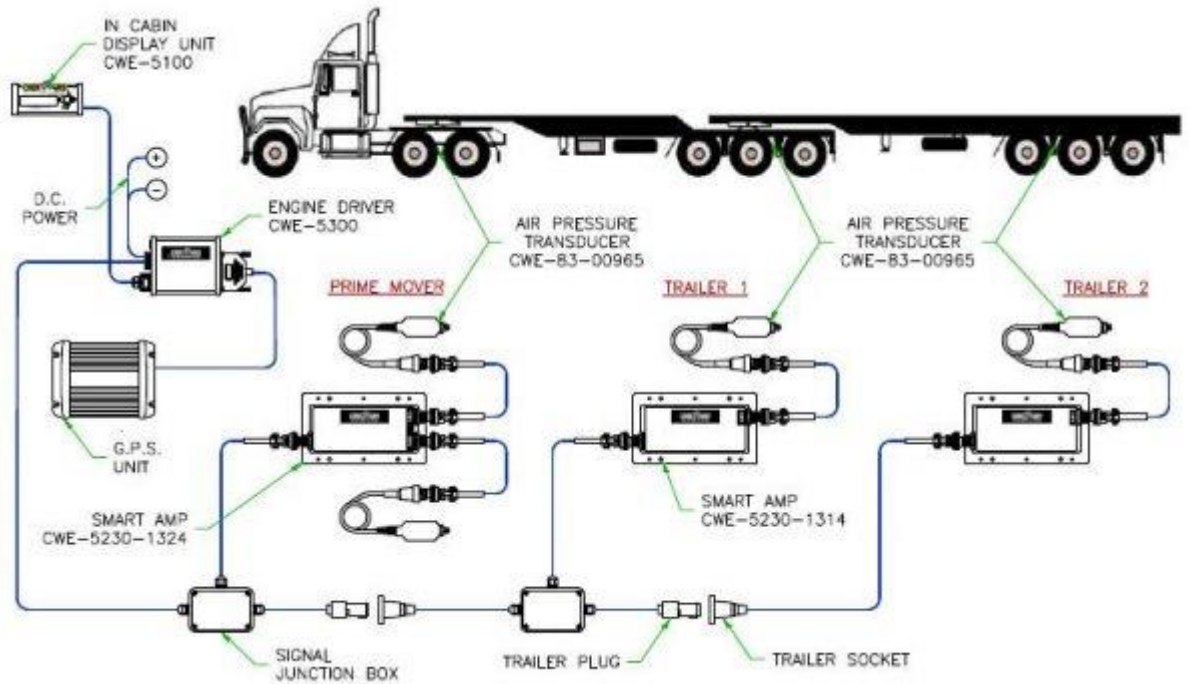


Рисунок 1.10– Система зважування Австралійської програми інтелектуального доступу IAP

Технічна реалізація методу передбачає інтеграцію датчиків тиску в пневматичні магістралі кожного контуру підвіски. У найпростішому випадку це один датчик на задню вісь (для одноканальних систем), що дає лише загальне навантаження на вісь. Більш досконалі системи, описані в технічних оглядах комерційного транспорту [3], використовують двоканалну (лівий/правий борт) або чотириканальну схему (кожне колесо окремо). Сигнал з датчиків надходить до електронного блоку керування (ECU), який найчастіше є частиною гальмівної системи з електронним керуванням (EBS) або окремим модулем підвіски (ECAS). Це дозволяє уникнути дублювання апаратної частини, використовуючи обчислювальні потужності вже наявних на борту контролерів.

Серед комерційних рішень, що домінують на ринку, особливої уваги заслуговують системи розробки провідних постачальників компонентів, таких як WABCO (нині частина ZF) та Haldex. Наприклад, система WABCO

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SmartBoard, детально проаналізована в роботі [7], являє собою інтерфейсний модуль, який встановлюється безпосередньо на напівпричепі. Вона отримує дані від модулаторів TEBS (Trailer Electronic Braking System), які, окрім керування гальмами, моніторять тиск у пневмобалонах. Інформація про навантаження на осі передається по цифровій шині CAN (відповідно до протоколу SAE J1939 або ISO 11992) і може відображатися як на самому дисплеї SmartBoard, так і на панелі приладів у кабіні водія. Аналогічні рішення від Haldex (система EB+) пропонують функціонал автоматичного розпізнавання перевантаження та попередження водія.



Рисунок 1.11– Приклад комплексної системи оцінки навантаження на осі із логуванням результатів в процесі експлуатації автомобіля

Важливою перевагою таких систем є можливість їх інтеграції в телематичні комплекси автопарку. Як зазначається в дослідженнях з логістики [5], дані про завантаження в реальному часі можуть передаватися диспетчеру через GPS/GSM трекери. Це дозволяє оптимізувати вантажопотоки та запобігати штрафам за перевищення вагових норм ще до виїзду автомобіля на дороги загального користування. Окрім того, постійний моніторинг тиску дозволяє виявляти несправності підвіски, такі як витік повітря або пошкодження клапанів рівня підлоги, що підвищує загальну надійність транспортного засобу.

Проте, незважаючи на широке розповсюдження, метод визначення маси за тиском у пневмопідвісці має низку метрологічних проблем, які детально

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висвітлені в роботі [6]. Основною проблемою є явище гістерезису гумовокордних оболонок пневмобалонів. Гума, як в'язкопружний матеріал, має різну характеристику деформації при навантаженні та розвантаженні. Це означає, що при одній і тій самій масі вантажу тиск у системі може відрізнятися в залежності від того, чи завантажувався автомобіль, чи розвантажувався, а також від того, в якому напрямку рухалася підвіска перед зупинкою (вгору чи вниз). Експериментальні дані свідчать, що похибка, викликана гістерезисом, може досягати 3–5 % без застосування спеціальних алгоритмів компенсації. Для мінімізації цього ефекту сучасні контролери пропонують процедуру усереднення вимірювань або вимагають проведення спеціального циклу "підйом-опускання" підвіски перед фіксацією ваги.

Ще одним джерелом похибок є сили тертя в напрямних елементах підвіски (амортизаторах, реактивних штангах, втулках стабілізаторів). У роботі [7] показано, що частина вертикального навантаження сприймається не стисненим повітрям, а силою тертя спокою в цих вузлах. Це призводить до появи так званої "зони нечутливості": автомобіль можна довантажити на 50–100 кг, але тиск у балонах не зміниться, оскільки додаткова вага буде компенсована тертям. Це явище особливо помітне на старих транспортних засобах із зношеними компонентами ходової частини. Крім того, на точність впливає робота клапанів рівня підлоги, які мають власний допуск на спрацювання (мертва зона), що призводить до коливань висоти підвіски і, відповідно, тиску.

У контексті завдання визначення положення центру ваги (ЦВ), існуючі бортові системи мають суттєві обмеження. Як слушно зауважують автори огляду інтелектуальних транспортних систем [8], більшість серійних рішень (включно з WABCO та Knorr-Bremse) орієнтовані насамперед на контроль осьового навантаження для дотримання законодавчих норм. Вони чудово справляються із задачею сумування ваги та визначення перевантаження окремих осей. Проте, вони рідко надають інформацію про координати центру

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ваги, особливо про його висоту (Z) та поперечне зміщення (Y). Стандартна конфігурація пневмосистеми напівпричепа часто об'єднує лівий та правий пневмобалони однієї осі в єдиний контур через дросельний отвір для забезпечення поперечної стійкості під час руху. Це унеможливорює вимірювання різниці тисків між бортами в статиці, а отже, робить неможливим визначення поперечної координати ЦВ. Для реалізації такої функції необхідна роздільна схема керування (Split-circuit), яка зустрічається значно рідше і потребує складнішого алгоритму керування клапанами.

Визначення поздовжньої координати ЦВ (X) за допомогою таких систем можливе і реалізується шляхом порівняння навантажень на передню та задню вісь тягача і візки напівпричепа. Знаючи геометрію автопоїзда (міжосьові відстані), контролер може обчислити, де знаходиться рівнодіюча сил ваги вздовж довжини автомобіля. Однак, як вказується в [9], ці розрахунки часто є закритими внутрішніми змінними системи EBS і не виводяться на дисплей водія у вигляді рекомендацій (наприклад, "змістіть вантаж на 0,5 м вперед"). Інтерфейс користувача зазвичай обмежується відображенням кілограмів на вісь, залишаючи водієві задачу самостійно інтерпретувати ці дані для балансування вантажу.

Що стосується вертикальної координати ЦВ (Z), то для серійних систем на базі пневмопідвіски це є "сліпою зоною". Вимірювання статичного тиску в балонах не дає жодної інформації про те, наскільки високо розташований вантаж. Теоретично, визначення висоти ЦВ можливе шляхом аналізу динамічних коливань тиску під час руху (крену в поворотах), проте, як зазначають дослідники динаміки [10], це вимагає високочастотних датчиків, потужних процесорів для спектрального аналізу сигналу та складної математичної моделі, що враховує жорсткість шин та профіль дороги. На сьогоднішній день такі алгоритми знаходяться переважно на стадії наукових розробок і не імплементовані в масові комерційні продукти типу SmartBoard.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тим не менш, для студентської роботи саме цей метод є найбільш близьким аналогом та відправною точкою. Він демонструє принципову можливість автоматизації вимірювань без використання зовнішнього обладнання. Недоліки існуючих систем, а саме відсутність рекомендацій щодо оптимізації розміщення вантажу та неможливість оцінки висоти центру ваги в статиці, формують чітку нішу для нового дослідження. Пропонується концепція вдосконалення штатної системи: використання даних з датчиків пневмопідвіски (за умови розділення контурів) у поєднанні з додатковими алгоритмами або датчиками (наприклад, інклінометрами) для побудови "помічника завантаження".

Варто також розглянути аспект калібрування таких систем. Згідно з рекомендаціями OIML (International Organization of Legal Metrology) [11], бортові системи зважування потребують періодичного калібрування на сертифікованих вагах. Процес калібрування зазвичай включає вимірювання тиску при порожньому автомобілі та при повному завантаженні. Контролер будує лінійну залежність між двома точками. Деякі сучасні системи підтримують багатоточкове калібрування для врахування нелінійності характеристики пневморесори. Розуміння цього процесу є критичним для розробки власного пристрою або алгоритму: точність кінцевого результату ніколи не перевищить точність еталонних ваг, використаних при калібруванні, та стабільності характеристик датчиків тиску. Також слід зазначити вплив температури навколишнього середовища. Рівняння стану ідеального газу ($PV=nRT$) вказує на залежність тиску від температури. Хоча системи мають температурну компенсацію (або вона відбувається природним чином, оскільки клапани рівня підлоги додають/стравлюють повітря для підтримки висоти, нівелюючи зміну об'єму від температури), різкі перепади температур можуть вносити тимчасові похибки. У роботі [12] наводяться дані про те, що при швидкому нагріванні шин та елементів підвіски після тривалого руху похибка вимірювання маси може зростати. Це ще один аргумент на користь

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

того, що для точного визначення центру ваги (критичного параметру безпеки) покладатися виключно на штатні датчики тиску бюджетного сегменту може бути недостатньо.

Підсумовуючи аналіз бортових систем зважування, можна констатувати, що вони є потужним інструментом для моніторингу загальної маси та осьових навантажень. Їх інтеграція в CAN-шину та наявність готових апаратних рішень від гігантів індустрії (WABCO, Haldex, Knorr-Bremse) створює надійну базу для подальших розробок. Проте, їх функціонал обмежений переважно фіксацією факту перевантаження. Інтелектуальна складова – аналіз стійкості на основі розподілу мас, визначення координат центру ваги в тривимірному просторі та, що найважливіше, генерація підказок для водія щодо правильного розміщення вантажу – залишається відкритою проблемою. Вирішення цієї задачі вимагає розробки нових математичних моделей, які б використовували дані пневмопідвіски як вхідні параметри, але обробляли їх з урахуванням геометрії вантажного простору та критеріїв стійкості. Розробка магістерської роботи має бути спрямована саме на усунення прогалини між простою індикацією маси та інтелектуальною підтримкою прийняття рішення.

1.4 Метод вимірювання деформації пружних елементів (для ресорної/пружинної підвіски)

В умовах гетерогенного парку комерційної техніки, де значну частку складають малотоннажні вантажівки (LCV), пікапи та старі моделі вантажних автомобілів, використання пневматичних систем зважування є неможливим через конструктивну відсутність пневмобалонів. Для таких транспортних засобів, оснащених класичною механічною підвіскою (гвинтовими циліндричними пружинами, листовими ресорами або торсіонами), єдиним економічно виправданим способом автоматизованого визначення ваги та координат центру мас є метод вимірювання деформації пружних елементів. У фаховій літературі з автомобільної електроніки [13] цей підхід описується як метод непрямого вимірювання навантаження через контроль взаємного

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переміщення підресорених та невідресорених мас. Його універсальність полягає в тому, що він може бути адаптований до будь-якого типу підвіски шляхом встановлення зовнішніх датчиків лінійного переміщення або кута повороту важеля.

Фундаментальною фізичною основою цього методу є закон Гука, який постулює лінійну залежність між силою пружності та величиною деформації тіла. У спрощеній моделі, знаючи коефіцієнт жорсткості пружного елемента (k) та вимірявши величину його стиснення (S) відносно положення вільного ходу, можна обчислити вертикальну силу (F), що діє на дану опору. Однак, як зазначають дослідники теорії підвіски [14], на практиці ця залежність рідко буває ідеально лінійною. Характеристики реальних пружних елементів, особливо листових ресор та пружин зі змінним кроком навивки, мають прогресивний характер: зі збільшенням навантаження жорсткість зростає. Це вимагає застосування більш складних математичних моделей апроксимації, зазвичай поліномів другого або третього порядку, для точного перерахунку переміщення в кілограми навантаження.

Ключовим елементом апаратної реалізації методу є датчик положення кузова. На ринку автомобільної електроніки представлено кілька технологічних рішень, серед яких історично першими були резистивні датчики (потенціометри). Принцип їх дії, описаний у підручниках з сенсоріки [15], базується на зміні електричного опору при переміщенні повзунка по резистивному шару. Головною перевагою таких датчиків є простота інтеграції: вони працюють як дільники напруги, видаючи аналоговий сигнал, зрозумілий для будь-якого мікроконтролера. Проте в умовах агресивного середовища підвіски автомобіля (вібрації, волога, бруд, сольові реагенти) механічний контакт повзунка швидко зношується, що призводить до появи «шумів» у сигналі або повної відмови.

Еволюція сенсорних технологій призвела до витіснення контактних потенціометрів безконтактними індуктивними датчиками та датчиками на

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефекті Холла. Сучасні системи, такі як датчики виробництва компанії Positek або аналоги, що використовуються в штатних системах автокорекції фар ксенонового світла, забезпечують значно вищу надійність. У роботі [14] детально розглядається принцип роботи індуктивних лінійних перетворювачів, які використовують зміну індуктивності котушки при переміщенні феромагнітного сердечника. Вони повністю герметичні, не бояться занурення у воду і мають ресурс, що перевищує термін служби самого автомобіля. Використання таких датчиків дозволяє досягти точності вимірювання переміщення до 0,1 мм, що для середньостатистичної підвіски з жорсткістю 50 Н/мм відповідає роздільній здатності близько 5 кг на колесо, що є цілком прийнятним показником для завдань визначення центру ваги.

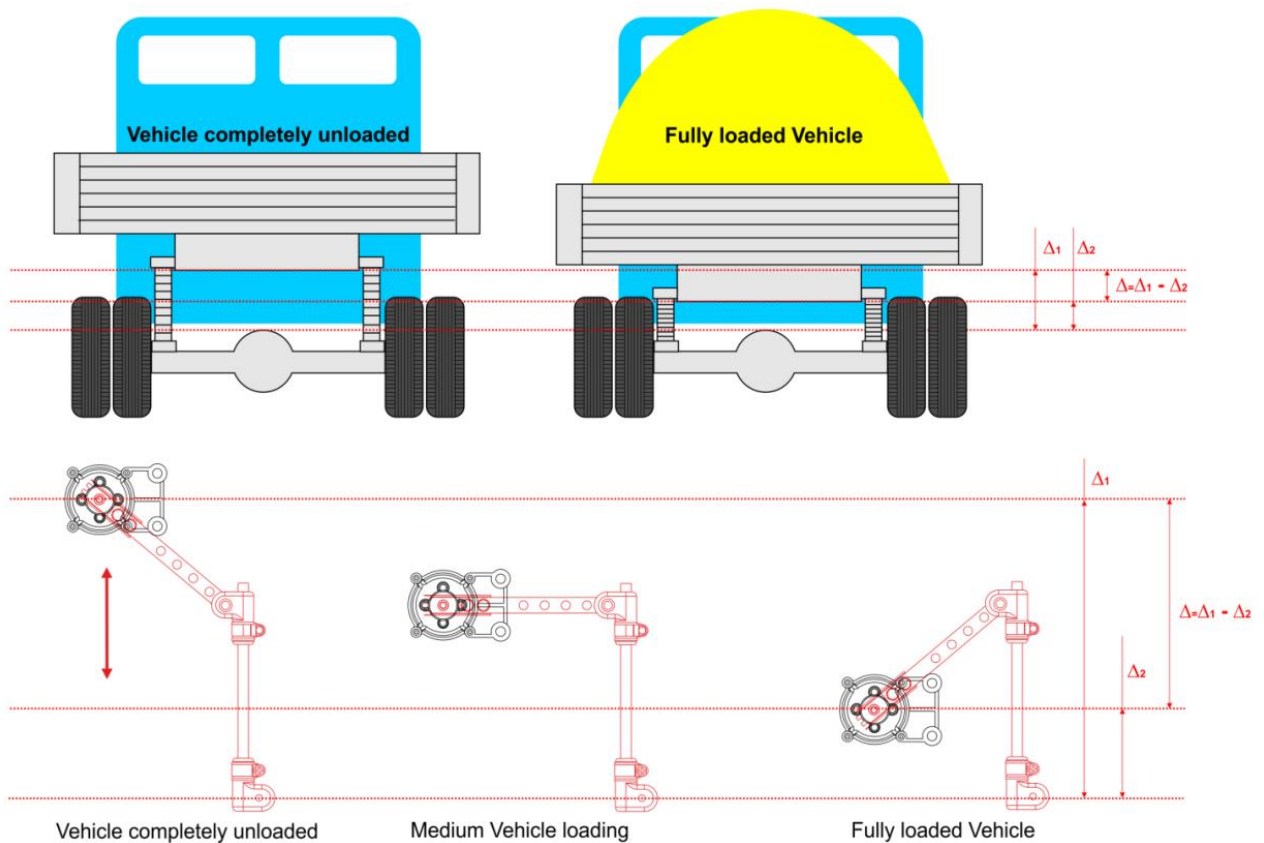


Рисунок 1.12– Ілюстрація роботи ричажного вимірювача ступеню деформації ресор під навантаженням

Особливу увагу при реалізації цього методу слід приділити кінематиці встановлення датчиків. Оскільки простір у колісній арці обмежений, датчики

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часто встановлюють не вертикально, а під кутом, або використовують важільні механізми (тяга, що з'єднує датчик з важелем підвіски). Це вносить геометричну нелінійність у вимірювання: лінійне переміщення колеса трансформується в кутовий поворот вала датчика за законом синуса або косинуса. У дослідженні [17], присвяченому калібруванню бортових систем, наголошується на необхідності врахування "коефіцієнта передачі" (motion ratio) підвіски. Наприклад, якщо датчик встановлено посередині важеля підвіски, то при переміщенні колеса на 10 см шток датчика переміститься лише на 5 см. Ігнорування цього факту призведе до двократної помилки у визначенні навантаження. Тому програмне забезпечення контролера повинно містити таблиці перерахунку ("look-up tables"), що пов'язують вихідну напругу датчика з реальним навантаженням на колесо, отриманим під час еталонного зважування.

Найбільш складною проблемою методу деформації пружних елементів є явище гістерезису, особливо характерне для листових ресор. Багатолистова ресора працює не лише як пружний елемент, а і як демпфер за рахунок міжлистового тертя. Як показано в трибологічних дослідженнях підвісок [18], сила тертя між листами призводить до того, що залежність "сила-деформація" при навантаженні (хід стиснення) і розвантаженні (хід відбою) не збігається, утворюючи петлю гістерезису. Ширина цієї петлі може досягати 10–15 % від номінального навантаження. Це означає, що автомобіль може зупинитися на різній висоті при одному й тому ж вантажі, залежно від того, як він загальмував перед зупинкою. Для боротьби з цим явищем розробляються алгоритми динамічної фільтрації: система зчитує показання не в стані спокою, а під час повільного руху по нерівностях, усереднюючи значення масиву даних за певний проміжок часу. Такий підхід дозволяє знайти "середину" петлі гістерезису і значно підвищити точність.

У контексті визначення координат центру ваги, метод вимірювання деформації має значний потенціал, який поки що мало реалізований у серійних

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристроях. Встановлення чотирьох датчиків (по одному на кожне колесо) дозволяє отримати повну картину розподілу вертикальних реакцій. Знаючи базу та колію автомобіля, за формулами статички можна легко обчислити поздовжню (X) та поперечну (Y) координати центру мас. Це дозволяє реалізувати функціонал "помічника завантаження", який графічно відображає на екрані смартфона або планшета зміщення вантажу. На відміну від пневматичних систем, де контури часто об'єднані, незалежні датчики положення дають чітку інформацію про різницю навантаження лівого і правого бортів, що критично важливо для попередження бічного перекидання.

Однак найбільш перспективним напрямком, який безпосередньо стосується теми роботи, є можливість визначення вертикальної координати центру ваги (Z) шляхом комплексування даних від датчиків положення та інерційних датчиків (акселерометрів і гіроскопів). У сучасній літературі з мехатроніки [19] описується метод оцінки висоти центру мас через вимірювання кута крену кузова. Суть ідеї полягає в тому, що під дією бічних сил (наприклад, при русі в повороті відомого радіуса або при штучному розгойдуванні автомобіля) кузов нахилиється на кут, пропорційний висоті центру ваги та обернено пропорційний кутовій жорсткості підвіски. Маючи дані про величину стиснення пружин з одного боку і розтягнення з іншого (від датчиків переміщення), а також величину бічного прискорення (від MEMS-акселерометра), можна побудувати математичну модель для обчислення висоти Z в реальному часі.

Така гібридна система виглядає найбільш привабливою для розробки власного пристрою в рамках дипломного проекту з кількох причин. По-перше, вона є універсальною: датчики переміщення можна механічно адаптувати до будь-якого автомобіля (на відміну від датчиків тиску, що потребують врізки в магістралі). По-друге, компоненти для такої системи є доступними та недорогими. Використання готових модулів GPS-моніторингу з аналоговими входами (наприклад, Teltonika, Bitrek) дозволяє зосередитися не на розробці

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

"заліза", а на створенні інтелектуальних алгоритмів обробки даних. У роботі [12] наводяться приклади використання телематичних трекерів для контролю перевантажень у агропромисловому секторі, де умови експлуатації є вкрай важкими. Досвід цих впроваджень доводить життєздатність методу за умови якісної герметизації з'єднань та правильного калібрування.

Важливим аспектом є також температурна стабільність пружних елементів. Модуль пружності сталі незначно змінюється при звичайних коливаннях температури, проте в'язкість мастила в амортизаторах та еластичність сайлентблоків залежать від температури суттєво. У наукових працях [5] досліджується вплив низьких температур на "застигання" підвіски, що призводить до збільшення похибки вимірювання. Для студентської розробки це відкриває поле для досліджень: можна передбачити встановлення датчика температури навколишнього середовища і введення поправочних коефіцієнтів у розрахунковий алгоритм, що стане елементом наукової новизни роботи.

Крім того, слід згадати про проблему "повзучості" металу та втоми пружин. З часом пружні елементи просідають, і нульова точка (висота порожнього автомобіля) зміщується. Це вимагає реалізації функції автокалібрування або можливості легкого скидання "нуля" користувачем через програмний інтерфейс. Існуючі комерційні системи, такі як Kіmax або РМ Onboard, часто вимагають відвідування сервісу для перекалібрування. Розробка адаптивного алгоритму, який би самостійно відстежував дрейф характеристик пружин (наприклад, аналізуючи статистику положення підвіски на рівних ділянках дороги протягом місяця), могла б стати значною конкурентною перевагою проектованої системи.

Ще однією технічною перевагою методу є висока частота опитування датчиків. На відміну від пневматичних систем, де тиск вирівнюється повільно через інерційність повітря та дросельні отвори, датчики переміщення реагують миттєво. Це дозволяє використовувати сигнал не лише для статички, а й для

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналізу динаміки руху. Як вказується в [12], аналіз спектральної щільності коливань підресорених мас дозволяє оцінити не тільки масу вантажу, а й момент інерції кузова відносно поздовжньої та поперечної осей. Ці параметри є критично важливими для роботи систем курсової стійкості (ESP), і можливість їх отримання з недорогої додаткової системи відкриває перспективи для створення просунутих асистентів водія (ADAS) для старого комерційного транспорту.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить, що метод вимірювання деформації пружних елементів є найбільш збалансованим рішенням для задачі створення універсальної системи визначення положення центру ваги. Він поєднує в собі достатню теоретичну базу, широкі можливості для математичного моделювання, відносно дешевизну компонентної бази та незалежність від типу енергоносія в підвісці (повітря чи сталь). Основні виклики при його реалізації лежать у площині боротьби з нелінійністю та гістерезисом, що вирішується переважно програмними методами та грамотним проектуванням кінематичної схеми встановлення датчиків. Саме цей напрям доцільно обрати для детального опрацювання в практичній частині магістерської роботи, оскільки він дає змогу наочно продемонструвати інженерний підхід до розв'язання складної задачі, що поєднує механіку, електроніку та програмування.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ

2.1 Розробка методу зважування автомобілів

Традиційні вагові системи часто вимірюють лише сумарне навантаження, що вимагає додаткового ручного введення даних, таких як ширина колії, для ідентифікації осі. Запропонований метод Smart Beam усуває цю необхідність шляхом автоматичного визначення координати наїзду колеса на балку.

Апаратною основою методу є балка, що спирається на дві опори. На цих опорах встановлено тензOMETричні датчики сили, які фіксують реакції опір. Лівий датчик вимірює силу F_1 , правий – силу F_2 . Балка має відому довжину L між опорами. При наїзді колеса на балку в деякій точці з координатою X (відраховується від лівої опори) виникає зосереджена сила F , що моделює вагове навантаження. Для виведення аналітичної залежності координати X від вимірних реакцій розглядається модель балки як абсолютно твердого тіла на двох шарнірних опорах. Власна вага балки вважається скомпенсованою або нехтується в даній постановці, оскільки вимірюється динамічна складова. Умови статичної рівноваги для такої системи описуються рівняннями моментів сил.

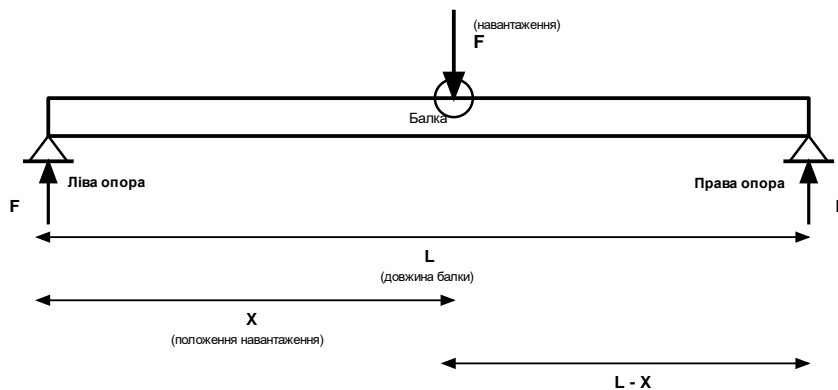


Рисунок 2.1– Спосіб пошуку положення центру мас

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сума моментів усіх сил відносно будь-якої точки дорівнює нулю. Зручно розглянути суму моментів відносно правої опори. Сила F_2 створює нульовий момент відносно цієї точки. Сила F створює момент, що обертає за годинниковою стрілкою, з плечем $(L - X)$. Сила F_1 створює момент, що обертає проти годинникової стрілки, з плечем L . Рівняння рівноваги моментів набуває вигляду:

$$F_1 \cdot L = F \cdot (L - X). \quad (2.1)$$

Відповідно до умови рівноваги сил у вертикальному напрямку, сума вертикальних реакцій дорівнює прикладеній силі:

$$F = F_1 + F_2. \quad (2.2)$$

Підставляючи цей вираз у рівняння моментів, отримуємо:

$$F_1 \cdot L = (F_1 + F_2) \cdot (L - X). \quad (2.3)$$

Таким чином, формула для обчислення координати точки прикладання сили X від лівого і правого краю балки має вигляд:

$$X = \frac{F_2 \cdot L}{F_1 + F_2} \quad X = L - \frac{F_1 \cdot L}{F_1 + F_2}. \quad (2.4)$$

Дана формула є математичною основою методу Smart Beam. Вона дозволяє за показами двох тензодатчиків та знаючи конструктивну довжину L безперервно обчислювати положення колеса вздовж балки

2.1.1 Теоретичне обґрунтування розрахунку координат центру мас системи тіл

Після визначення ваги та локальної координати кожного окремого колеса, задача зводиться до пошуку центру мас (CM) системи матеріальних точок на площині. Для цього використовується принцип суперпозиції моментів сил, відомий у механіці як теорема Варіньйона.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

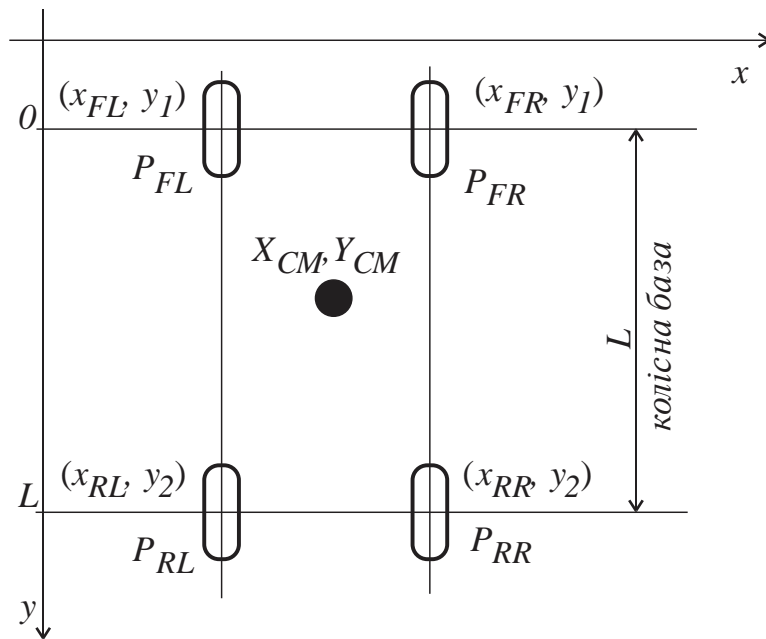


Рисунок 2.2– Координати точок вимірювання сили

Згідно з цією теоремою, якщо система сил має рівнодіючу (в нашому випадку це загальна вага автомобіля P_{total}), то момент цієї рівнодіючої сили відносно будь-якої осі дорівнює сумі моментів усіх окремих сил відносно тієї ж осі.

Найбільш поширеним є двохвісний автомобіль. Представимо його як систему з чотирьох сил тиску коліс на дорогу: P_{FL} , P_{FR} — ваги переднього лівого та правого коліс; P_{RL} , P_{RR} — ваги заднього лівого та правого коліс. Введемо глобальну декартову систему координат OXY : де вісь OY суміщена з лівим краєм вимірювальної ділянки (або лівою колією), Вісь OX суміщена з лінією передньої осі автомобіля. Кожне колесо має свої координати в цій системі x_i, y_i . Для передньої осі поздовжня координата $y = 0$, для задньої $y = L_{base}$ (колісна база).

Для визначення поперечної координати X_{CM} складемо рівняння моментів відносно поздовжньої осі OY .

Момент, який створює рівнодіюча сила P_{total} на плече X_{CM} , повинен врівноважувати суму моментів від кожного з чотирьох коліс:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{res} = \sum M_i \quad (2.5)$$

$$P_{total} \cdot X_{CM} = (P_{FL} \cdot x_{FL}) + (P_{FR} \cdot x_{FR}) + (P_{RL} \cdot x_{RL}) + (P_{RR} \cdot x_{RR}) \quad (2.6)$$

Звідси виразимо шукану координату:

$$X_{CM} = \frac{P_{FL}x_{FL} + P_{FR}x_{FR} + P_{RL}x_{RL} + P_{RR}x_{RR}}{P_{FL} + P_{FR} + P_{RL} + P_{RR}} \quad (2.7)$$

Ця формула показує фізичну сутність поперечного центру мас: це середньозважене значення координат усіх коліс, де "вагою" виступає сила тиску колеса.

Аналогічно складемо рівняння моментів відносно поперечної осі OX (лінія передніх коліс).

Плечі сил для передніх коліс дорівнюють нулю ($y_{front} = 0$), а для задніх дорівнюють колісній базі ($y_{rear} = L_{base}$).

$$P_{total} \cdot Y_{CM} = (P_{FL} \cdot 0) + (P_{FR} \cdot 0) + (P_{RL} \cdot L_{base}) + (P_{RR} \cdot L_{base}) \quad (2.8)$$

Оскільки перші два доданки зануляються, а сума $P_{RL} + P_{RR}$ є вагою задньої осі P_{rear} , рівняння спрощується:

$$P_{total} \cdot Y_{CM} = P_{rear} \cdot L_{base} \quad (2.9)$$

$$Y_{CM} = L_{base} \cdot \frac{P_{rear}}{P_{total}} \quad (2.10)$$

Для вантажних автомобілів, автопоїздів та спеціальної техніки кількість точок опори може бути значно більшою за чотири. Для загального випадку транспортного засобу з N осями позначимо параметри для j -ї осі ($j = 1..N$): P_{Lj}, P_{Rj} — ваги лівого та правого коліс j -ї осі; x_{Lj}, x_{Rj} — їхні поперечні координати; y_j — відстань від j -ї осі до першої осі (для першої осі $y_1 = 0$).

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

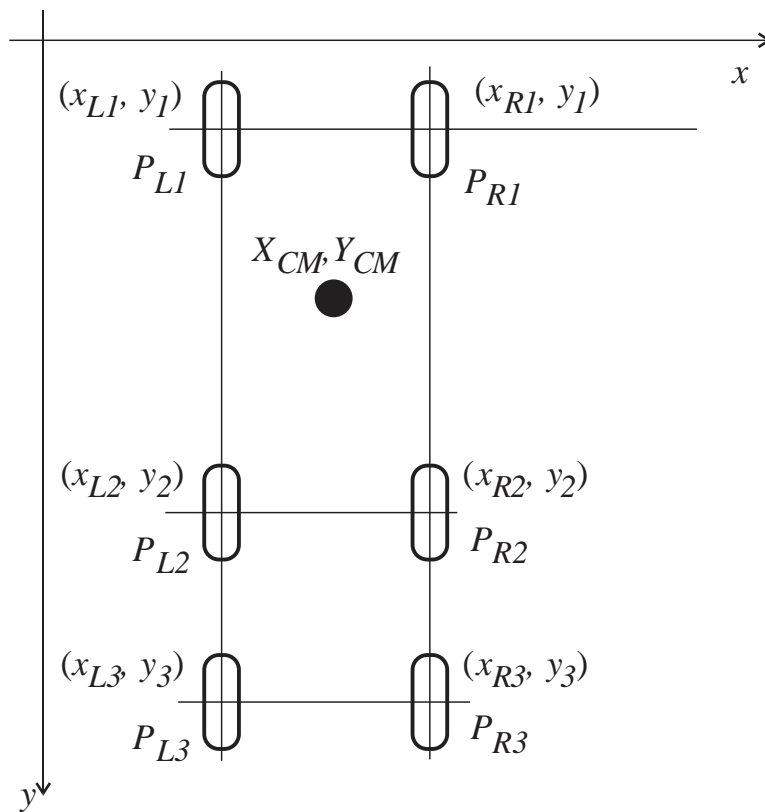


Рисунок 2.3– Координати точок вимірювання багатовісних автомобілів

Застосовуючи той самий принцип Варіньйона, ми переходимо від суми чотирьох доданків до суми $2N$ доданків (по два колеса на кожну з N осей).

Рівняння балансу моментів відносно поздовжньої осі набуває вигляду суми по всім осям:

$$P_{total} \cdot X_{CM} = \sum_{j=1}^N (P_{Lj} \cdot x_{Lj} + P_{Rj} \cdot x_{Rj}) \quad (2.4)$$

Звідси:

$$X_{CM} = \frac{\sum_{j=1}^N (P_{Lj} \cdot x_{Lj} + P_{Rj} \cdot x_{Rj})}{\sum_{j=1}^N (P_{Lj} + P_{Rj})} \quad (2.12)$$

Рівняння балансу моментів відносно передньої осі:

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{total} \cdot Y_{CM} = \sum_{j=1}^N [(P_{Lj} + P_{Rj}) \cdot y_j] \quad (2.13)$$

Позначивши сумарну вагу j -ї осі як $P_{axle,j} = P_{Lj} + P_{Rj}$, отримаємо кінцевий вираз:

$$Y_{CM} = \frac{\sum_{j=1}^N (P_{axle,j} \cdot y_j)}{P_{total}} \quad (2.14)$$

2.2 Розробка методики експериментального визначення висоти центру мас транспортного засобу

Повний опис інерційних характеристик транспортного засобу неможливий без визначення вертикальної координати центру мас (Z_{CM}). Цей параметр є визначальним для оцінки поперечної стійкості проти перекидання та динаміки перерозподілу навантажень при гальмуванні й розгоні. Оскільки пряме зважування для визначення вертикальної координати неможливе, застосовується метод статичного нахилу (тангажу), який реалізується у два етапи.

На першому етапі транспортний засіб знаходиться в горизонтальному положенні. За результатами вимірювань, отриманих у попередніх пунктах, фіксуються базові параметри: P_{total} — повна вага транспортного засобу; P_{rear} — сумарне навантаження на задню вісь у горизонтальному положенні; L_{base} — колісна база (відстань між осями).

З умови рівноваги моментів відносно точки контакту передніх коліс визначається момент від сили тяжіння, який урівноважує реакцію задньої опори:

$$P_{total} \cdot Y_{CM} = P_{rear} \cdot L_{base} \quad (2.15)$$

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звідси поздовжня координата центру мас (Y_{CM}), тобто відстань від передньої осі до проекції ЦМ на площину:

$$Y_{CM} = \frac{P_{rear} \cdot L_{base}}{P_{total}} \quad (2.16)$$

На другому етапі передня вісь автомобіля встановлюється на підвищення висотою h , тоді як задня вісь залишається на вимірювальній платформі (рівень землі). Внаслідок підйому корпус автомобіля нахилиється на кут α , що призводить до зміщення вектора сили тяжіння назад відносно точок опори.

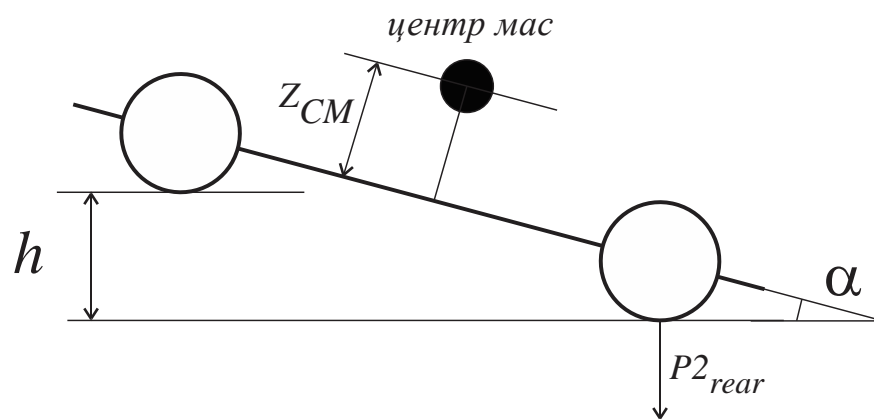


Рисунок 2.4– Розташування платформи для вимірювання вертикальної складової центру мас

Датчиками фіксується нове, змінене значення навантаження на задню вісь — $P2_{rear}$. Очевидно, що $P2_{rear} > P_{rear}$, оскільки центр мас зміщується в бік задньої осі.

Складемо рівняння рівноваги моментів сил відносно точки контакту передніх коліс (піднятих на висоту h). У проекції на горизонтальну площину система врівноважується під дією моменту від нової реакції задньої опори $P2_{rear}$ та моменту від сили тяжіння P_{total} .

Рівняння моментів має вигляд:

$$P2_{rear} \cdot L_{proj} - P_{total} \cdot X_{2CM} = 0 \quad (2.17)$$

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: $L_{proj} = L_{base} \cdot \cos(\alpha) = \sqrt{L_{base}^2 - h^2}$ — горизонтальна проекція колісної бази; X_{2CM} — горизонтальне плече сили тяжіння відносно передньої осі в нахиленому стані.

Плече сили тяжіння X_{2CM} залежить як від поздовжньої координати Y_{CM} , так і від шуканої висоти Z_{CM} :

$$X_{2CM} = Y_{CM} \cdot \cos(\alpha) + Z_{CM} \cdot \sin(\alpha) \quad (2.18)$$

Підставимо цей вираз у рівняння моментів:

$$P_{2rear} \cdot (L_{base} \cdot \cos(\alpha)) = P_{total} \cdot (Y_{CM} \cdot \cos(\alpha) + Z_{CM} \cdot \sin(\alpha)) \quad (2.19)$$

Розділимо обидві частини рівняння на $\cos(\alpha)$, враховуючи, що

$$\tan(\alpha) = \frac{h}{\sqrt{L_{base}^2 - h^2}} : \quad (2.20)$$

$$P_{2rear} \cdot L_{base} = P_{total} \cdot Y_{CM} + P_{total} \cdot Z_{CM} \cdot \tan(\alpha) \quad (2.21)$$

З першого етапу ми знаємо, що $P_{total} \cdot Y_{CM} = P_{rear} \cdot L_{base}$. Підставимо це значення:

$$P_{2rear} \cdot L_{base} = P_{rear} \cdot L_{base} + P_{total} \cdot Z_{CM} \cdot \frac{h}{\sqrt{L_{base}^2 - h^2}} \quad (2.22)$$

Перенесемо доданки з L_{base} в ліву частину:

$$L_{base} \cdot (P_{2rear} - P_{rear}) = P_{total} \cdot Z_{CM} \cdot \frac{h}{\sqrt{L_{base}^2 - h^2}} \quad (2.23)$$

Виразивши Z_{CM} , отримуємо кінцеву формулу для розрахунку висоти центру мас:

$$Z_{CM} = \frac{L_{base} \cdot (P_{2rear} - P_{rear}) \cdot \sqrt{L_{base}^2 - h^2}}{P_{total} \cdot h} \quad (2.24)$$

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримана залежність дозволяє визначити вертикальну координату центру мас, базуючись на різниці навантажень на задню вісь ($\Delta P = P_{2_{rear}} - P_{rear}$), що виникає при нахилі автомобіля. Точність методу прямо залежить від величини підйому h та точності вимірювання ваги, оскільки зміна навантаження ΔP зазвичай є невеликою величиною відносно загальної ваги.

2.2.1 Обґрунтування вимог до роздільної здатності вимірювальної системи для вимірювання вертикальної координати центру мас

Визначення центру мас автомобіля в горизонтальній площині не викликає принципових труднощів і виконується шляхом послідовного зважування осей. Однак для знаходження вертикальної координати центру мас потрібна додаткова інформація, яку можна отримати геометричним способом.

Суть методу полягає в тому, що одну з осей автомобіля піднімають на певну висоту, створюючи нахил. При цьому змінюється розподіл ваги між осями, і з величини цієї зміни можна розрахувати висоту центру мас над поверхнею. Для практичної реалізації обрано висоту підйому 10 см, оскільки таку величину значно простіше забезпечити технічно порівняно з більшими значеннями.

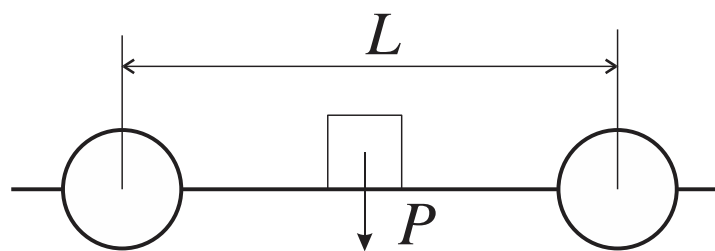


Рисунок 2.5– Схематичне позначення положення ваги у двохвісному автомобілі на горизонтальній поверхні

Розглянемо типовий легковий автомобіль з базою 4 метри і колією 2.5 метра. Для оцінки необхідної точності системи візьмемо тестовий вантаж

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

масою 100 кг, розміщений на підлозі кузова автомобіля, тобто на висоті приблизно 30 см від поверхні зважування.

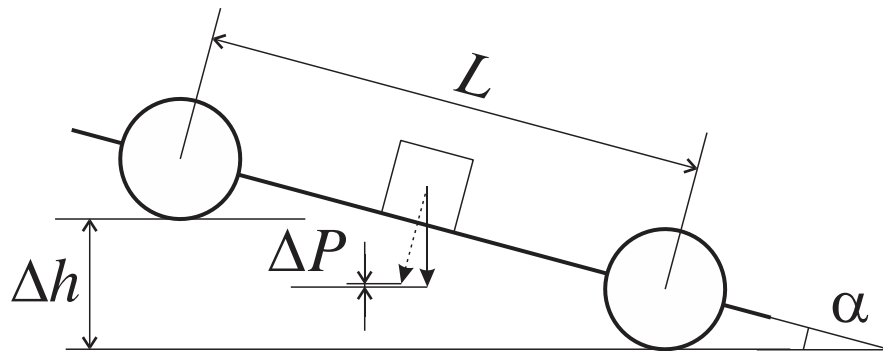


Рисунок 2.6— Схематичне позначення найнижчого положення ваги на підлозі автомобіля

Коли одна вісь піднімається на висоту Δh при базі автомобіля L , виникає кут нахилу α , який визначається як:

$$\tan(\alpha) = \frac{\Delta h}{L} \quad (2.25)$$

Підставляючи значення $\Delta h = 0.1$ м і $L = 4$ м, отримуємо:

$$\tan(\alpha) = \frac{0.1}{4} = 0.025 \quad (2.26)$$

Це відповідає куту приблизно 1.43 градуса.

При такому нахилі вантаж створює додаткову силу вздовж нахилу. Для малих кутів синус кута приблизно дорівнює тангенсу, тому можна записати $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha) = 0.025$.

Зміна навантаження на вісь при нахилі визначається через момент сил. Для вантажу масою m , розміщеного на висоті h від поверхні зважування, зміна навантаження на одну з осей становить:

$$\Delta P = \frac{m \cdot h \cdot \sin(\alpha)}{L} \quad (2.27)$$

Підставляючи $m = 100$ кг, $h = 0.3$ м, $\sin(\alpha) \approx 0.025$ і $L = 4$ м, отримуємо:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P = \frac{100 \cdot 0.3 \cdot 0.025}{4} = 0.1875 \text{ кг} \quad (2.28)$$

Таким чином, зміна навантаження становить приблизно 190 грам.

Це і є той сигнал, який треба виміряти. Вантаж в 100 кг при нахилі на 10 см змінює показання ваги на осях приблизно на 190 грам. Саме цю різницю має зафіксувати вимірювальна система.

Згідно з загальноприйнятими вимогами до вимірювальних систем, похибка вимірювання має бути принаймні втричі меншою за величину вимірюваного ефекту. Це правило забезпечує достатню статистичну достовірність результату і дозволяє впевнено відрізнити реальну зміну від випадкових флуктуацій та систематичних похибок.

Виходячи з цього критерію, необхідна роздільна здатність датчика визначається як:

$$\sigma_{required} = \frac{\Delta P}{3} \quad (2.29)$$

Підставляючи $\Delta P = 0.19$ кг, отримуємо:

$$\sigma_{required} = \frac{0.19}{3} \approx 0.063 \text{ кг} \quad (2.30)$$

Це становить приблизно 60 грам. З урахуванням технічних реалій та необхідного запасу надійності, доцільно встановити вимогу до роздільної здатності на рівні 100 грам, що забезпечує коефіцієнт запасу близько 1.5.

Таким чином, використання датчиків з роздільною здатністю 100 грам дозволить надійно фіксувати зміни навантаження порядку 200 грам і більше, що забезпечить можливість визначення вертикальної координати центру мас для типових легкових автомобілів при підйомі осі на технічно прості для реалізації 10 см.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2 Вибір способу розташування датчиків ваги

Найпростішим рішенням для вимірювання ваги до 5 тонн було б використання одного потужного тензометричного датчика відповідного діапазону. Однак такий підхід має принципове обмеження, пов'язане з фізичними властивостями матеріалів.

Тензометричні датчики працюють на основі вимірювання деформації пружного елемента під навантаженням. Для датчика на 5 тонн пружний елемент має бути достатньо масивним і жорстким, щоб витримувати таке навантаження без пластичної деформації. Але саме ця жорсткість стає проблемою для точного вимірювання.

Метали мають внутрішню мікроструктуру, що складається з кристалічних зерен. При навантаженні ці зерна взаємодіють між собою через межі зерен, створюючи внутрішнє тертя. Це явище призводить до механічного гістерезису - ситуації, коли деформація при навантаженні відрізняється від деформації при розвантаженні для однакового значення сили. Для масивних елементів, розрахованих на великі навантаження, ці ефекти стають помітними.

Крім того, відносна деформація пружного елемента датчика на 5 тонн при навантаженні в 100 грам становить лише:

$$\varepsilon = \frac{100}{5000000} = 2 \times 10^{-5} \quad (2.31)$$

Така мала деформація знаходиться на межі чутливості тензорезисторів і сильно залежить від температури, механічного гістерезису та інших факторів. Типова роздільна здатність серійних датчиків становить 0.02-0.01% від номінального діапазону, що для датчика на 5 тонн дає:

$$\sigma = 5000 \times 0.0001 = 0.5 \text{ кг} \quad (2.32)$$

Це в 5 разів гірше за необхідні 100 грам.

Альтернативним підходом є використання множини датчиків меншого діапазону. Якщо взяти датчик на 500 кг, його роздільна здатність становитиме:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{500} = 500 \times 0.0001 = 0.05 \text{ кг} = 50 \text{ г} \quad (2.33)$$

Це вже близько до необхідного значення. Використовуючи десять таких датчиків, отримуємо сумарний діапазон:

$$P_{\max} = 10 \cdot 500 = 5000 \text{ кг} \quad (2.34)$$

При цьому кожен датчик працює в своєму оптимальному діапазоні, де механічний гістерезис мінімальний, а відносна деформація достатньо велика для стабільного вимірювання.

Важливо, що при такій схемі вимірюється не просто сумарна вага, а розподіл навантаження вздовж балки. Це дає додаткову інформацію про положення центру мас і дозволяє використовувати методи математичної обробки для підвищення точності. Якщо профіль навантаження апроксимується фізично обґрунтованою функцією вигину балки, то випадкові похибки окремих датчиків частково компенсуються, оскільки всі точки вимірювання мають бути узгоджені з цією функцією.

Таким чином, використання множини датчиків меншого діапазону замість одного потужного датчика обумовлено не лише досягненням необхідної роздільної здатності, але й фундаментальними обмеженнями, пов'язаними з механічними властивостями матеріалів при великих навантаженнях.

2.2.3 Конфігурація системи вимірювання ваги і відстані між колесами

Датчики розміщуються під балкою, на якій безпосередньо знаходяться колеса автомобіля. Ключовою особливістю конструкції є те, що між балкою і кожним датчиком встановлюється пружний елемент.

На перший погляд, введення пружин у вимірювальну систему виглядає контрпродуктивно. Пружини мають власний механічний гістерезис, вносять

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додаткову нелінійність і знижують жорсткість системи. Однак детальний аналіз показує, що цей підхід має важливі переваги, які переважають недоліки.

Коли автомобіль заїжджає на балку, навантаження розподіляється нерівномірно. У найгіршому випадку колесо може опинитися безпосередньо над одним із датчиків. Якщо балка жорстко спирається на датчики, то локальне навантаження в цій точці може значно перевищувати середнє значення.

Розглянемо ситуацію з десятьма датчиками, рівномірно розташованими під балкою довжиною 3 метри. Відстань між сусідніми датчиками становить 0.33 метра. Коли колесо з навантаженням 2500 кг опиняється точно над одним датчиком, для жорсткої балки більша частина цього навантаження передається саме на цей датчик.

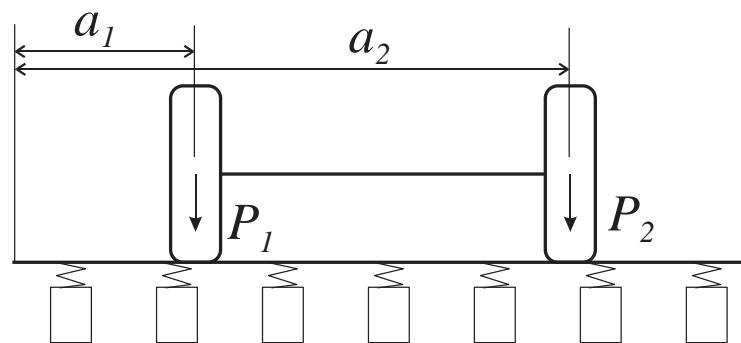


Рисунок 2.7– Визначення координат коліс на вимірювальній балці

Для оцінки розподілу навантаження можна використати принцип суперпозиції впливових функцій. Для балки на жорстких опорах сила на опорі під точковим навантаженням залежить від жорсткості балки, але для типових сталевих балок основна частина навантаження - від 60% до 80% - припадає на найближчу опору.

Це означає, що датчик на 500 кг може отримати навантаження:

$$F_{local} = 2500 \times 0.7 = 1750 \text{ кг} \quad (2.35)$$

Це в 3.5 рази перевищує номінал датчика і призведе до його пошкодження або виходу з ладу.

Введення пружин принципово змінює ситуацію. Коли балка спирається на пружини однакової жорсткості, навантаження розподіляється більш

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівномірно. Пружина під точкою максимального навантаження стискається сильніше, але при цьому частина навантаження передається на сусідні пружини через згин балки.

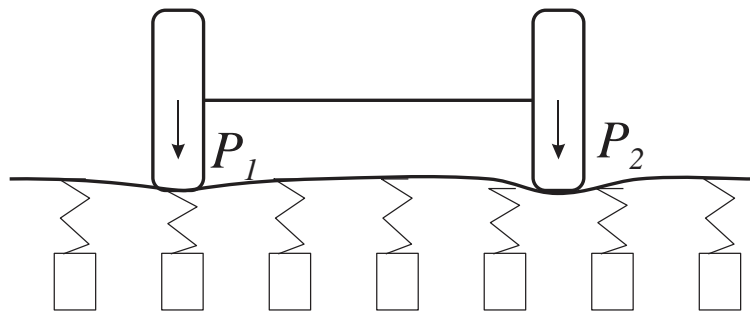


Рисунок 2.8– Спосіб вирівнювання зусилля на множину датчиків пружинними демпферами

Ступінь перерозподілу залежить від співвідношення жорсткості балки та жорсткості пружин. Якщо позначити жорсткість кожної пружини як k , а жорсткість балки на згин як EI , то ефективність перерозподілу характеризується безрозмірним параметром:

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{k \cdot a}{4 \cdot EI}}, \quad (2.36)$$

де a - відстань між пружинами.

Для м'якіших пружин (менше k) параметр λ менший, і навантаження розподіляється на більшу кількість опор. Фізично це означає, що балка "провисає" на більшій довжині, залучаючи більше пружин до підтримки навантаження.

При правильному виборі жорсткості пружин навантаження від одного колеса розподіляється на 3-4 сусідні датчики замість концентрації на одному. Це знижує пікове навантаження на окремий датчик до прийнятних меж.

2.2.4 Профіль вигину як джерело інформації

Водночас, пружини дозволяють балці вигинатися під навантаженням, і цей вигин несе корисну інформацію про розподіл ваги. Кожен датчик вимірює

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

силу, яка пропорційна локальному прогину балки в точці його розташування. Сукупність цих вимірювань дає профіль вигину.

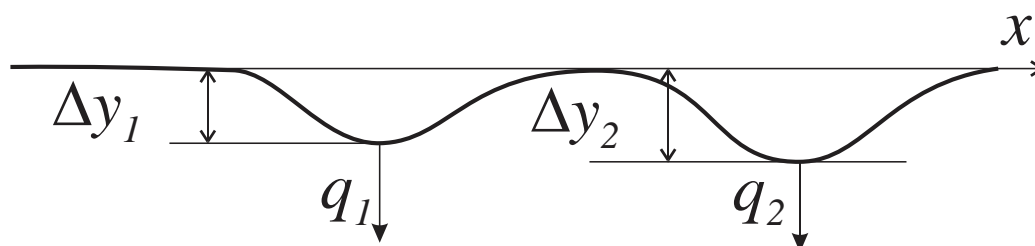


Рисунок 2.9– Формування профілю вигину балки

Форма вигину балки на пружинній основі описується диференціальним рівнянням четвертого порядку:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_{foundation} \cdot y(x) = q(x) \quad (2.37)$$

де $y(x)$ - прогин балки в точці x , $q(x)$ - розподілене навантаження, $k_{foundation}$ - жорсткість пружинної основи на одиницю довжини.

Для дискретних пружин це рівняння модифікується, але суть залишається - форма вигину однозначно пов'язана з розподілом навантаження.

Якщо на балці знаходяться два колеса автомобіля з силами P_1 і P_2 в точках a_1 і a_2 , то профіль прогину є суперпозицією впливів від кожного колеса. Маючи N вимірювань прогину в точках розташування датчиків, можна розв'язати обернену задачу - визначити величини P_1 , P_2 та їх координати a_1 , a_2 .

Це класична задача ідентифікації параметрів, яка має однозначне рішення при достатній кількості точок вимірювання. Для чотирьох невідомих (P_1 , P_2 , a_1 , a_2) теоретично достатньо чотирьох датчиків, але практично використовується їх більше для підвищення надійності та зменшення впливу шумів.

2.3 Розрахунок геометричних параметрів вимірювальної балки

Ключовим завданням при проектуванні конструкції Smart Beam є забезпечення безпеки тензометричних датчиків при збереженні точності

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювань. Вихідні умови ставлять суперечливі вимоги: на балку діє точкове навантаження від колеса $P_{\max} = 2500$ кг, тоді як гранично допустиме навантаження на один датчик становить $F_{\lim} = 450$ кг.

Це означає, що конструкція балки повинна забезпечити перерозподіл зусилля від одного колеса мінімум на 5-6 сусідніх датчиків ($2500 / 450 = 5.5$), щоб жоден з них не вийшов з ладу. Це досягається шляхом підбору правильної згинальної жорсткості балки (EI).

Розглянемо балку як нескінченну пластину на пружній основі. Здатність балки "розмазувати" гострий пік навантаження описується довжиною пружної деформації (characteristic length) L_e :

$$L_e = 4 \sqrt{\frac{4EI}{k_{dist}}} \quad (2.38)$$

де: E — модуль пружності матеріалу (для сталі $E \approx 2.1 \cdot 10^5$ МПа = $2.1 \cdot 10^{10}$ кг/м²); I — момент інерції перерізу балки (залежить від форми та товщини); k_{dist} — розподілена жорсткість основи (сумарна жорсткість датчиків/пружин на метр довжини).

Для того, щоб задіяти $N = 5$ датчиків, пляма контакту (зона прогину) повинна бути ширшою за відстань між цими датчиками. Емпіричне правило для безпечного навантаження вимагає, щоб коефіцієнт розподілу λ (обернений до L) забезпечував затухання сили на сусідніх датчиках не надто різко.

Максимальна реакція опори R_{\max} (на датчику безпосередньо під колесом) у такій системі наближено дорівнює:

$$R_{\max} \approx \frac{P \cdot \Delta x}{2 \cdot L_e}, \quad (2.39)$$

де Δx — крок встановлення датчиків. Прийmemo крок датчиків $\Delta x = 0.3$ м (30 см, що дає 10 датчиків на 3 м).

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ми маємо умову: $R_{\max} = 450$ кг. Підставимо значення ($P = 2500, R_{\max} = 450$):

$$450 \geq 2500 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot L_e}, L_e \geq \frac{2500 \cdot 0.3}{2 \cdot 450} \approx 0.83 \quad (2.40)$$

Це означає, що характеристична довжина вигину балки має бути мінімум у 2.5 рази більшою за крок датчиків. Тоді необхідна довжина розподілу:

$$L_e \geq 0.83 \text{ м}$$

Тепер знайдемо необхідну жорсткість балки $E \cdot I$. Виразимо I з формули довжини пружної деформації:

$$I = \frac{L_e^4 \cdot k_{dist}}{4E} \quad (2.41)$$

Важливий нюанс про жорсткість опор (k_{dist}), якщо поставити датчики "метал-до-металу", їх жорсткість буде колосальною ($k \rightarrow \infty$), і балка, якою б товстою вона не була, не зможе розподілити вагу. Необхідно використати гумові демпфери або поліуретанові прокладки під датчиками.

Припустимо, ми використовуємо прокладки жорсткістю $k_{sensor} = 1500$ кг/мм = $1.5 \cdot 10^6$ кг/м.

При кроці 0.3 м розподілена жорсткість:

$$k_{dist} = \frac{k_{sensor}}{\Delta x} = \frac{1.5 \cdot 10^6}{0.3} = 5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \quad (2.42)$$

Підставимо у формулу моменту інерції:

$$I = \frac{0.83^4 \cdot 5 \cdot 10^6}{4 \cdot 2.1 \cdot 10^{10}} \approx \frac{0.47 \cdot 5 \cdot 10^6}{8.4 \cdot 10^{10}} \approx 2.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4 \quad (2.43)$$

Переведемо в см⁴: $I \approx 2800 \text{ см}^4$.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Маючи цільовий момент інерції $I_x \approx 2800 \text{ см}^4$, підберемо переріз зі стандартного металопрокату (наприклад, прямокутна профільна труба або двотавр).

Вибір геометричних параметрів балки базується на необхідності забезпечення компромісу між точністю вимірювання координати навантаження та безпекою тензометричних датчиків. Розрахункова модель передбачає, що при наїзді колеса вагою 2,5 тонни зусилля має розподілятися таким чином, щоб пікове навантаження на один датчик не перевищувало 450 кг (90% від номіналу). Для досягнення такого розподілу цільовий момент інерції перерізу (I_x) було визначено на рівні приблизно 2800 см^4 . Аналіз стандартного металопрокату показав, що оптимальним варіантом, який задовольняє розрахункову умову, виявилася профільна труба перерізом $180 \times 180 \times 8 \text{ мм}$ ($I_x \approx 2800 \text{ см}^4$) або двотавр №22. Такий профіль забезпечує необхідну жорсткість для захисту електроніки, зберігаючи при цьому достатню еластичність для формування вимірюваного прогину. Конструкція вимірювального вузла також передбачає використання демпфуючих елементів. Встановлення армованих гумових прокладок товщиною 10–20 мм між балкою та сенсорами дозволяє компенсувати залишкову жорсткість металу. Саме поєднання сталевого профілю з моментом інерції близько 2800 см^4 та піддатливої опори трансформує точковий удар колеса у плавну хвилю деформації, параметри якої безпечні для датчиків і достатні для коректної роботи математичного алгоритму.

2.4 Розробка алгоритму пошуку координат коліс і сили їх натиску

2.4.1 Математична модель прямої задачі

Для відновлення параметрів навантаження (величини сили P та її координати a) необхідно побудувати пряму модель: як саме деформується балка під дією точкової сили. Диференціальне рівняння рівноваги балки на

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пружній основі має четвертий порядок. Розв'язком цього рівняння для зосередженої сили P у нескінченно довгій балці є функція Гріна (або функція впливу). Вона описує форму прогину, яка має вигляд затухаючих коливань. Для дискретних точок розташування датчиків x_i теоретичне зусилля $f(x_i)$ визначається як:

$$f(x_i; P, a) = P \cdot \Omega(x_i - a), \quad (2.44)$$

де $\Omega(x_i - a)$ — нормована функція форми. Її аналітичний вигляд визначається характеристичним параметром $\lambda = \sqrt[4]{k/4Ei}$, який описує швидкість затухання хвилі деформації:

$$\Omega(z) = e^{-\lambda|z|} (\cos[\lambda|z|] + \sin[\lambda|z|]). \quad (2.45)$$

Ця функція є ключовою для нашого методу. Вона показує, що датчик, розташований на відстані z від колеса, відчуває силу, яка експоненційно зменшується з відстанню, але також має осцилюючу складову. Саме ця специфічна форма кривої ("підпис" навантаження) дозволяє алгоритму відрізнити корисний сигнал від шуму і точно визначити координату навантаження навіть між датчиками.

2.4.2 Формулювання оберненої задачі для пошуку ваги і положення коліс на вимірювальні балці за розподіленими вагами

Маючи набір вимірних значень F_i з датчиків, ми ставимо задачу знайти такі значення P та a , які мінімізують розбіжність між експериментальними даними та теоретичною моделлю. В якості критерію оптимальності обирається функціонал найменших квадратів (Loss Function):

$$S(P, a) = \sum_{i=1}^N [F_i - P \cdot \Omega(x_i - a)]^2 \quad (2.46)$$

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки координата a входить у функцію Ω нелінійно (під знаками експоненти та тригонометричних функцій), аналітичного розв'язку для мінімуму цього функціоналу не існує. Необхідно застосувати ітераційні чисельні методи. Найбільш ефективним для цього класу задач є алгоритм Гаусса-Ньютона, який забезпечує квадратичну швидкість збіжності поблизу мінімуму.

2.4.3 Алгоритмічна реалізація зворотньої задачі

Суть методу полягає у заміні складної нелінійної поверхні функціоналу квадратичною апроксимацією в околі поточної точки наближення (P_k, a_k) . Ми розкладаємо теоретичну функцію $f(x_i; P, a)$ в ряд Тейлора, обмежуючись лінійними членами. Це вимагає обчислення градієнта функції відгуку по шуканих параметрах.

Похідна по параметру ваги P є тривіальною, оскільки вага входить у рівняння лінійно. Вона просто дорівнює значенню функції форми в точці датчика:

$$J_P^{(i)} = \frac{\partial f}{\partial P} = \Omega(x_i - a_k) \quad (2.47)$$

Похідна по координаті a є складнішою і вимагає диференціювання функції Ω по внутрішньому аргументу. Використовуючи ланцюгове правило та властивості похідних експоненти й тригонометричних функцій, отримуємо вираз для чутливості i -го датчика до зміни положення вантажу:

$$J_a^{(i)} = \frac{\partial f}{\partial a} = P_k \frac{d\Omega}{dz} \frac{dz}{da} = 2\lambda P_k e^{-\lambda|x_i - a_k|} \sin(\lambda|x_i - a_k|) \cdot \text{sgn}(x_i - a_k) \quad (2.48)$$

Знак $\text{sgn}(x_i - a_k)$ вказує на напрямок зміни сили: якщо вантаж наближається до датчика, сила зростає, якщо віддаляється — спадає.

На кожній ітерації k ми формуємо систему нормальних лінійних рівнянь відносно приростів параметрів $\Delta P, \Delta a$. Матриця цієї системи H (наближений

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гессіан) складається зі сум добутків частинних похідних (Якобіанів) по всіх датчиках:

$$H = \begin{pmatrix} \sum (J_P^{(i)})^2 & \sum J_P^{(i)} J_a^{(i)} \\ \sum J_P^{(i)} J_a^{(i)} & \sum (J_a^{(i)})^2 \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

Вектор вільних членів b формується як зважена сума нев'язок $r_i = F_i - f_{theory}(x_i)$:

$$b = \begin{pmatrix} \sum J_P^{(i)} \cdot r_i \\ \sum J_a^{(i)} \cdot r_i \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

Рекурентна формула перерахунку параметрів для переходу до $(k+1)$ -ї ітерації отримується шляхом розв'язання цієї системи лінійних рівнянь (наприклад, методом Крамера або матричного обернення) і додавання знайдених приростів до попередніх значень:

$$\begin{pmatrix} P_{k+1} \\ a_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_k \\ a_k \end{pmatrix} + H^{-1} \cdot b \quad (2.51)$$

Цей ітераційний процес продовжується до виконання критерію збіжності (коли прирост координати стає меншим за задану похибку, наприклад, 10^{-4} м). Фізичний зміст цього математичного процесу полягає у "підгонці" теоретичного дзвоноподібного профілю під реальну гістограму сил, отриману з датчиків.

Важливість такого підходу полягає в його інтегральному характері. Випадкова похибка одного датчика (шум, гістерезис пружини) лише незначно впливає на загальну суму квадратів нев'язок і, відповідно, мало спотворює фінальний результат. Система стає робастною: вона використовує інформацію з усіх активних датчиків одночасно, фактично реалізуючи статистичне усереднення в реальному часі. Пружини, які спочатку здавалися недоліком через внесення невизначеності, у поєднанні з цим алгоритмом дозволяють

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягти надвисокої роздільної здатності позиціонування (sub-pixel resolution), оскільки ми відновлюємо неперервну координату з дискретних відліків, спираючись на гладку фізичну модель деформації балки.

2.4.4 Методика обробки даних та алгоритм ідентифікації навантаження

Програмне забезпечення системи базується на розв'язанні оберненої задачі механіки деформівного твердого тіла. Головною метою алгоритму є відновлення параметрів навантаження (ваги P_1 , P_2 та координат a_1 , a_2 двох осей транспортного засобу) на основі дискретного набору вимірювань реакцій опор F^{meas} .

Обчислювальний процес складається з трьох послідовних етапів: формування прямої математичної моделі, евристичної ініціалізації параметрів та ітераційного уточнення розв'язку методом Гаусса-Ньютона.

В основу розрахунків закладено аналітичну модель балки на пружній основі (модель Вінклера). Припускається, що реакція системи є лінійною, що дозволяє застосувати принцип суперпозиції.

Реакція окремого сенсора в точці x на одиничне навантаження, прикладене в точці a , описується функцією загасаючої хвилі:

$$\Phi(x, a) = e^{-\lambda|x-a|} (\cos(\lambda|x-a|) + \sin(\lambda|x-a|)) \quad (2.52)$$

де λ — характеристичний параметр системи, що залежить від жорсткості балки та пружних елементів (визначається на етапі калібрування).

Модель повного відгуку:

Теоретичне значення сигналу на i -му датчику Y_i для двох зосереджених сил визначається як сума впливів від кожної з них:

$$Y_i(\Theta) = P_1 \cdot \Phi(x_i, a_1) + P_2 \cdot \Phi(x_i, a_2) \quad (2.53)$$

де $\Theta = [P_1, a_1, P_2, a_2]^T$ — вектор шуканих параметрів.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки задача є нелінійною і цільова функція може мати кілька локальних мінімумів, критично важливим є вибір коректного початкового наближення. Алгоритм повинен реалізувати евристичну процедуру послідовного пошуку піків:

Пошук першої осі: У масиві вимірювань визначається глобальний максимум. Його амплітуда та координата відповідного датчика приймаються за початкові наближення $P_1^{(0)}$ та $a_1^{(0)}$.

Вирахування впливу (Residual Extraction): З вихідного масиву даних віднімається теоретичний профіль, згенерований першою знайденою силою.

Пошук другої осі: У масиві залишків (після вирахування першого піку) знову шукається максимум, параметри якого стають $P_2^{(0)}$ та $a_2^{(0)}$.

Сепарація: Якщо координати знайдених піків співпадають або знаходяться надто близько (менше критичної відстані), алгоритм повинен штучно рознести початкові координати (наприклад, ± 0.5 м), щоб уникнути сингулярності на першому кроці ітерацій.

Основний обчислювальний цикл реалізує метод найменших квадратів для мінімізації різниці між теоретичною моделлю та реальними даними. На кожній ітерації k виконуються наступні кроки:

Крок 3.1. Розрахунок вектору нев'язок (r):

Для кожного датчика обчислюється відхилення поточної моделі від вимірів:

$$r_i = F_i^{meas} - Y_i(\Theta^{(k)}) \quad (2.54)$$

Крок 3.2. Формування матриці чутливості (Матриці Якобі)

Матриця Якобі J (або матриця похідних) є ключовим елементом методу Гаусса-Ньютона. Вона виконує роль "навігаційної карти" для алгоритму: показує, як саме зміниться сигнал на кожному з 10 датчиків, якщо ми мікроскопічно змінимо вагу або положення кожного колеса.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки система складається з $N = 10$ точок вимірювання (рядки) і ми шукаємо $M = 4$ параметри (P_1, a_1, P_2, a_2 — стовпці), матриця J має розмірність 10×4 .

В загальному вигляді для k -ї ітерації матриця виглядає так:

$$\mathbf{J}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x_1)}{\partial P_1} & \frac{\partial f(x_1)}{\partial a_1} & \frac{\partial f(x_1)}{\partial P_2} & \frac{\partial f(x_1)}{\partial a_2} \\ \frac{\partial f(x_2)}{\partial P_1} & \frac{\partial f(x_2)}{\partial a_1} & \frac{\partial f(x_2)}{\partial P_2} & \frac{\partial f(x_2)}{\partial a_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f(x_{10})}{\partial P_1} & \frac{\partial f(x_{10})}{\partial a_1} & \frac{\partial f(x_{10})}{\partial P_2} & \frac{\partial f(x_{10})}{\partial a_2} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

де $f(x_i)$ — функція теоретичного відгуку i -го датчика.

Кожен стовпчик матриці відповідає за чутливість до конкретного параметра. Розглянемо детально, як обчислюються елементи для довільного i -го датчика (тобто i -й рядок матриці).

1. Перший стовпчик: Чутливість до ваги першого колеса (∂P_1)

Цей елемент показує, наскільки зміниться показ датчика, якщо вага P_1 зросте на одиницю. Оскільки залежність від ваги лінійна, похідна дорівнює значенню функції форми в точці датчика:

$$J_{i,1} = \Phi(x_i - a_1^{(k)}) = e^{-\lambda|d_1|} (\cos(\lambda|d_1|) + \sin(\lambda|d_1|)) \quad (2.56)$$

(де $d_1 = x_i - a_1^{(k)}$ — відстань від датчика до першого колеса)

2. Другий стовпчик: Чутливість до зміщення першого колеса (∂a_1)

Цей елемент показує, як зміниться сигнал, якщо колесо зсується вправо.

Це похідна складної функції. Вона залежить від поточної ваги колеса $P_1^{(k)}$ та крутизни схилу "хвилі" деформації в цій точці:

$$J_{i,2} = P_1^{(k)} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial a_1} = P_1^{(k)} \cdot \left[2\lambda e^{-\lambda|d_1|} \sin(\lambda|d_1|) \cdot \operatorname{sgn}(x_i - a_1^{(k)}) \right] \quad (2.57)$$

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(Функція sgn визначає знак: +1, якщо датчик праворуч від колеса, і -1, якщо ліворуч)

3. Третій стовпчик: Чутливість до ваги другого колеса (∂P_2)

Аналогічно першому стовпчику, але розраховується відносно координат другого колеса $a_2^{(k)}$:

$$J_{i,3} = \Phi(x_i - a_2^{(k)}) \quad (2.58)$$

4. Четвертий стовпчик: Чутливість до зміщення другого колеса (∂a_2)

Аналогічно другому стовпчику, але з параметрами другого колеса:

$$J_{i,4} = P_2^{(k)} \cdot \left[2\lambda e^{-\lambda|d_2|} \sin(\lambda|d_2|) \cdot \text{sgn}(x_i - a_2^{(k)}) \right] \quad (2.59)$$

Значення матриці інтерпритуються наступним чином.

– Якщо елемент близький до 0: Це означає, що датчик знаходиться далеко від колеса, і зміна параметрів цього колеса майже не впливає на цей датчик. У матриці буде багато близьких до нуля значень, оскільки вплив локалізований.

– Стовпці ∂a (2-й та 4-й): Мають характерну особливість — вони змінюють знак, коли датчик переходить через вершину горба навантаження. Зліва від колеса похідна від'ємна, справа — додатна (або навпаки, залежно від напрямку координат). Це саме та інформація, яка "підказує" алгоритму, в який бік треба рухати віртуальне колесо, щоб сумістити його з реальним піком.

Крок 3.3. Розв'язання системи нормальних рівнянь:

Для знаходження вектора поправок $\Delta\Theta$ розв'язується система лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$(J^T J) \cdot \Delta\Theta = J^T \cdot r \quad (2.60)$$

Ця операція дозволяє знайти напрямок і величину кроку, що найшвидше зменшує сумарну квадратичну похибку.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок 3.4. Оновлення параметрів та накладання обмежень:

Нові значення параметрів обчислюються за формулою:

$$\Theta^{(k+1)} = \Theta^{(k)} + \alpha \cdot \Delta\Theta \quad (2.61)$$

де α — коефіцієнт швидкості навчання ($0 < \alpha \leq 1$).

Після оновлення необхідно застосувати фізичні обмеження (Constraints):

Ваги P_1, P_2 повинні бути невід'ємними ($P \geq 0$).

Координати a_1, a_2 повинні знаходитись у межах фізичної довжини балки ($0 < a \leq L$).

Крок 3.5. Перевірка критерію зупинки:

Ітераційний процес завершується, якщо максимальна зміна параметрів на поточному кроці не перевищує заданої точності (наприклад, $|\Delta a| < 1$ мм) або досягнуто ліміту ітерацій.

Фінальні значення вектора Θ є результатом роботи алгоритму, що визначає вагу та положення осей транспортного засобу.

2.4.5 Обчислювальна реалізація

Для програмної реалізації на кожному кроці ітерації необхідно:

- Створити масив нулів розміром 10×4 .
- Запустити цикл по всіх 10 датчиках (і від 0 до 9).
- Для кожного рядка обчислити 4 значення за наведеними вище формулами, використовуючи поточні значення P_1, a_1, P_2, a_2 .
- Зберегти результат для подальшого множення $J^T J$.

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОЛОЖЕННЯМ ЦЕНТРУ ВАГИ АВТОМОБІЛЯ

3.1 Розробка структурної схема апаратного комплексу

Апаратна реалізація системи контролю завантаження базується на комплекті взаємопов'язаних компонентів, які забезпечують точне вимірювання механічних навантажень, їх перетворення в цифрові сигнали, обчислення ключових параметрів та наочну візуалізацію результатів. Вибір конкретних елементів визначається вимогами до точності, надійності, довговічності в умовах експлуатації під відкритим небом та економічної доцільності.

Первинними чутливими елементами системи є тензометричні датчики сили, відомі як вагові клітини. Для платформних ваг, призначених для динамічного або статичного зважування транспортних засобів, оптимальним рішенням є використання балочних датчиків на зсув, а не одноточкових. Конструктивно балочний датчик типу shear beam являє собою металеву балку прямокутного або двотаврового перерізу, на яку наклеєні тензорезистори. Принцип дії базується на вимірюванні деформації зсуву в основному матеріалі балки, що виникає при дії вертикальної сили. Тензорезистори, з'єднані у повний міст Уїтстона, фіксують цю деформацію. Ключова перевага таких датчиків для платформних конструкцій полягає в їхній високій стійкості до паразитних бокових навантажень і моментів. Оскільки автомобіль найжджає на платформу з можливим ексцентриситетом і створює не лише вертикальну силу, але й горизонтальні компоненти, датчик повинен їх компенсувати. Балочні датчики на зсув зазвичай мають конструктивні елементи, що обмежують сторонні переміщення, наприклад, стопорні болти або спеціальні площадки. Вони розраховані на значне перевантаження. Одноточкові датчики, хоча й універсальні та чутливі, більш схильні до впливу нецентрального навантаження і потребують ідеальної установки на абсолютно рівну поверхню,

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що важко забезпечити в умовах дорожнього покриття. Крім того, балочні датчики зазвичай мають високу клас захисту (IP67, IP68), що робить їх стійкими до вологи, пилу та коливань температур. Їх можна жорстко кріпити до фундаменту одним кінцем, а на інший вільний кінець прикладати навантаження через спеціальну опорну частину, що ідеально підходить для монтажу під кутом платформи або під несучою балкою системи Smart Beam. Це забезпечує стабільність нульових показань та повторюваність результатів.

Для перетворення аналогового сигналу від тензометричного мосту в цифровий код використовується спеціалізований аналого-цифровий перетворювач. Модулі на базі мікросхеми HX711 є стандартним вибором для таких завдань через їхню спеціалізацію, доступність і низьку вартість. HX711 містить два канали з програмованим підсилючем з коефіцієнтом посилення 32, 64 або 128. Це дозволяє безпосередньо підключати вихід тензометричного моста без додаткової аналогової обробки. Мікросхема забезпечує 24-бітне АЦП з частотою оновлення до 80 Гц, що забезпечує високу роздільну здатність і достатню швидкість для фіксації динамічних навантажень. Вона реалізує протокол зв'язку через дво-провідний інтерфейс, сумісний з лініями загального призначення мікроконтролера. Однак для промислових систем, що працюють у важких умовах, можуть розглядатися аналоги з вищим ступенем захисту, підвищеною точністю, вбудованими функціями лінійності та температурної компенсації, наприклад, AD7730 або спеціалізовані модулі від виробників вагового обладнання. Для кожної Smart Beam знадобиться два модулі HX711 (по одному на кожен датчик), а для всієї платформи – відповідна кількість, підключена до загальної шини даних мікроконтролера.

Центральним обчислювальним ядром системи виступає мікроконтролер. Критеріями вибору є наявність достатньої кількості апаратних портів для зв'язку з периферією, продуктивність для обчислення координат центру ваги в реальному часі, можливість обробки переривань з мінімальними затримками та наявність комунікаційних інтерфейсів. Розглядаються два типові варіанти:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроконтролери сімейства STM32 та ESP32. STM32, засновані на ядрі ARM Cortex-M, пропонують високу обчислювальну потужність, широкий вибір моделей з різною кількістю портів введення-виведення, таймерів і комунікаційних модулів (UART, SPI, I2C). Вони ідеально підходять для реалізації точного та детермінованого контролю за системою. Особливо важливою є їхня здатність обробляти зовнішні переривання від дискретних датчиків проїзду, що використовуються для вимірювання швидкості. Кожен такий датчик може бути підключений до окремої лінії, що генерує переривання по фронту. Мікроконтролер фіксує мітки часу з високою точністю за допомогою внутрішніх таймерів. Для керування LED-матрицею на базі WS2812 критично важливим є наявність апаратної підтримки протоколу NeoPixel через DMA та таймери, або ж можливість формування строгих часових затримок на рівні мікросекунд. Деякі моделі STM32 мають спеціалізовані периферійні пристрої для роботи з такими світлодіодами. З іншого боку, ESP32, крім потужного двоядерного процесора на базі Xtensa, має вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth. Це дозволяє реалізувати бездротову передачу даних на сервер або пульт оператора, що суттєво спрощує інсталяцію системи. Однак, для критично важливих завдань синхронізації та обробки переривань може знадобитися більш ретельне програмування через особливості його архітектури. Вибір між STM32 та ESP32 зводиться до компромісу між надійністю та детермінізмом (STM32) та зручністю бездротового інтерфейсу (ESP32). В будь-якому випадку, мікроконтролер повинен мати достатню кількість ліній для підключення всіх модулів АЦП, дискретних датчиків, LED-матриці та, можливо, додаткового дисплея або засобів зв'язку (GSM-модем, Ethernet).

Для індикації стану завантаження використовуються адресні світлодіоди WS2812 (або їх аналоги, такі як SK6812). Кожен такий світлодіод інтегрує в одному корпусі RGB-кристал та мікросхему управління, що дозволяє через один провідний послідовний інтерфейс керувати цілою матрицею. Матриця

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формується шляхом фізичного розташування світлодіодів у рядки та стовпці з послідовним електричним з'єднанням. Головна вимога до мікроконтролера тут – здатність генерувати строгий часовий протокол з високою частотою оновлення, щоб анімація або зміна кольору сприймалася плавно і без мерехтіння. Структурна схема апаратного комплексу в цілому має наступний вигляд: чотири тензометричні балочні датчики на зсув, встановлені під кутами вагової платформи (або по два на кожну балку Smart Beam), підключені до своїх модулів АЦП НХ711. Модулі НХ711 комунікують з мікроконтролером по дво-провідним лініям даних і такту. Дві смуги дискретних датчиків (п'єзо, індуктивні петлі або інфрачервоні бар'єри) для вимірювання швидкості підключені до ліній введення-виведення мікроконтролера, сконфігурованих на переривання по фронту. Світлодіодна матриця WS2812 підключається до одного виходного порту мікроконтролера.

Вся система живиться від стабілізованого джерела живлення 5В або 12В з подальшим перетворенням на необхідні напруги.

Апаратно-програмний комплекс системи контролю завантаження автомобілів побудований за ієрархічною трирівневою архітектурою, що відповідає класичній структурі промислових систем автоматизації. Така архітектура забезпечує чітке розділення функцій, спрощує масштабування системи та полегшує діагностику несправностей.

3.1.1 Архітектура системи

Система складається з трьох функціональних рівнів: рівня польового обладнання (Field Level), рівня управління (Control Level) та рівня людино-машинного інтерфейсу (HMI Level). Кожен рівень виконує специфічні функції та взаємодіє з суміжними рівнями через стандартизовані протоколи передачі даних.

Рівень польового обладнання представлений бездротовими вимірювальними платформами. Платформа є автономним вимірювальним

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модулем, що складається з несучої балки, множини тензометричних датчиків на пружних елементах, акселерометра для вимірювання кута нахилу, температурного сенсора та мікроконтролера з радіомодулем.

Платформа здійснює первинну обробку сигналів від датчиків, включаючи фільтрацію, усереднення та компенсацію температурного дрейфу. Обчислення ваги та координат центру мас виконується локально на мікроконтролері платформи з використанням калібрувальних коефіцієнтів, збережених у енергонезалежній пам'яті. Готові результати вимірювання передаються на рівень управління по радіоканалу.

Рівень управління реалізований на базі центрального контролера-шлюзу, який виконує функції координатора мережі вимірювальних платформ, агрегатора даних та інтерфейсу до зовнішніх систем. Контролер приймає дані від платформи, синхронізує вимірювання, обчислює інтегральні характеристики автомобіля (загальна маса, координати центру мас в тривимірному просторі, розподіл навантаження по осях) та приймає рішення про відповідність параметрів встановленим нормам.

Контролер також керує периферійними пристроями візуалізації та сигналізації. До його складу входить LED-матриця для графічного відображення положення центру мас у режимі реального часу, світлова сигналізація для індикації результатів вимірювання та звукова сигналізація для привертання уваги оператора у критичних ситуаціях.

Важливою функцією контролера є забезпечення сумісності з існуючими системами підприємства через промисловий інтерфейс Modbus RTU. Виміряні параметри відображаються у стандартизовані регістри протоколу Modbus, що дозволяє інтегрувати систему в SCADA-системи, MES та ERP без додаткового програмного забезпечення.

Рівень людино-машинного інтерфейсу складається з терміналу оператора, реалізованого на базі промислового сенсорного панельного комп'ютера або звичайного ПК з монітором та клавіатурою. Термінал

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує інтерфейс для введення супутньої інформації (номерні знаки автомобіля, тип транспортного засобу, номер рейсу), перегляду результатів вимірювань у числовому та графічному вигляді, налаштування параметрів системи та доступу до архіву вимірювань.

3.1.2 Розробка виду і напрямків потоків даних в системі

Функціонування системи базується на чотирьох основних потоках даних, що забезпечують передачу інформації між рівнями архітектури.

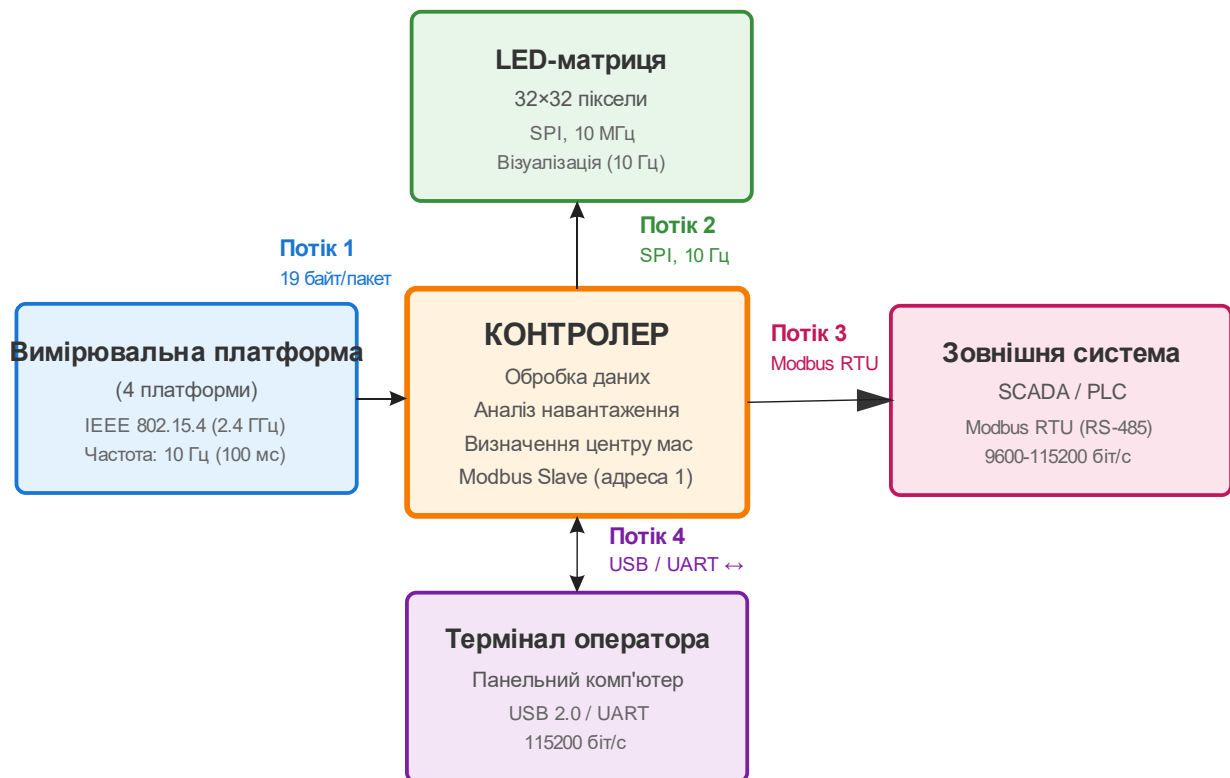


Рисунок 3.1– Структура потоків даних в системі вимірювання центру мас

Потік 1: Вимірювальна платформа → Контролер

Цей потік реалізує передачу первинних даних вимірювань від польового обладнання до центрального контролера. Фізичний рівень реалізований на базі радіоканалу стандарту IEEE 802.15.4 в діапазоні 2.4 ГГц. Використання бездротового з'єднання обумовлене необхідністю забезпечити мобільність платформ, оскільки в процесі вимірювання вони можуть переміщуватись та нахилятись.

Платформа передає пакет даних з фіксованою періодичністю 100 мс, що забезпечує оновлення інформації з частотою 10 Гц. Такої частоти достатньо для відстеження повільних процесів завантаження автомобіля, але недостатньо для виникнення надмірного навантаження на радіоканал.

Структура пакету даних включає наступні поля:

- Ідентифікатор платформи (1 байт) - унікальний номер, що дозволяє розрізнити джерела даних
- Виміряна вага (4 байти, float) - результат обчислення ваги з точністю до 0.01 кг
- Координата центру навантаження вздовж балки (4 байти, float) - положення в метрах від початку балки
- Кут нахилу платформи (4 байти, float) - два кути в градусах (нахил та крен)
- Температура (2 байти, signed int) - температура вимірювального блоку з точністю 0.1°C
- Напруга живлення (2 байти, unsigned int) - напруга акумулятора в мілівольтах
- Контрольна сума (2 байти, CRC-16) - для виявлення помилок передачі

Загальний розмір пакету становить 19 байт, що при швидкості передачі 250 кбіт/с забезпечує час передачі близько 0.6 мс. З урахуванням службових даних протоколу та міжпакетних інтервалів, повний час транзакції не перевищує 2 мс, що залишає достатній запас для одночасної роботи декількох платформ.

Контролер приймає пакети від платформи, перевіряє цілісність даних за контрольною сумою, відкидає пошкоджені пакети та формує зведену картину розподілу навантаження. Втрата окремих пакетів не критична, оскільки наступний пакет надходить через 100 мс. Якщо від платформи не надходить

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

даних протягом 1 секунди, контролер генерує попередження про втрату зв'язку.

Потік 2: Контролер → LED-матриця

Цей потік забезпечує візуалізацію положення центру мас в режимі реального часу. LED-матриця розміром 16×16 пікселі підключена до контролера через радіоканалу стандарту IEEE 802.15.4 в діапазоні 2.4 ГГц .

Контролер формує растрове зображення, де горизонтальна вісь відповідає поздовжній осі автомобіля, вертикальна - поперечній. Масштаб вибирається автоматично на основі габаритів автомобіля, введених оператором або визначених за базою даних типових транспортних засобів. Центр мас відображається яскравою точкою, колір якої залежить від відхилення від номінального положення: зелений - в межах норми, жовтий - близько до межі, червоний - вихід за допустимі межі.

Додатково на матриці відображаються контури автомобіля та допустимої зони розміщення центру мас, що дозволяє оператору візуально оцінити ситуацію без аналізу числових даних. Інформація оновлюється синхронно з надходженням даних від платформ, тобто з частотою 10 Гц.

Потік 3: Контролер → Зовнішня система

Інтеграція з зовнішніми системами реалізована через промисловий протокол Modbus RTU, який є де-факто стандартом в автоматизації. Фізичний рівень - інтерфейс RS-485, який забезпечує надійну передачу даних на відстані до 1200 метрів та стійкість до електромагнітних завад в промисловому середовищі.

Контролер виступає в ролі Modbus Slave пристрою з фіксованою адресою (типово адреса 1). Кожне вимірюване значення представлене у форматі IEEE 754 float і займає два 16-бітні регістри (старше слово в молодшій адресі, відповідно до big-endian порядку байтів). Це забезпечує точність представлення даних та сумісність з більшістю SCADA-систем.

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зовнішня система може опитувати контролер з довільною періодичністю, типово 1-2 секунди. Контролер підтримує одночасні з'єднання від декількох master-пристроїв за умови дотримання тайм-аутів між запитами. Час відповіді контролера не перевищує 50 мс, що відповідає вимогам стандарту Modbus.

Потік 4: Контролер ↔ Термінал оператора

Двосторонній обмін даними між контролером та терміналом оператора здійснюється через інтерфейс USB або UART залежно від типу терміналу. На відміну від протоколу Modbus, призначеного для машинного обміну даними, протокол взаємодії з терміналом оператора орієнтований на людино-машинний інтерфейс і включає передачу не тільки вимірювальних даних, але й текстової інформації, команд управління та діагностичних повідомлень.

Протокол базується на обміні JSON-пакетами, що забезпечує читабельність даних, простоту розширення функціоналу та незалежність від мови програмування клієнтського додатку. Кожен пакет містить поле типу повідомлення, мітку часу та корисне навантаження.

Контролер зберігає бібліотеку шаблонів типових транспортних засобів з їхніми характеристиками: кількість осей, база, колія, допустимі межі положення центру мас. При виборі шаблону ці параметри автоматично завантажуються в робочу конфігурацію.

3.2 Режими роботи системи

Система функціонує в декількох режимах, між якими здійснюються переходи за командами оператора або автоматично при виконанні певних умов.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

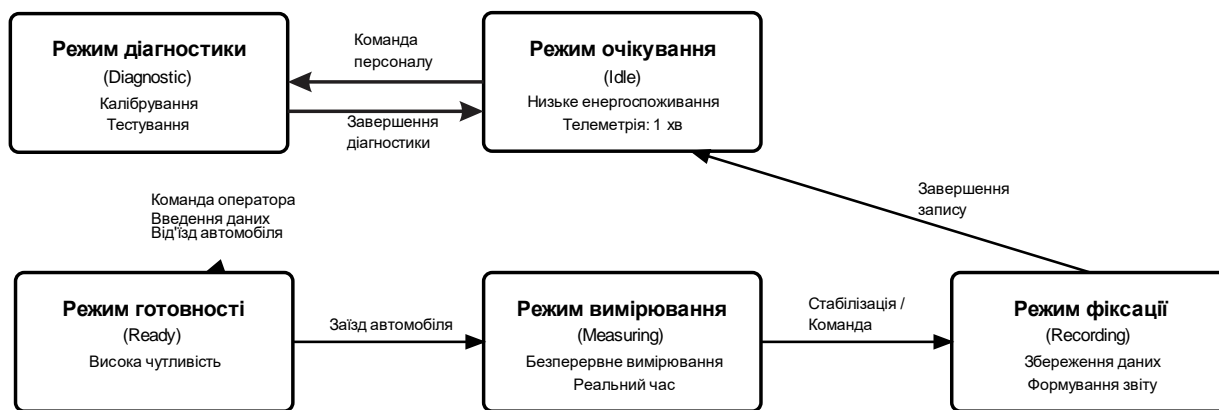


Рисунок 3.2– Діаграма станів роботи системи

Режим очікування (Idle): Платформа в режимі низького енергоспоживання, передають телеметрію з періодичністю 1 хвилина. Контролер моніторить наявність зв'язку з платформами та стан батарей. Візуалізація вимкнена або показує заставку.

Режим готовності (Ready): Оператор ініціював початок роботи, ввів дані про автомобіль. Платформи переходять у режим високої чутливості, частота опитування збільшується до 10 Гц. Система очікує на заїзд автомобіля, детектуючи появу навантаження на платформах.

Режим вимірювання (Measuring): Автомобіль знаходиться на платформах, відбувається безперервне вимірювання та обчислення параметрів. Результати відображаються в режимі реального часу на LED-матриці та терміналі оператора. Система контролює стабілізацію показань та сигналізує про готовність зафіксувати результат.

Режим фіксації результату (Recording): За командою оператора або автоматично при досягненні стабільності показань система фіксує фінальні значення, зберігає їх у базу даних з прив'язкою до метаданих автомобіля та формує звіт. Одночасно дані передаються у зовнішню систему через Modbus.

Режим діагностики (Diagnostic): Спеціальний режим для перевірки працездатності системи, калібрування датчиків та тестування каналів зв'язку. Доступний тільки персоналу з відповідними правами доступу.

Така архітектура забезпечує гнучкість системи, можливість її масштабування від простих двоосьових конфігурацій до складних багатоосьових комплексів, а також інтеграцію в існуючу інфраструктуру підприємства з мінімальними змінами.

3.3 Функціональні можливості та алгоритми корекції

Апаратно-програмний комплекс системи контролю завантаження реалізує набір функцій, що виходять за межі простого зважування та спрямовані на забезпечення високої точності вимірювань в реальних промислових умовах. Ці функції компенсують вплив дестабілізуючих факторів, адаптують систему до різних конфігурацій обладнання та спрощують процедури обслуговування.

3.3.1 Масштабованість системи та динамічне підключення платформ

Одним з ключових принципів побудови системи є можливість гнучкої зміни її конфігурації без необхідності перепрограмування або заміни центрального контролера. Це досягається через механізм динамічного виявлення та підключення вимірювальних платформ.

При включенні живлення кожна платформа ініціює процедуру приєднання до мережі. Вона передає широкомовний пакет, що містить її унікальний ідентифікатор, тип обладнання, версію мікропрограми та калібрувальні параметри. Центральний контролер, що постійно прослуховує радіоканал, приймає ці пакети та формує таблицю доступних пристроїв.

Оператор через термінал бачить список виявлених платформ і може активувати необхідні для поточного вимірювання.

Важливою особливістю є можливість "гарячого" підключення додаткових платформ в процесі роботи.

Механізм масштабованості реалізований на основі конфігураційних файлів, що зберігаються в пам'яті контролера. Кожен тип транспортного засобу

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

описується набором параметрів: кількість осей, типова база між осями, розташування платформ відносно системи координат автомобіля. При виборі шаблону контролер завантажує відповідну конфігурацію та автоматично призначає виявлені платформи до відповідних осей на основі їхніх фізичних координат.

Така архітектура дозволяє одну й ту ж саму систему використовувати як для контролю легкових автомобілів на станціях технічного огляду, так і для зважування великовантажних платформ.

3.3.2 Компенсація похибки від нахилу поверхні

В реальних умовах експлуатації ідеально горизонтальна поверхня є радше винятком, ніж правилом. Майданчик для зважування може мати ухил через особливості рельєфу, просідання ґрунту або конструктивні обмеження приміщення. Крім того, в процесі вимірювання з підйомом однієї осі для визначення вертикальної координати центру мас нахил є запланованою частиною процедури.

Нахил поверхні призводить до систематичної похибки вимірювання ваги. Датчики вимірюють нормальну складову сили реакції опори, яка менша за справжню вагу на множник $\cos(\alpha)$, де α - кут нахилу від горизонталі. Для малих кутів ця похибка незначна, але при кутах понад 5 градусів вона стає помітною і може досягати декількох відсотків від вимірюваної ваги.

Для компенсації цієї похибки кожна вимірювальна платформа обладнана тривісним акселерометром, що дозволяє визначити просторову орієнтацію платформи відносно вектора гравітації. Акселерометр вимірює проекції прискорення вільного падіння на три ортогональні осі, пов'язані з корпусом платформи.

Кути нахилу обчислюються з показань акселерометра за формулами:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\alpha_x = \arctan\left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (3.1)$$

$$\alpha_y = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (3.2)$$

де a_x, a_y, a_z - виміряні прискорення вздовж відповідних осей, α_x та α_y - кути нахилу навколо поздовжньої та поперечної осей.

Виміряна датчиками сила F^{meas} пов'язана зі справжньою вагою співвідношенням:

$$F^{real} = \frac{F^{meas}}{\cos(\alpha_x)\cos(\alpha_y)} \quad (3.3)$$

Для малих кутів, коли $|\alpha_x|, |\alpha_y| < 15^\circ$, можна використати апроксимацію:

$$F^{real} \approx F^{meas} \left(1 + \frac{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}{2}\right) \quad (3.4)$$

де кути виражені в радіанах.

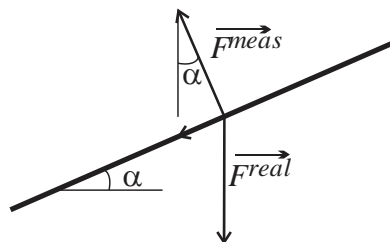


Рисунок 3.3 – Пошук реальної ваги вантажу який знаходиться на похилій платформі із вимірювачами сили

Корекція виконується в реальному часі для кожного вимірювання. Мікроконтролер платформи зчитує дані акселерометра одночасно з

опитуванням тензодатчиків, обчислює кути нахилу та застосовує корекційний множник до виміряної сили перед передачею результату на контролер.

Важливою деталлю є фільтрація показань акселерометра. Якщо автомобіль рухається або вібрує, акселерометр реєструє не тільки гравітацію, але й динамічні прискорення. Для усунення цього впливу застосовується фільтр низьких частот з частотою зрізу 1 Гц, що пропускає тільки статичну складову, відповідну орієнтації в полі тяжіння, і придушує високочастотні вібрації та удари.

3.3.3 Температурна корекція дрейфу нуля

Тензометричні датчики, як і будь-які резистивні сенсори, чутливі до зміни температури. Температурний дрейф виникає з двох причин: по-перше, опір тензорезисторів змінюється з температурою навіть за відсутності механічної деформації, по-друге, змінюється модуль пружності матеріалу пружного елемента, що призводить до зміни деформації при одній і тій же силі.

Виробники якісних датчиків застосовують схемні методи компенсації температурного дрейфу, зокрема, використовують мостові схеми з додатковими резисторами, що мають протилежний температурний коефіцієнт. Однак повна компенсація недосяжна, і залишковий дрейф становить типово 0.002-0.005% на градус Цельсія від номінального діапазону датчика.

Для датчика на 500 кг температурний дрейф може становити 0.01-0.025 кг на градус, що при зміні температури на 20 градусів дає похибку до 0.5 кг. Для системи з роздільною здатністю 50 грам це неприйнятно.

Програмна температурна корекція виконується на основі вимірювання температури кожного датчика та застосування калібрувальної функції, що описує залежність нуля та чутливості від температури. Кожна платформа обладнана цифровим температурним сенсором високої точності, розташованим безпосередньо на корпусі тензодатчиків.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модель температурної залежності описується поліномом другого порядку:

$$F^{correct} = F^{raw} - (Z_0 + Z_1(T - T_0) + Z_2(T - T_0)^2) \quad (3.5)$$

де F^{raw} - вимірне значення сили, T - поточна температура, T_0 - температура калібрування (зазвичай 20°C), Z_0, Z_1, Z_2 - коефіцієнти температурного дрейфу нуля, визначені при калібруванні.

Додатково корегується чутливість:

$$F^{final} = F^{correct} (1 + S_1(T - T_0) + S_2(T - T_0)^2) \quad (3.6)$$

де S_1, S_2 - коефіцієнти температурної залежності чутливості.

Калібрувальні коефіцієнти визначаються в процесі виробничого тестування шляхом вимірювання відгуку датчика на еталонне навантаження при різних температурах в діапазоні від -10°C до $+50^\circ\text{C}$. Ці коефіцієнти зберігаються в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера платформи і автоматично застосовуються до кожного вимірювання.

Система також відстежує швидкість зміни температури. Якщо температура змінюється занадто швидко (понад 2 градуси на хвилину), це може вказувати на перехідний температурний процес, коли різні частини датчика мають різну температуру. В такому випадку система видає попередження про можливе зниження точності та рекомендує дочекатися термічної стабілізації.

3.3.4 Контроль розряду акумуляторів

Оскільки вимірювальні платформи є автономними пристроями з живленням від акумуляторів, критично важливим є моніторинг стану батарей. Розряджений акумулятор може призвести не тільки до зупинки роботи платформи, але й до деградації точності вимірювань через падіння напруги живлення аналогових схем.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кожна платформа вимірює напругу свого акумулятора і передає цю інформацію на контролер разом з телеметричними даними. Контролер аналізує напругу та обчислює залишковий заряд на основі характеристики розряду конкретного типу акумулятора.

При падінні напруги нижче критичного порогу (2.9 В на елемент) платформа автоматично вимикається для захисту акумулятора від глибокого розряду, який може призвести до його незворотного пошкодження.

Система також веде статистику використання акумуляторів, підраховуючи кількість циклів заряду-розряду та час роботи. Ці дані доступні оператору через термінал і дозволяють планувати профілактичну заміну батарей до того, як вони вийдуть з ладу.

3.3.5 Програмне калібрування без апаратного втручання

Традиційні вимірювальні системи на основі тензодатчиків потребують періодичного калібрування шляхом підстроювання резисторів в мостових схемах або налаштування підсилювачів. Це вимагає розбирання обладнання, доступу до друкованих плат та спеціального інструменту. Для систем з десятками датчиків така процедура стає трудомісткою та призводить до тривалих простоїв.

В розробленій системі реалізовано програмне калібрування, що виконується без будь-якого апаратного втручання. Калібрувальні коефіцієнти зберігаються в цифровій формі в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера і застосовуються програмно до оцифрованого сигналу датчика.

Процедура калібрування складається з двох етапів: визначення нуля та визначення чутливості.

Калібрування нуля виконується при відсутності навантаження на платформі. Оператор через термінал ініціює процедуру, контролер командує платформі виконати серію вимірювань за відсутності ваги. Платформа знімає 100 відліків протягом 10 секунд, обчислює середнє значення та зберігає його

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

як опорне значення нуля V_0 . Надалі всі вимірювання коригуються віднімання цього значення:

$$V^{correct} = V^{meas} - V_0 \quad (3.7)$$

Калібрування чутливості потребує еталонного навантаження. На платформу встановлюється вантаж відомої маси M^{ref} (типово використовуються заводські гирі класу точності М1 з відомою масою в межах 0.01%). Платформа вимірює сигнал V^{ref} , обчислює коефіцієнт перетворення:

$$K = \frac{M^{ref}}{V^{ref} - V_0} \quad (3.8)$$

і зберігає його в пам'яті. При подальших вимірюваннях маса обчислюється як:

$$M = K \cdot (V^{meas} - V_0) \quad (3.9)$$

Важливою перевагою програмного калібрування є можливість його автоматизації. Якщо підприємство має автоматизований стенд з набором еталонних ваг, процедура калібрування може виконуватись повністю автоматично під керуванням комп'ютера без участі оператора. Це дозволяє проводити перевірку точності регулярно, наприклад, щотижня, забезпечуючи стабільність метрологічних характеристик системи протягом всього терміну експлуатації.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ

4.1 Розробка схемотехніки бездротового вимірювального вузла

Бездротовий вимірювальний вузол є ключовим елементом системи, що поєднує функції первинного перетворення механічного навантаження в електричний сигнал, цифрової обробки даних, бездротової передачі результатів та автономного живлення. Проектування такого вузла вимагає ретельного балансування між точністю вимірювань, енергоефективністю, вартістю компонентів та надійністю роботи в промислових умовах.

4.1.1 Підсистема вимірювання ваги

Основою вимірювального тракту є тензометричні датчики, встановлені під несучою балкою через пружні елементи. Для досягнення необхідної роздільної здатності 50 грам при діапазоні вимірювань до 500 кг кожен датчик потребує вимірювального перетворювача з високою роздільною здатністю та низьким рівнем шумів.

Тензометричний датчик являє собою пружний елемент з наклеєними тензорезисторами, з'єднаними в мостову схему Уітстона. При відсутності навантаження міст збалансований і вихідна напруга дорівнює нулю. При прикладанні сили пружний елемент деформується, змінюється опір тензорезисторів, і на виході моста з'являється напруга, пропорційна навантаженню.

Типовий тензодатчик на 500 кг має номінальну чутливість 2 мВ/В, тобто при живленні моста напругою 5 В та навантаженні в повний діапазон вихідна напруга становить 10 мВ. Для вимірювання 50 грам (0.01% від діапазону) необхідно розрізняти зміни напруги на рівні 1 мкВ, що вимагає використання високорозрядного аналого-цифрового перетворювача.

Для цієї задачі обрано спеціалізовану мікросхему НХ711 - 24-бітний сигма-дельта АЦП, розроблену спеціально для вимірювальних систем на

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

основі тензодатчиків. Цей перетворювач має вбудований інструментальний підсилювач з програмованим коефіцієнтом посилення 32, 64 або 128, що дозволяє узгодити малу вихідну напругу тензодатчика з вхідним діапазоном АЦП.

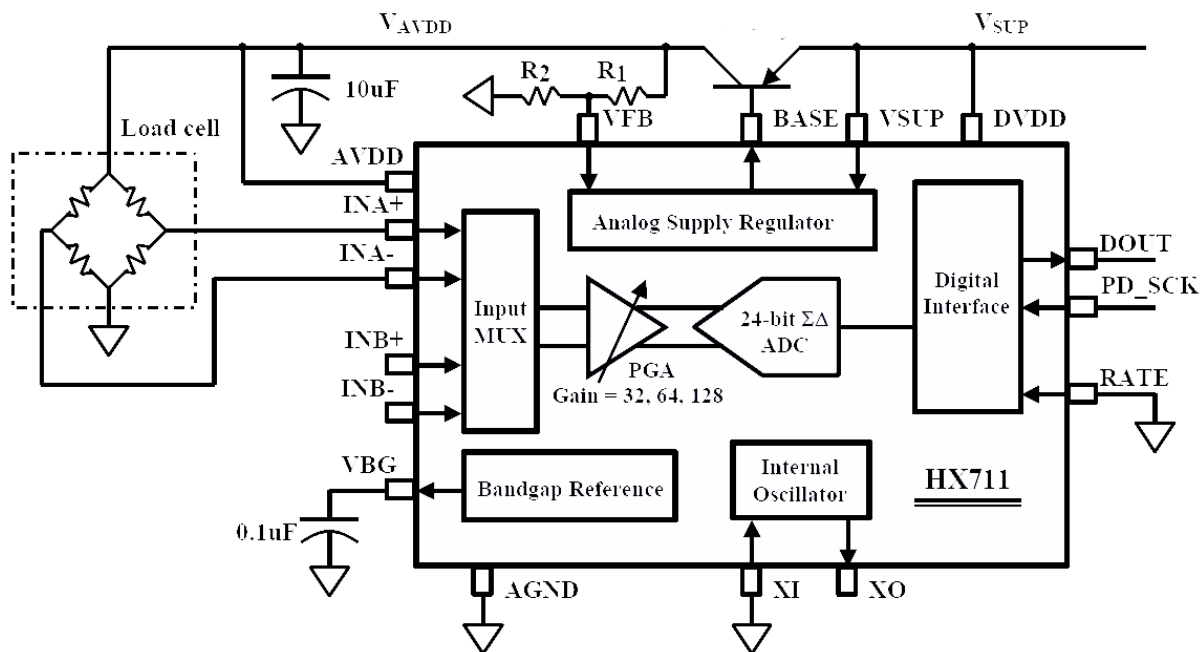


Рисунок 4.1 Структурна схема вимірювання деформації сенсора

При 24-розрядному перетворенні теоретична роздільна здатність становить 1 частину на 16 мільйонів. На практиці через шуми та нестабільність опорної напруги ефективна роздільна здатність складає близько 20 біт, що дає 1 частину на мільйон. При вихідному сигналі датчика 10 мВ на повну шкалу це відповідає розрізненню 10 нВ, що більш ніж достатньо для вимірювання 50 грам.

Критично важливим параметром є частота оновлення даних. HX711 підтримує два режими роботи: 10 вимірювань на секунду при частоті дискретизації сигма-дельта модулятора 10 Гц та 80 вимірювань на секунду при 80 Гц. Для системи контролю завантаження обрано режим 10 Гц як компроміс між швидкістю та рівнем шумів. Вищі частоти дискретизації призводять до зростання шумів через недостатнє усереднення в цифровому фільтрі АЦП.

Важливою особливістю НХ711 є вбудована схема стабілізації живлення тензодатчика. Якість живлення мостової схеми безпосередньо впливає на точність вимірювань, оскільки вихідний сигнал пропорційний напрузі живлення. НХ711 формує стабілізовану напругу 4.3 В з температурним коефіцієнтом менше 50 ppm/°C, що забезпечує стабільність показань при зміні температури навколишнього середовища.

Кожна платформа обладнана десятьма тензодатчиками, що вимагає відповідно десяти мікросхем НХ711. Вони підключені до спільної шини даних через мультиплексор, що дозволяє мікроконтролеру послідовно опитувати всі датчики. Повний цикл опитування десяти датчиків займає близько 100 мс, що забезпечує оновлення даних з частотою 10 разів на секунду для всієї платформи.

4.1.2 Підсистема вимірювання орієнтації та температури

Для компенсації похибок від нахилу платформи та температурної корекції показань датчиків кожен вимірювальний вузол обладнано інерційним вимірювальним модулем MPU6050. Цей інтегральний датчик поєднує тривісний акселерометр, тривісний гіроскоп та температурний сенсор в одному корпусі з цифровим інтерфейсом I2C.

Акселерометр вимірює проєкції вектора прискорення на три ортогональні осі, пов'язані з корпусом платформи. В стані спокою, коли платформа нерухома, акселерометр реєструє тільки прискорення вільного падіння, направлене вертикально вниз. З цих трьох проєкцій можна однозначно визначити просторову орієнтацію платформи відносно горизонталі.

MPU6050 дозволяє вибрати діапазон вимірювання акселерометра від $\pm 2g$ до $\pm 16g$. Для стаціонарної платформи, що не зазнає значних ударів та вібрацій, обрано найменший діапазон $\pm 2g$, що забезпечує максимальну роздільну здатність. При 16-бітному АЦП та діапазоні $\pm 2g$ роздільна здатність становить

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько 0.06 мг (міліг), що відповідає розрізненню кутів нахилу з точністю близько 0.003 градуса. Це більш ніж достатньо для корекції похибок від нахилу.

Вбудований температурний сенсор MPU6050 вимірює температуру кристалу мікросхеми з роздільністю близько 0.1°C. Хоча цей сенсор знаходиться не безпосередньо на корпусі тензодатчиків, він дає репрезентативну оцінку температури вимірювального вузла. Для більш точної температурної компенсації можна додатково встановити окремі температурні датчики DS18B20 безпосередньо на корпусах тензодатчиків, але в більшості випадків точності MPU6050 достатньо.

Обмін даними з MPU6050 здійснюється через цифровий інтерфейс I2C з тактовою частотою 400 кГц. Повне зчитування даних акселерометра, гіроскопа та температури займає близько 1 мс, що не створює затримок в основному циклі обробки даних.

4.1.3 Підсистема живлення

Автономність вимірювального вузла є важливою, оскільки в процесі роботи платформи можуть переміщуватись та нахилитись, що унеможлиблює використання дротового живлення. Система живлення побудована на основі літій-іонних акумуляторів, що забезпечують оптимальне співвідношення енергоємності, габаритів та вартості.

Для забезпечення роботи протягом повної робочої зміни тривалістю 8-12 годин необхідно розрахувати енергоспоживання всіх компонентів вимірювального вузла.

Мікроконтролер ESP32 в активному режимі з увімкненим Wi-Fi споживає близько 160 мА при напрузі 3.3 В, що становить 530 мВт. Однак безперервна робота Wi-Fi не потрібна - передача даних здійснюється короткими пакетами кожні 100 мс. При використанні режиму Modem-sleep,

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коли радіоблок вимикається між передачами, середнє споживання знижується до 40-50 мА.

Десять мікросхем НХ711, кожна з яких споживає близько 1.5 мА в активному режимі, разом дають 15 мА. Враховуючи струм живлення тензодатчиків через стабілізатор НХ711 (приблизно 10 мА на датчик), загальне споживання підсистеми вимірювання ваги становить близько 115 мА при 5 В або 190 мА при перерахунку на напругу 3.7 В акумулятора.

Модуль МРU6050 в режимі постійного вимірювання споживає близько 3.5 мА, що є незначною величиною в загальному балансі.

Додаткові компоненти (стабілізатори напруги, світлодіодна індикація, допоміжна логіка) додають близько 20 мА.

Загальне споживання:

- Мікроконтролер ESP32: 50 мА при 3.3 В = 165 мВт
- Підсистема НХ711 + тензодатчики: 190 мА при 3.7 В = 700 мВт
- МРU6050: 3.5 мА при 3.3 В = 12 мВт
- Допоміжні компоненти: 20 мА при 3.3 В = 66 мВт

Сумарна потужність близько 940 мВт, що відповідає струму 254 мА від акумулятора напругою 3.7 В.

Для роботи протягом 10 годин необхідна ємність 2540 мАг. В конструкції вузла використовується батарея з двох паралельно з'єднаних елементів загальною ємністю 5000-6000 мАг, що забезпечує запас енергії на 12-14 годин роботи з урахуванням втрат в перетворювачах напруги.

Захист акумуляторів від перезарядки, глибокого розрядження та короткого замикання забезпечується модулем керування батареєю (BMS - Battery Management System). Використовується спеціалізована мікросхема захисту DW01 в парі з польовими транзисторами, що контролює напругу кожного елемента та відключає навантаження при виході параметрів за допустимі межі.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Верхній поріг напруги встановлено на рівні 4.2 В на елемент, що є стандартом для літій-іонних акумуляторів. При досягненні цієї напруги в процесі заряджання BMS відключає зарядний струм. Нижній поріг встановлено на 2.9 В, при падінні нижче якого BMS відключає навантаження для захисту від глибокого розряду.

Живлення цифрових компонентів здійснюється стабілізованою напругою 3.3 В, яка формується з напруги акумулятора за допомогою імпульсного понижуючого перетворювача з ККД близько 90%. Для живлення аналогової частини (HX711 та тензодатчики) використовується окремий стабілізатор 5 В з низьким рівнем пульсацій, оскільки якість живлення безпосередньо впливає на точність вимірювань.

4.1.4 Вибір мікроконтролера та радіомодуля

Вибір мікроконтролера для вимірювального вузла визначається декількома критеріями: достатня обчислювальна потужність для обробки даних від десяти датчиків в реальному часі, наявність вбудованого радіоінтерфейсу для бездротової передачі даних, енергоефективність для забезпечення тривалої автономної роботи та доступність на ринку за прийнятною ціною.

Цим вимогам оптимально відповідає мікроконтролер ESP32 компанії Espressif Systems. Це 32-бітний двоядерний процесор архітектури Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, вбудованим Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2. Наявність двох ядер дозволяє розділити задачі: одне ядро відповідає за опитування датчиків та обробку даних, друге - за бездротовий зв'язок та взаємодію з контролером.

ESP32 має достатню кількість периферійних інтерфейсів: два контролери I2C для підключення MPU6050 та можливих додаткових датчиків, чотири контролери SPI для роботи з множиною мікросхем HX711 через мультиплексор, 18 каналів АЦП (хоча в даному застосуванні вони не

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються, оскільки вимірювання здійснюють спеціалізовані мікросхеми NH711).

Бездротовий зв'язок реалізовано на основі Wi-Fi в режимі ESP-NOW - власного протоколу Espressif для прямої передачі даних між пристроями без необхідності підключення до точки доступу. ESP-NOW дозволяє передавати пакети розміром до 250 байт з мінімальними затримками (1-2 мс) та низьким енергоспоживанням. Дальність зв'язку в умовах прямої видимості досягає 100-200 метрів, що більш ніж достатньо для типових промислових умов, де відстань між платформами та контролером не перевищує 20-30 метрів.

Протокол ESP-NOW автоматично обробляє підтвердження доставки та повторну передачу пакетів у випадку втрати. Кожна платформа має унікальну MAC-адресу, за якою контролер ідентифікує джерело даних. Можливість одночасної роботи до 20 пристроїв в одній мережі забезпечує масштабованість системи для складних багатоосьових конфігурацій.

Програмне забезпечення мікроконтролера розроблено на основі фреймворку ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) з використанням операційної системи реального часу FreeRTOS. Це забезпечує надійне багатозадачне виконання, детерміновану обробку подій та ефективне керування ресурсами.

Таким чином, схемотехнічне рішення вимірювального вузла забезпечує необхідну точність вимірювань на рівні 50 грам при діапазоні до 500 кг, автономну роботу протягом повної робочої зміни та надійну бездротову передачу даних, залишаючись при цьому відносно простим у виробництві та доступним за вартістю компонентів.

4.2 Розробка протоколу обміну даними по радіоканалу між контролером і вимірювачем

Надійна передача вимірювальних даних по радіоканалу є критично важливою для функціонування системи. На відміну від дротових з'єднань, бездротовий канал схильний до перешкод, втрат пакетів та колізій при

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одночасній передачі від декількох пристроїв. Протокол обміну даними має забезпечити не тільки структуровану передачу інформації, але й механізми виявлення помилок, повторної передачі та динамічного управління мережею.

4.2.1 Структура пакету даних

Кожен пакет даних, що передається від вимірювальної платформи до центрального контролера, має фіксовану структуру, що спрощує процес декодування та мінімізує ймовірність помилкової інтерпретації. Загальний розмір пакету становить 32 байти, що є компромісом між повнотою інформації та ефективністю використання радіоканалу.

Преамбула (Header) - 2 байти

Кожен пакет починається з фіксованої послідовності байтів 0xAA 0x55, що виконує роль синхронізуючої преамбули. Ця послідовність має специфічний двійковий паттерн (10101010 01010101) з чергуванням одиниць та нулів, що полегшує приймачу визначення початку пакету навіть при наявності шумів в каналі. Якщо приймач виявляє цю послідовність, він починає декодування наступних байтів як структурованих даних.

Вибір саме цієї комбінації обумовлений її малою ймовірністю випадкового появи в довільному потоці даних. Статистично, для рівномірно розподілених випадкових даних ймовірність збігу з цією послідовністю становить 1 до 65536, що достатньо мало для практичного застосування.

Ідентифікатор пристрою (Device_ID) - 1 байт. Кожна вимірювальна платформа має унікальний ідентифікатор в діапазоні від 1 до 255. Значення 0 зарезервоване для ширококомовних повідомлень від контролера до всіх платформ одночасно. Ідентифікатор призначається платформі в процесі спарювання з контролером і зберігається в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера. При кожній передачі пакету платформа включає свій ідентифікатор, що дозволяє контролеру однозначно визначити джерело даних навіть при одночасній роботі множини платформ.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однобайтовий формат ідентифікатора обмежує систему максимум 254 платформами, що більш ніж достатньо для найскладніших конфігурацій автомобільних вагів. Для порівняння, найбільші автопоїзди мають не більше 10-12 осей, тобто використовують максимум 12 платформ.

Тип пакету (Packet_Type) - 1 байт. Це поле визначає призначення пакету та структуру його корисного навантаження. Базовий протокол підтримує кілька типів пакетів:

- 0x01: Телеметричні дані (стандартний пакет з вимірюваннями)
- 0x02: Запит на спарювання (платформа шукає контролер)
- 0x03: Підтвердження спарювання (контролер підтверджує підключення)
- 0x04: Heartbeat (сигнал живучості без корисних даних)
- 0x05: Команда конфігурації (контролер змінює параметри платформи)
- 0x06: Відповідь на команду (платформа підтверджує виконання)
- 0x07: Повідомлення про помилку (платформа сигналізує про проблему)

Використання поля типу забезпечує розширюваність протоколу - можна додавати нові типи пакетів без зміни базової структури.

Порядковий номер пакету (Sequence_Number) - 2 байти. Кожен наступний пакет від платформи має інкрементований порядковий номер в діапазоні від 0 до 65535. Після досягнення максимального значення лічильник скидається в нуль і починає новий цикл. Порядковий номер дозволяє контролеру виявляти втрачені пакети, дублювання та порушення послідовності.

Якщо контролер отримує пакет з номером N, а попередній мав номер N-2, це означає, що пакет N-1 було втрачено в каналі. Контролер може запросити повторну передачу втраченого пакету або просто відмітити пропуск, якщо дані не критичні. Для системи вимірювання ваги короткочасна втрата окремих пакетів не критична, оскільки наступний пакет надходить через 100 мс і містить актуальні дані.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дані ваги (Weight_Data) - 8 байтів. Це поле містить виміряні значення сил на двох датчиках платформи. Для базової конфігурації з двома датчиками на кожній балці передаються два значення типу float (IEEE 754, 4 байти кожне). Перше значення відповідає лівому датчику, друге - правому. Значення виражені в кілограмах з точністю до 0.01 кг.

Використання формату float забезпечує достатній динамічний діапазон (від часток грама до десятків тонн) та спрощує обробку даних на стороні контролера, оскільки не потребує додаткових перетворень з цілочисельного формату. Альтернативний варіант - передача цілих чисел з фіксованою масштабною константою - дав би дещо менший розмір пакету, але ускладнив би програмування.

Для конфігурацій з більшою кількістю датчиків (наприклад, 10 датчиків під балкою для високої точності) можна використовувати компресію даних або передавати інформацію декількома пакетами.

Дані нахилу (Angle_Data) - 4 байти. Просторова орієнтація платформи описується двома кутами: нахил відносно поздовжньої осі (pitch) та нахил відносно поперечної осі (roll). Кожен кут передається як 16-бітне знакове ціле число з фіксованою точкою, де значення 1000 відповідає 1 градусу. Такий формат забезпечує роздільну здатність 0.001 градуса в діапазоні від -32 до +32 градусів, що більш ніж достатньо для типових умов експлуатації.

Вибір фіксованої точки замість формату float обумовлений достатньою точністю 16-біт для представлення кутів та економією двох байтів порівняно з двома 32-бітними float значеннями. Перетворення на стороні контролера тривіально: кут в градусах дорівнює переданому значенню, поділеному на 1000.

Температурні дані (Temp_Data) - 2 байти. Температура вимірювального вузла передається як 16-бітне знакове ціле число, де значення 100 відповідає 1 градусу Цельсія. Це забезпечує роздільну здатність 0.01°C в діапазоні від -

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

327°C до +327°C. Реальний діапазон робочих температур значно вужчий (від -20°C до +60°C), тому формат має великий запас.

Високу роздільність температури обрано для забезпечення точної температурної компенсації показань тензодатчиків, оскільки їхня чутливість змінюється на десятки частки відсотка на градус.

Напруга батареї (V_Bat) - 2 байти. Напруга акумулятора передається як 16-бітне беззнакове ціле число в мілівольтах. Це дозволяє передавати напругу від 0 до 65.535 В з роздільністю 1 мВ. Для літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3.7 В та діапазоном від 3.0 до 4.2 В така точність більш ніж достатня.

Контролер використовує цю інформацію для обчислення залишкового заряду батареї, відображення стану на інтерфейсі оператора та генерації попереджень про необхідність заміни або підзарядки акумуляторів.

Статус та прапорці (Status_Flags) - 1 байт. Це поле містить набір бітових прапорців, що характеризують стан платформи:

- Біт 0: Калібрування виконано (1) або потребує калібрування (0)
- Біт 1: Температурна компенсація активна (1) або вимкнена (0)
- Біт 2: Батарея в нормі (0), низький заряд (1)
- Біт 3: Виявлено перевантаження датчика (1)
- Біт 4: Дані стабілізувалися (1) або ще змінюються (0)
- Біт 5: Зв'язок з додатковими датчиками в нормі (1)
- Біти 6-7: Зарезервовані для майбутнього використання

Використання бітових прапорців економить місце в пакеті порівняно з передачею окремих байтів для кожного стану.

Контрольна сума (CRC) - 2 байти. Завершується пакет 16-бітною циклічною надлишковою перевіркою (CRC-16) з поліномом 0x1021 (CRC-CCITT). CRC обчислюється для всіх байтів пакету від початку преамбули до поля перед CRC включно. Приймач обчислює CRC отриманих байтів і

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порівнює з переданим значенням. Збіг свідчить про відсутність помилок передачі з високою ймовірністю (один необнаружений збій на 2^{16} випадкових помилок).

CRC-16 є стандартним вибором для протоколів передачі даних, оскільки забезпечує надійне виявлення як одиночних, так і пакетних помилок при помірних обчислювальних витратах. Існують апаратні та програмні реалізації CRC-16 для більшості мікроконтролерів, включаючи ESP32.

Повна структура пакету представлено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1– Структура пакету даних

Offset	Поле	Розмір	Тип	Опис
0	Header	2	uint8[2]	0xAA, 0x55
2	Device_ID	1	uint8	1-255
3	Packet_Type	1	uint8	Тип пакету
4	Sequence_Num	2	uint16	Порядковий номер
6	Weight_Data	8	float[2]	Ваги (кг)
14	Angle_Data	4	int16[2]	Кути ($\times 1000$ град)
18	Temp_Data	2	int16	Температура ($\times 100$ °C)
20	V_Bat	2	uint16	Напруга (мВ)
22	Status_Flags	1	uint8	Біти стану
23	Reserved	7	uint8[7]	Резерв для розширення
30	CRC	2	uint16	Контрольна сума

Резервні 7 байтів залишені для майбутнього розширення функціональності без зміни загального розміру пакету. Це може бути додаткова діагностична інформація, час останнього калібрування, лічильник помилок тощо.

4.3 Розробка центрального контролера та засобів візуалізації

Центральний контролер є центральною частиною системи, що об'єднує всі вимірювальні платформи, виконує обчислення координат центру мас, забезпечує візуалізацію результатів та інтеграцію з зовнішніми системами.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Апаратна реалізація контролера побудована за модульним принципом, що дозволяє легко модифікувати або розширювати функціональність без повного перепроектування.

4.3.1 Загальна архітектура контролера

Контролер виконаний у вигляді настінного блоку в пластиковому корпусі з класом захисту IP54, що забезпечує стійкість до пилу та бризок води, типових для промислового середовища. Габаритні розміри 250×180×80 мм дозволяють розмістити всі необхідні компоненти з достатніми зазорами для відведення тепла та електромагнітної сумісності.

На передній панелі розташовані LED-матриця розміром 32×32 піксели для візуалізації положення центру мас, три світлодіодні індикатори стану системи та кнопка скидання. Бічна панель містить роз'єми для підключення зовнішніх інтерфейсів: USB Type-C для зв'язку з терміналом оператора, клемна колодка RS-485 для Modbus, роз'єм живлення 12-24 В постійного струму.

Внутрішня компоновка організована на двох друкованих платах: основна плата з мікроконтролером та периферією, плата LED-матриці з драйверами живлення. Такий розділ дозволяє мінімізувати електромагнітні наведення від імпульсних драйверів світлодіодів на чутливі аналогові та цифрові схеми основної плати.

4.3.2 Підсистема обробки даних

Центральним елементом обробки даних є мікроконтролер ESP32-S3 - 32-бітний подвійноядерний процесор Xtensa LX7 з тактовою частотою до 240 МГц, 512 КБ SRAM та вбудованою підтримкою Wi-Fi 802.11 b/g/n. Вибір цього мікроконтролера обумовлений декількома факторами.

По-перше, інтегрований бездротовий інтерфейс Wi-Fi дозволяє організувати розподілену архітектуру системи, де кожен функціональний модуль є автономним пристроєм, що значно спрощує монтаж та експлуатацію.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ESP32-S3 працює в режимі точки доступу (Access Point), до якої підключаються віддалені модулі системи - вагові платформи та модулі візуалізації. Такий підхід усуває необхідність прокладання сигнальних кабелів між компонентами системи, що особливо важливо при вимірюванні великогабаритного транспорту.

По-друге, достатня обчислювальна потужність для обробки даних від декількох вимірювальних платформ в реальному часі. Обчислення координат центру мас вимагає розв'язання системи нелінійних рівнянь ітераційними методами, що є обчислювально інтенсивною задачею. Подвійноядерна архітектура ESP32-S3 з апаратним прискорювачем операцій з плаваючою комою виконує ці обчислення достатньо швидко для забезпечення оновлення результатів з частотою 10 Гц.

По-третє, наявність розвиненої периферії: декілька контролерів UART для налагодження та розширення функціоналу, два контролери SPI, контролер USB OTG для зв'язку з терміналом оператора або програмування, таймери та DMA-контролери для автономної передачі даних без участі процесорних ядер.

Обмін даними між модулями здійснюється через бездротову мережу Wi-Fi з використанням протоколу TCP/IP та сокетів. Центральний модуль на базі ESP32-S3 створює точку доступу з SSID, до якої автоматично підключаються всі периферійні модулі системи при увімкненні живлення. Після встановлення з'єднання відкриваються TCP-сокети для двонаправленого обміну даними.

Вагові модулі, встановлені під кожною віссю автомобіля, передають пакети з вимірними значеннями ваги на центральний модуль з частотою 10 Гц. Кожен пакет містить ідентифікатор модуля, поточне значення ваги, температуру датчика та контрольну суму CRC16 для виявлення помилок передачі. Після отримання даних від усіх вагових модулів центральний контролер виконує обчислення координат центру мас та формує пакет візуалізації.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль відображення на LED-матриці отримує від центрального контролера пакети з інформацією для візуалізації: координати центру мас, відхилення від норми, кольорові коди для індикації стану. Такий розподіл функцій дозволяє розмістити модуль візуалізації в зручному для оператора місці - наприклад, на стіні ангару або на пересувній стійці, підключивши лише зовнішнє джерело живлення 12-24 В для світлодіодної матриці. Оскільки LED-матриця споживає значний струм (до 8-10 А на пікових навантаженнях), локальне живлення модуля візуалізації усуває необхідність прокладання потужних силових кабелів від центрального блоку. Цифрове керування через Wi-Fi вимагає мінімальної потужності (близько 200 мА для ESP32-S3), що дозволяє живити мікроконтролер від вбудованого стабілізатора напруги модуля візуалізації.

Автономність кожного модуля забезпечує високу надійність системи - відмова одного вагового датчика або модуля візуалізації не впливає на роботу інших компонентів. Центральний контролер виявляє відсутність з'єднання з периферійним модулем за таймаутом (2 секунди без прийому пакетів) і сигналізує про помилку оператору.

Енергонезалежне зберігання конфігурації, калібрувальних коефіцієнтів та архіву вимірювань реалізовано на базі зовнішньої flash-пам'яті W25Q128 ємністю 16 МБ, підключеної через інтерфейс QSPI. Швидкість обміну даними до 80 МБіт/с дозволяє швидко зберігати результати вимірювань без затримок в основному циклі обробки. Альтернативно може використовуватись SD-карта через інтерфейс SDIO для зручної передачі даних на зовнішні пристрої без підключення до комп'ютера.

4.3.3 Підсистема візуалізації на LED-матриці

Візуалізація положення центру мас на LED-матриці забезпечує інтуїтивне сприйняття результату вимірювання без необхідності аналізу

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

числових даних. Водій або оператор одразу бачить, чи знаходиться центр мас в допустимій зоні, і може оцінити величину відхилення.

Для реалізації використано адресну RGB LED-матрицю на базі світлодіодів WS2812B розміром 16×16 пікселів. Кожен світлодіод WS2812B містить контролер яскравості та декодер адреси, що дозволяє керувати кольором та яскравістю кожного пікселя індивідуально через єдину сигнальну лінію.

Загальна кількість світлодіодів становить 256. При споживанні одного світлодіода близько 50 мА на максимальній яскравості та білому кольорі (всі три кольори увімкнені), пікове споживання матриці може теоретично досягати 12.8 А (256 × 50 мА). Однак в реальних умовах роботи одночасно світяться лише окремі піксели з помірною яскравістю, і типове споживання не перевищує 3-5 А.

Живлення матриці здійснюється стабілізованою напругою 5 В від імпульсного перетворювача з вхідною напругою 12-24 В. Використано спеціалізовану мікросхему XL4015 в конфігурації buck-перетворювача з вихідним струмом до 5 А на один канал. Для забезпечення необхідного струму та запасу потужності встановлено два паралельні перетворювачі з загальним вихідним струмом 10 А, що забезпечує надійну роботу навіть при пікових навантаженнях.

Керування матрицею та обробка даних від центрального вузла здійснюється мікроконтролером ESP32. Модуль працює в режимі Wi-Fi клієнта, підключаючись до точки доступу центрального вузла (ESP32-S3) та встановлюючи TCP Socket-з'єднання. Через це з'єднання модуль отримує пакети з інформацією для відображення: координати центру мас, рівень відхилення від норми, колірну індикацію та додаткові дані про розподіл ваги.

Після отримання пакета ESP32 формує відповідний масив даних для WS2812B та передає його через єдину сигнальну лінію GPIO. Протокол WS2812 використовує кодування даних тривалістю імпульсів: логічний нуль

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передається імпульсом 0.4 мкс / 0.85 мкс (високий/низький рівень), логічна одиниця - 0.8 мкс / 0.45 мкс. Кожен піксель приймає 24 біта даних (8 біт на колір у форматі G-R-B), після чого передає наступні 24 біти далі по ланцюгу до наступного світлодіода.

Автономність модуля візуалізації дозволяє розміщувати його в найбільш зручному для оператора місці - в кабіні водія, на стінці поряд з ваговим обладнанням, або на мобільній стійці. Оскільки LED-матриця споживає значний струм (3-5 А в робочому режимі), можливість підключення модуля до найближчого джерела живлення без необхідності прокладання довгих кабелів від центрального блоку є суттєвою перевагою.

Матриця розділена на наступні функціональні зони: Периферійна рамка (зовнішній шар 16×16): Один піксель по всьому периметру матриці використовується для відображення загального стану системи:

- Зелена рамка - нормальна робота системи
- Червона рамка - наявність тривоги або помилок
- Синя рамка - процес калібрування

Центральна зона візуалізації (внутрішня область 14×14): Відображає вид автомобіля зверху з масштабуванням залежно від реальних габаритів. Контури автомобіля (10×14 пікселів) намальовані темно-зеленим кольором з яскравішою окантовкою. Допустима зона розташування центру мас виділена жовтою рамкою (8×12 пікселів у центрі контуру автомобіля).

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

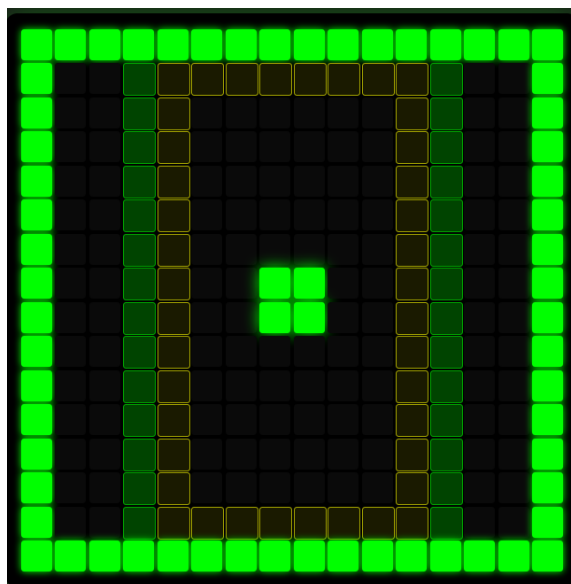


Рисунок 4.2– Формат зображення автомобіля із розташуванням центра мас по центру автомобіля

Індикація центру мас: Фактичне положення центру мас відображається яскравою точкою розміром 2×2 пікселі. Колір точки залежить від відхилення від норми:

- **Зелений:** Всі параметри в нормі (відхилення <5%)
- **Жовтий:** Наближення до межі (відхилення 5-15%)
- **Червоний:** Вихід за допустимі межі (відхилення >15%)
- **Мигаючий червоний:** Критичне перевантаження (відхилення >20%)

Шкала завантаження (нижня частина): Додатково в нижній частині матриці відображається шкала сумарної ваги у вигляді горизонтальної смуги з 14 пікселів, де довжина заповненої частини пропорційна вимірній вазі відносно максимально допустимої. Це дає швидку візуальну оцінку ступеня завантаження автомобіля без необхідності читати числові значення.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

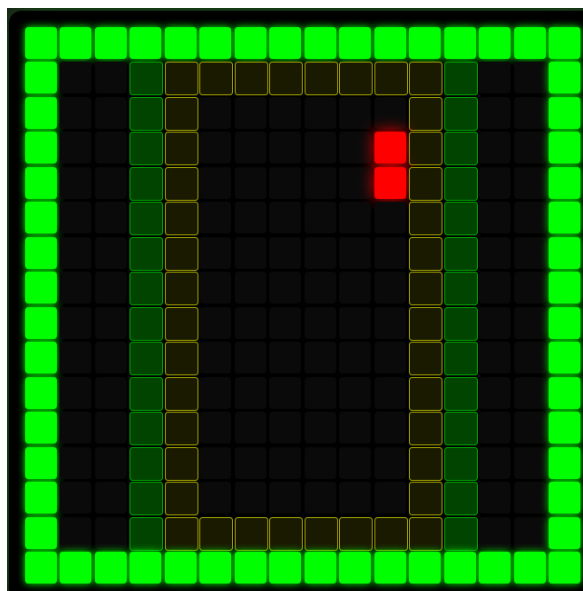


Рисунок 4.3– Формат зображення автомобіля із зміщеним розташуванням центру мас

4.4 Підсистема інтерфейсу Modbus RTU

Інтеграція з зовнішніми системами через протокол Modbus RTU вимагає фізичного інтерфейсу RS-485, що забезпечує передачу даних на відстані до 1200 метрів з високою стійкістю до електромагнітних перешкод.

Драйвером інтерфейсу RS-485 є спеціалізована мікросхема MAX485 - напівдуплексний приймопередавач диференціальних сигналів. MAX485 перетворює однополярні TTL-сигнали від USART мікроконтролера в диференціальні сигнали стандарту RS-485 і назад.

Промислове середовище характеризується наявністю електромагнітних перешкод від силових кіл, двигунів, перетворювачів частоти. Для захисту інтерфейсу RS-485 від імпульсних перенапруг та електростатичних розрядів застосовано багаторівневу схему захисту.

Перший рівень - TVS-діоди (Transient Voltage Suppressor) SMAJ5.0CA на кожній лінії (A і B). Ці діоди обмежують напругу на рівні ± 5 В відносно землі, шунтуючи імпульси напруги амплітудою понад 30 В на землю за час менше 1 наносекунди.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Другий рівень - синфазні дроселі (Common Mode Choke) в диференціальних лініях А і В. Дроселі з індуктивністю 100 мкГн придушують високочастотні синфазні перешкоди, не впливаючи на корисний диференціальний сигнал.

Контролер підтримує роботу в багатоточковій мережі RS-485 з топологією "шина". До однієї шини може бути підключено до 32 пристроїв (з урахуванням навантажувальної здатності драйверів). Контролер виступає в ролі Slave-пристрою з адресою, що налаштовується через термінал оператора або DIP-перемикачі на платі.

Швидкість обміну даними налаштовується на 9600 біт/с. Формат даних - стандартний Modbus RTU: 8 біт даних, без біта парності, 1 стоп-біт (8N1). Контролер підтримує всі основні функції Modbus: 03 (Read Holding Registers), 04 (Read Input Registers), 06 (Write Single Register), 16 (Write Multiple Registers).

Час відповіді на Modbus-запит не перевищує 50 мс навіть при обробці складних запитів з читанням десятків регістрів. Це забезпечує сумісність з більшістю SCADA-систем, які типово встановлюють таймаут відповіді на рівні 1-2 секунди.

Таким чином, апаратна реалізація центрального контролера забезпечує надійну роботу системи в промислових умовах, інтуїтивну візуалізацію результатів для оператора та безпроблемну інтеграцію з існуючою інфраструктурою автоматизації підприємства.

4.5 Розробка терміналу оператора

Термінал оператора є основним інтерфейсом взаємодії персоналу з системою контролю завантаження. Програмне забезпечення терміналу розроблено з урахуванням специфіки промислового застосування, де оператори можуть мати різний рівень технічної підготовки, а процес вимірювання має відбуватись швидко та без можливості помилок.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5.1 Платформа та технологічний стек

Програмне забезпечення терміналу реалізовано як кросплатформний додаток, що може працювати як на промислових сенсорних панелях під керуванням Windows Embedded або Linux, так і на звичайних персональних комп'ютерах з Windows 10/11. Використано фреймворк Qt версії 6.x, що забезпечує нативну продуктивність, сучасний зовнішній вигляд інтерфейсу та можливість адаптації до різних розмірів екранів без перекомпіляції.

Вибір Qt обумовлений декількома факторами. По-перше, підтримка сенсорного вводу на рівні фреймворку з автоматичною обробкою жестів, мультитачу та віртуальної клавіатури. По-друге, вбудовані засоби побудови графіків та візуалізації даних через модуль Qt Charts. По-третє, ефективна робота з послідовними портами через Qt SerialPort, що спрощує зв'язок з контролером.

Архітектура додатку побудована за патерном Model-View-ViewModel, що забезпечує чітке розділення бізнес-логіки, представлення даних та інтерфейсу користувача. Модель даних містить інформацію про поточний стан системи, виміряні параметри, конфігурацію платформ. Представлення реалізує графічний інтерфейс з формами введення, таблицями та графіками. ViewModel забезпечує зв'язок між ними, перетворюючи сирі дані в форми, зручні для відображення.

Обмін даними з контролером здійснюється через USB-інтерфейс з використанням власного протоколу на базі JSON-пакетів. Цей протокол описано в розділі 3 - кожен пакет містить тип повідомлення, корисне навантаження та контрольну суму. Програмний модуль зв'язку працює в окремому потоці, забезпечуючи асинхронний обмін даними без блокування інтерфейсу користувача.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.5.2 Головний екран та навігація

При запуску додатку оператор бачить головний екран з трьома основними розділами, доступними через вкладки або бічне меню залежно від розміру екрану.

Розділ "Вимірювання" - основний робочий екран для проведення зважування. Займає більшу частину простору екрану і оптимізований для швидкого доступу до найбільш використовуваних функцій.

Розділ "Платформи" - керування конфігурацією вимірювальних вузлів, моніторинг їх стану, додавання нових пристроїв.

Розділ "Налаштування" - конфігурація системи, калібрування, параметри інтеграції, керування базою даних автомобілів.

Навігація інтуїтивна - великі кнопки з текстовими підписами та іконками, мінімум вкладеності меню. Для сенсорних екранів всі інтерактивні елементи мають розмір не менше 48×48 пікселів відповідно до рекомендацій ергономіки тач-інтерфейсів.

The screenshot shows the application interface with three tabs: "Вимірювання" (Measuring), "Платформи" (Platforms), and "Налаштування" (Settings). The "Вимірювання" tab is active and contains two main sections: "Нове вимірювання" (New measurement) and "Положення центру мас" (Center of mass position).

Нове вимірювання (New measurement):

- Державний номерний знак: AA1234BB
- Тип транспортного засобу: Легковий, **Вантажний 2-ось**, Вантажний 3-ось
- База автомобіля (L), м: 3.8
- Колія (T), м: 1.8
- Кнопка: Почати вимірювання

Положення центру мас (Center of mass position):

- Загальна вага: **3240 кг**
- Відхилення: **18 %**
- Ліва вісь: **1680 кг**
- Права вісь: **1560 кг**

Розподіл навантаження (Load distribution):

Категорія	Відсоток
Недовантаження	8%
Норма	15%
Попередження	24%
Перевантаження	32%
Норма	14%
Попередження	16%
Норма	18%
Попередження	11%

Legend: Недовантаження (Blue), Норма (Green), Попередження (Yellow), Перевантаження (Red).

Рисунок 4.4– Загальний вид програми для пошуку положення центру мас

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Колірна схема обрана нейтральна - світло-сірий фон, темно-сірий текст, акцентні кольори (зелений для позитивних дій, червоний для критичних, жовтий для попереджень) використовуються обмежено для привернення уваги до важливих елементів.

4.5.3 Інтерфейс введення даних

Процес вимірювання починається з натискання великої зеленої кнопки "Нове вимірювання" на головному екрані. Це відкриває діалогове вікно введення метаданих про автомобіль.

Перше поле - державний номерний знак. Реалізовано віртуальна клавіатура з розкладкою, оптимізованою для введення номерів: великі літери латиниці та кирилиці, цифри 0-9, відсутність непотрібних символів. Клавіатура займає нижню третину екрану і з'являється автоматично при фокусі на полі вводу.

Для прискорення введення реалізовано автозаповнення на основі історії вимірювань. Після введення перших 2-3 символів під полем з'являється випадаючий список автомобілів, номерні знаки яких починаються з цих символів. Оператор може вибрати потрібний автомобіль одним дотиком, і всі його параметри (тип, габарити, водій) заповнюються автоматично.

Якщо автомобіль новий і відсутній в базі даних, оператор вводить номер повністю та переходить до наступного поля.

Друге поле - тип транспортного засобу. Замість текстового поля реалізовано візуальний селектор з іконками типових категорій:

- Легковий автомобіль (іконка легковика)
- Вантажний 2-осьовий (іконка вантажівки)
- Вантажний 3-осьовий (іконка триосьової вантажівки)
- Автопоїзд 4-5 осей (іконка фури)
- Спеціальний транспорт (іконка з можливістю ручного налаштування)

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						108
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір типу критично важливий, оскільки від нього залежать граничні значення ваги, допустимі відхилення центру мас та алгоритми візуалізації. Кожен тип має попередньо визначені параметри, збережені в базі даних шаблонів.

При виборі типу "Спеціальний транспорт" з'являються додаткові поля для ручного введення параметрів:

База автомобіля (L) - відстань між крайніми осями в метрах. Вводиться через цифрову клавіатуру з можливістю введення десяткових дробів. Типовий діапазон від 2.0 до 15.0 метрів з кроком 0.1 м. Система перевіряє введене значення на розумність і попереджає оператора, якщо воно виходить за типові межі.

Колія (T) - відстань між центрами коліс на одній осі в метрах. Типовий діапазон від 1.2 до 2.5 метрів. Цей параметр використовується для обчислення поперечної координати центру мас та перевірки дисбалансу лівих/правих коліс.

Кількість осей - від 2 до 6. Цифровий селектор з великими кнопками "+" / "-" або безпосереднім введенням числа.

Максимально допустима вага - граничне значення для конкретного автомобіля згідно з його технічною документацією. Якщо виміряна вага перевищить це значення, система згенерує попередження про перевантаження.

Для стандартних типів автомобілів ці параметри заповнюються автоматично з бази даних. Наприклад, для типу "Легковий автомобіль" база автоматично встановлюється в 2.7 м, колія - 1.5 м, кількість осей - 2, максимальна вага - 2500 кг.

База даних автомобілів

Система підтримує розширювану базу даних типових транспортних засобів з попередньо заповненими параметрами. База містить записи для найпоширеніших моделей вантажівок, легкових автомобілів, автобусів. Кожен запис включає:

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						109
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Марку та модель
- Типову базу та колію
- Кількість осей
- Максимально допустиму вагу
- Типові координати центру мас
- Допустимі відхилення

Оператор може вибрати конкретну модель зі списку, і всі параметри заповняться автоматично. База даних редагується через розділ налаштувань - можна додавати нові моделі, змінювати параметри існуючих, імпортувати дані з Excel-файлів.

4.5.4 Відображення перекосу та дисбалансу

Окремим елементом інтерфейсу є спеціалізована діаграма для візуалізації перекосу навантаження. Реалізовано у вигляді "теплової карти" - вид автомобіля зверху, де кожна зона забарвлена відповідно до рівня навантаження.

Червоні зони - перевантажені ділянки, зелені - нормальне навантаження, сині - недовантажені. Інтенсивність кольору пропорційна величині відхилення від норми. Така візуалізація дозволяє одразу побачити, де саме в автомобілі розміщено надмірний вантаж.

Додатково система відображає "векторну діаграму дисбалансу" - стрілку, що виходить з геометричного центру автомобіля і вказує напрямок та величину зміщення центру мас. Довжина стрілки пропорційна відхилення, кут показує напрямок. Якщо центр мас в нормі, стрілка коротка і зелена. При значному відхиленні стрілка довга і червона.

Ця діаграма особливо корисна для операторів навантажувальної техніки - вони бачать не просто числові координати, а інтуїтивно зрозумілий напрямок, куди потрібно перемістити вантаж для збалансування автомобіля.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.6 Розробка карти регістрів Modbus

Інтеграція системи контролю завантаження з зовнішніми інформаційними системами підприємства здійснюється через промисловий протокол Modbus RTU. Для забезпечення максимальної сумісності та зручності використання розроблено детальну карту регістрів, що охоплює всі виміряні параметри, статусну інформацію та налаштування системи.

4.6.1 Загальні принципи організації регістрів

Карта регістрів організована за функціональними групами з фіксованими базовими адресами для кожної групи. Таке структурування спрощує програмування зовнішніх систем і дозволяє зчитувати пов'язані параметри одним запитом. Всі багатобайтові значення (32-біт float, 32-біт integer) представлені у форматі big-endian відповідно до специфікації Modbus, тобто старше слово розташоване за молодшою адресою.

Holding Registers (функція 03 - читання, функція 06/16 - запис) - для параметрів конфігурації, калібрувальних коефіцієнтів та керуючих команд. Ці регістри можуть змінюватись зовнішньою системою для налаштування режимів роботи.

Input Registers (функція 04 - тільки читання) - для вимірювальних даних та статусної інформації. Ці регістри відображають поточний стан системи і не можуть бути змінені ззовні.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено апаратно-програмний комплекс для визначення просторового положення центру мас транспортних засобів на основі розподіленої системи вимірювання з використанням методу аналізу профілю вигину вимірювальної балки.

Проведено аналіз існуючих методів визначення положення центру мас автомобілів та розроблено фізико-математичну модель визначення координат центру мас, яка базується на послідовному зважуванні осей. Запропонований метод використовує одну довгу вимірювальну балку з десятьма тензометричними сенсорами, які реєструють профіль деформації при наїзді колеса. Спроектовано апаратний комплекс з розподіленою архітектурою, що включає автономні бездротові вимірювальні вузли, центральний контролер на базі ESP32-S3 та модуль візуалізації з LED-матрицею 16×16 пікселів. Центральний контролер функціонує як точка доступу Wi-Fi, забезпечуючи обмін даними через Socket-з'єднання. Розроблено схемотехніку вимірювальних вузлів з підсистемами вимірювання ваги, орієнтації та автономного живлення, а також алгоритми температурної корекції та компенсації похибок від нахилу поверхні.

Розроблено програмне забезпечення системи, що включає термінал оператора з веб-інтерфейсом для введення даних про транспортний засіб, візуалізації положення центру мас, теплової карти розподілу навантаження та векторної діаграми дисбалансу. Підсистема візуалізації на LED-матриці відображає положення центру мас з колірною індикацією стану для оперативної оцінки безпеки завантаження. Розроблений комплекс забезпечує точне визначення координат центру мас з мінімальною кількістю обладнання та може бути використаний на транспортних підприємствах, пунктах митного контролю та логістичних центрах для підвищення безпеки дорожнього руху.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Reimpell J., Stoll H., Betzler J. The Automotive Chassis: Engineering Principles. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 444 p.
2. ISO 10392:2011. Road vehicles – Determination of centre of gravity. Geneva: International Organization for Standardization, 2011.
3. Гудз Г. С., Глобчак М. В. Методи визначення координат центру мас колісних транспортних засобів. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. 2014. № 788. С. 45–51.
4. Павловський М. А. Теоретична механіка: Підручник. Київ: Техніка, 2002. 512 с.
5. Blundell M., Harty D. The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. Oxford: Elsevier, 2004. 524 p.
6. Genta G., Morello L. The Automotive Chassis: Volume 1: Components Design. Springer, 2009. 633 p.
7. Матейчик В. П., Волков В. П. «Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів», Управління проектами, системний аналіз і логістика, вип. 13, с. 126-138, 2014.
8. М. Ф. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Гришук, М. П. Цюман, Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки. Київ: НТУ, 2014.
9. Волков В. П., Гришук І. В. «Особливості моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу у складі бортового інформаційно-діагностичного комплексу», Вісник Національного транспортного університету, вип. 30, с. 51-62, 2014.
10. Гришук І. В. «Концепція забезпечення оптимального температурного стану двигунів і транспортних засобів в умовах експлуатації», дис. д-ра техн. наук. Харків, 2016.

					КРМ.АКСм-24.00.000 ПЗ	Арк.
						113
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Український Є. О. «Підвищення паливної економічності транспортних засобів категорії N3», дис. канд техн. наук. Житомир, 2021.

12. Volodarets M., et al., “Optimization of Vehicle Operating Conditions by Using Simulation Modeling Software,” SAE Technical Paper 2019-01-0099, 2019, doi: <https://10.4271/2019-01-0099>.

13. Klets D., et al., “Information Security Risk Management of Vehicles,” SAE Technical Paper 2018-01-0015, 2018, doi: <https://10.4271/2018-01-0015>.

14. Rabinovich E., et al., “Evaluation of the Powertrain Condition Based on the Car Acceleration and Coasting Data,” SAE Technical Paper 2018-01-1771, 2018, doi: <https://10.4271/2018-01-1771>

15. Kuric I., Mateichyk V., et al., «The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact,» in MATEC Web of Conferences Volume 244, 5 December 2018, № 030033rd Innovative Technologies in Engineering Production ITEP 2018, Bojnice; Slovakia, 2018. doi: <https://10.1051/matecconf/201824403003>.

16. Gritsuk I. V., Zenkin E. Y., et al., “The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units,” SAE Technical Paper 2018-01-1773, 2018, doi: <https://10.4271/2018-01-1773>

17. В. П. Волков та ін., Інтелектуальні системи моніторингу транспорту. Харків: НТМТ, 2015.

18. В. П. Волков та ін., Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів. Харків: Панов А. М., 2018.

					КРМ.АКСМ-24.00.000 ПЗ	Арк.
						114
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи – «Проектування апаратно-програмних засобів системи управління положенням центру ваги автомобіля»

Обсяг пояснювальної записки в аркушах – 114

Перелік креслень графічної частини:

КРМ.АКСм–24.00.00.001 Е1 - КРМ.АКСм–24.00.00.004 Е1 –
Проектування апаратно-програмних засобів системи управління положенням центру ваги автомобіля. Плакати (4 аркушів)

Дата закінчення магістерської роботи « 22 » грудня 2025 р.

Студент-дипломник _____ Федорин В.І.