

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

_____ Олександр ДІДИК

« ____ » _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Розробка та дослідження системи вимірювання маси
рухомого залізничного транспорту»**

Виконав здобувач II курсу групи АК-23М-2
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

_____ Володимир НЕГАРА

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник проекту

доцент, канд.техн.наук

_____ Ірина БЕРЕЗЮК

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент

_____ Іван САВЕЛЕНКО

« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ ” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Негари Володимира Михайловича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження системи вимірювання маси рухомого залізничного транспорту

2. Керівник роботи Березюк Ірина Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Розробити та дослідити автоматизовану систему вимірювання маси рухомого залізничного транспорту 1. Аналіз методів і засобів вимірювання маси об'єктів у русі; 2. Синтез інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування; 3. Підвищення завадостійкості методу побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта; 4. Практична реалізація інформаційної моделі оцінки маси об'єкту при обмеженому часі зважування.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз методів і засобів вимірювання маси об'єктів в русі</i>	15.10.24	
2.	<i>Синтез інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування</i>	30.10.24	
3.	<i>Підвищення завадостійкості методу побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта</i>	15.11.24	
4.	<i>Практична реалізація інформаційної моделі оцінки маси об'єкту при обмеженому часі зважування</i>	30.11.24	

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Керівник роботи _____ І.А. Березюк «____» _____ 2024 р.

Завдання прийнято до виконання

Здобувач _____ В.М. Негара «____» _____ 2024 р.

Анотація

на випускну кваліфікаційну роботу студента групи АК-23М-2 Негари Володимира Михайловича зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» на тему: «Розробка та дослідження системи вимірювання маси рухомого залізничного транспорту».

Випускну кваліфікаційну роботу присвячено розробці методів та засобів побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, необхідному для визначення маси об'єктів, що рухаються з підвищеною швидкістю. Як основний метод розв'язання запропоновано метод заданого діапазону частот, як кращий метод оцінки параметрів досліджуваного сигналу, що містить нелінійний параметр і має не єдину точку мінімуму функції середньоквадратичного відхилення.

Виявлено, що випадковий високочастотний шум, утворений динамічними явищами, що відбуваються в процесі зважування, у деяких випадках може сильно відхилити апроксимуючу криву від реального сигналу, що є причиною виникнення високої похибки оцінки параметрів досліджуваної моделі тензометричного сигналу. З метою усунення даного недоліку запропоновано удосконалити метод заданого діапазону частот методом вагової функції з використанням методу воріт.

Проведене моделювання підтвердило, що запропонована інформаційна модель оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування задовольняє представлені вимоги по точності для систем даного класу.

Ключові слова: динамічне зважування, метод заданого діапазону частот, метод вагової функції, інформаційна модель.

Summary

on final qualification work of the student of group AK-23M-2 Volodymyr Nehara on a speciality 174 «Automation, computer-integrated technologies and robotics» on the theme: «Development and research of the system for measuring weight of rolling stock».

Master's thesis is devoted to development of methods and tools for building information model estimates the mass of the object with limited time weighting required to determine the mass of objects moving at high speeds. As the main method of solving the method specified frequency band as the best method for estimating the parameters of the signal containing the nonlinear parameter and has no single point of minimum standard deviation function.

Found that random high-frequency noise formed by thermal phenomena occurring in the process of weighing, in some cases, can strongly reject curve approximating the real signal is the cause of high error estimation parameters of the model gage signal. In order to eliminate this disadvantage proposed method to improve a given frequency range by weight function using the method of the gate.

Simulations confirmed that the proposed information model of mass evaluation facility with limited time are weighing satisfies the requirements for the accuracy of this class.

Key words: dynamic weighting, given frequency range method, weight function method, information model.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналіз методів і засобів вимірювання маси об'єктів у русі.....	6
1.1 Класифікація вагового обладнання	6
1.2 Огляд сучасного стану тензометричного зважування.....	8
1.3 Аналіз методів і засобів зважування вагонів у русі.....	9
1.4 Критерії оцінки процесу зважування	19
1.5 Постановка задачі автоматизації процесу визначення маси рухомого залізничного транспорту	20
2 Синтез інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування	22
2.1 Загальне питання синтезу інформаційної моделі	22
2.2 Інформаційна модель процесу зважування.....	23
2.3 Методи побудови інформаційної моделі процесу зважування.....	34
2.4 Загальний порівняльний аналіз приведених методів	38
3 Підвищення завадостійкості методу побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта.....	40
3.1 Проблема дійсних досліджень.....	40
3.2 Моделювання випадкового шуму шляхом введення додаткової періодичної складової	43
3.3 Метод подвійного інтегрування	48
3.4 Метод вагової функції.....	53
3.5 Метод воріт	56
3.6 Моделювання роботи системи.....	59
4 Практична реалізація інформаційної моделі оцінки маси об'єкту при обмеженому часі зважування	63
4.1 Розробка аналогової частини схеми	63
4.2 Реалізація алгоритму магістрального вагового обліку.....	66

Висновки.....	70
Список літератури.....	72
Додаток А	75

Вступ

Актуальність теми. У контексті стрімкого економічного розвитку обсяг вантажопотоків постійно зростає, що створює необхідність удосконалення методів і засобів вимірювання маси, здатних оперативно та точно збирати інформацію про перевезення і формувати єдину інформаційну мережу. Очевидно, що досягнення цієї мети неможливе без високоточних і сучасних засобів вимірювання маси, які відповідають вимогам швидкості та точності отримання даних. Відомо, що основна частина перевезень масових вантажів здійснюється залізничним транспортом, а тому найбільший економічний ефект досягається саме при ваговому обліку таких вантажів. Це підкреслює актуальність розробки інженерних рішень у галузі вагонобудування, зокрема створення вагової вимірювальної апаратури для залізничних магістралей. Не менш важливою є необхідність оперативного отримання інформації. Це дозволяє своєчасно регулювати вантажопотоки та створювати оптимальні умови для перевезень. Зокрема, вагові виміри можуть виконуватися без порушення графіка руху вантажного транспорту та без його простоїв у черзі на зважування. Окрім цього, отримані дані забезпечують інформаційні потреби залізничних служб, які контролюють стан і цілісність залізничних магістралей. Це дозволяє визначати завантаженість окремих напрямків, планувати терміни міжремонтних робіт і, відповідно, сприяти підвищенню безпеки вантажних і пасажирських перевезень.

У цьому контексті найбільш перспективними є автоматизовані вагові системи обліку вантажів, які здійснюють вимір маси об'єктів, що рухаються, та, маючи зв'язок з ЕОМ, формують повний набір даних про виконані виміри. Однак, незважаючи на різноманіття наявного обладнання, досі не вдається досягти необхідної точності та оперативності вимірів. Більшість вагових систем мають обмежений діапазон швидкостей (до 15 км/г) або не забезпечують потрібну точність вимірів. Для досягнення вимог щодо точності

й швидкості зважування процес вимірювання маси має здійснюватися на швидкості до 40 км/г, з максимальною відносною похибкою не більше 1 %.

Активний розвиток автоматизованих систем управління та сучасних інформаційних технологій, спрямованих на створення інтелектуальних засобів обробки даних, зокрема методів розробки інформаційних моделей автоматизованих процесів, зумовлює їх широке застосування на всіх етапах проєктування та вдосконалення систем вимірювання маси.

Мета роботи та завдання досліджень. Основна мета роботи полягає у зменшенні часу зважування без втрати точності вимірювань шляхом розробки об'єктно-орієнтованої інформаційної моделі процесу зважування.

Відповідно до поставленої мети, в роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз взаємодії об'єкта зважування з автоматизованою ваговою платформою для створення об'єктно-орієнтованої моделі процесу зважування;
- дослідження наявних та розробка нових методів оцінки параметрів об'єктно-орієнтованої моделі, щоб визначити найефективніший спосіб створення інформаційної моделі зважування з точки зору точності та часу;
- оцінка можливостей підвищення завадостійкості обраного методу, а також проведення досліджень для розробки оптимального апаратно-програмного забезпечення, адаптованого до реальних умов вимірювань;
- розробка методу та засобів для створення інформаційної моделі оцінки маси об'єкта в умовах обмеженого часу зважування як ключового компонента апаратно-програмного комплексу автоматизованої вагової системи.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси, що протікають в автоматизованій ваговимірювальній системі під час зважування об'єктів, які переміщуються з великою швидкістю.

Предметом дослідження є методи та алгоритми створення інформаційної моделі вимірювання маси об'єкта в умовах обмеженого часу зважування.

Методи дослідження ґрунтуються на теорії оцінювання, чисельних

методах аналізу, математичній статистиці та аналізі похибок моделювання. Для вивчення процесу вимірювання та оцінки ефективності запропонованих методів у вирішенні поставленої задачі застосовувалося комп'ютерне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено нові ефективні методи підвищення завадостійкості методу заданого діапазону частот шляхом його доповнення методами подвійного інтегрування вхідного сигналу або вагової функції, що зменшують вплив високочастотних завад під час автоматизованого вимірювання маси рухомих об'єктів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці апаратно-програмних засобів для автоматизованого обліку вантажопотоків на залізничних магістралях, які забезпечують високу точність і швидкодію зважування на високих швидкостях руху. Запропоновані методи та алгоритми також можуть бути використані для розв'язання різноманітних завдань у радіотехніці, математичній статистиці та аналітичних розрахунках. Апробація результатів досліджень.

Основні результати досліджень були представлені на Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві», що відбулася 13–14 листопада 2024 року.

Публікації. Основні результати викладені в одній науковій статті.

1 Огляд методів і засобів вимірювання маси рухомих об'єктів

1.1. Категоризація вагового обладнання

Вагове обладнання в умовах ринкових відносин є ключовим інструментом для створення ефективної економіки на будь-якому підприємстві. Терези та вагові дозатори слугують основними засобами для кількісного обліку сировини та готової продукції, а також використовуються як технологічне обладнання в промисловості, сільському господарстві, у сфері споживання та обслуговування, а також для проведення наукових досліджень.

За останні 10–15 років у сфері розробки засобів вимірювання маси відбулися значні зміни, виникла потреба не лише вимірювати масу вантажу, а й формувати повний пакет даних про зважування, інтегруючи їх у загальну комп'ютерно-інформаційну мережу підприємства. Крім того, за цей період була повністю оновлена нормативна документація.

Особливістю сучасного розвитку ваговимірювальної техніки є поширення вагових пристроїв для зважування об'єктів у русі, а також використання систем зважування та дозування для управління технологічними процесами в різних галузях виробництва, обліку та регулювання вантажопотоків матеріалів.

Розвиток електронно-обчислювальної техніки та використання тензорезисторних датчиків як ваговимірювачів дозволили майже повністю відмовитися від важільних систем, значно знизити металоємність виробів, підвищити рівень автоматизації процесів зважування та дозування, а також розширити інформаційну базу за допомогою використання ЕОМ.

Наразі найбільший інтерес викликають вагові системи обліку вантажів, що дозволяють зважувати об'єкти в русі, які переміщуються залізничними магістралями, оскільки основний потік масових вантажоперевезень здійснюється саме цим шляхом. До основних переваг сучасних вагових систем відносяться можливість визначення маси об'єкта в русі, розрізнення осей

вагонів та вагонів загалом, виключення тепловоза з процесу зважування, обчислення швидкості руху та формування звіту про проведені вимірювання. Однак вимоги до таких систем постійно зростають. Швидкий економічний розвиток країни ставить на перший план питання точності та оперативності отримання вимірних даних, а також створення комп'ютерно-інформаційних мереж. Тому пропозиція нових інженерних рішень у цьому напрямку є особливо актуальною та економічно вигідною.

Класифікаційна схема терезів і дозаторів представлена в [1]. За цією схемою терези та вагові дозатори поділяються на шість груп: терези дискретної та безперервної дії, дозатори дискретної та безперервної дії, пристрої для спеціальних вимірювань і зразкові терези, гирі та пересувні терезоповірочні засоби. Основною класифікаційною ознакою є функціональне призначення, яке не враховує особливості конструкції вимірювальної апаратури, що ускладнює визначення напрямку досліджень для вирішення поставленої задачі. Для цього пропонується перейти від індивідуальних характеристик окремих видів терезів до узагальнених характеристик їх груп, доповнивши класифікаційну схему за ознакою стану об'єкта під час зважування (динамічне, статичне).

Терези дискретної дії умовно поділяються на сім груп. Дві перші групи — лабораторні та настільні терези — виключені з розгляду через відсутність на даний момент тензорезисторних силоперетворювачів для малих навантажень з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками. П'ять залишкових груп можна поділити на дві категорії — динамічні та статичні терези. Для динамічних терезів характерно те, що вантаж під час зважування переміщується відносно вагової платформи. До цієї категорії належать терези для зважування автомобілів, вагонеток, вагонів, слябів та іншого прокату на рольгангу, електровагон-терези, кранові терези. У випадку зважування в статиці вантаж перебуває в стані спокою відносно вагової платформи.

З урахуванням запропонованих узагальнень розробку комплексу

вимірювальної апаратури слід здійснювати в двох основних напрямках:

- розробка апаратури для динамічних умов зважування;
- розробка апаратури для зважування в статиці.

1.2. Аналіз сучасного стану тензометричного зважування

За обсягом перевезень масових вантажів у країнах колишнього СРСР залізничний транспорт займав провідне місце серед інших видів транспорту. Тому перші кроки в автоматизації вагового обладнання були зроблені саме для зважування вагонів на ходу, оскільки це забезпечувало високу економічну ефективність.

Розробки зарубіжних компаній для зважування вантажів в статичних і динамічних умовах були введені в експлуатацію ще в 80-х роках. Такі терези досі виробляються багатьма міжнародними компаніями, зокрема Advanced Weighing Technology Ltd., Schenck, EHP Steuerungs Wagetech GmbH, Raute Precision, Avery, Canadian National Railways, Toledo, Siemens та іншими. Однак найбільший інтерес викликають вітчизняні розробки, найбільш актуальна та обширна інформація про які надана в [1]. Серед вітчизняних виробників вагового обладнання можна відзначити НВО «Безмен», ТОВ «Пульсар», НВФ «Сведа», ЗАТ «НВП «Тест» та ТНВЦ «ТОМ». При цьому лідерство утримує ТНВЦ «ТОМ», чия розробка вимірювальної апаратури включає не лише терези для зважування вагонів і автомобілів в динаміці, а й широкий асортимент вагового обладнання для статичних вимірювань, вагових дозаторів, компараторів тощо.

Спектр виробленого вагового обладнання дуже широкий і включає терези різних типів, які відрізняються як функціональним призначенням, так і методом зважування. Серед них є кранові, автомобільні, залізничні терези, компаратори, вагові дозатори. Автомобільні та залізничні терези можуть бути призначені як для статичних, так і для динамічних вимірювань. Наприклад, залізничні терези для зважування рухомих вантажів поділяються на терези

для зважування вагонів, підвісних вантажів та для зважування в залежності від типу транспортного засобу.

У більшості випадків вантажоприймальна платформа терезів підтримується на чотирьох тензорезисторних датчиках [1]. Якщо використовується вантажоприймальна платформа з важільною системою, то зусилля передаються на два або один датчик. Сигнал від тензодатчиків, що пропорційний силі, яка діє на платформу, підсилюється і перетворюється в частоту або цифровий код. Для підвищення точності зважування сигнал тензодатчиків обробляється за допомогою спеціальних алгоритмів.

Вагони в русі зважуються за один прохід, з використанням повізкового або підвісного методу. Звичайні тензометричні терези оснащені пристроями для реєстрації ваги кожного вагона на папері, також фіксуються номер вагона та дата зважування, ці дані можуть відображатися на інформаційному табло. Деякі терези мають підключення до персональних електронних обчислювальних машин (ПЕОМ). Як правило, всі пристрої з'єднані через інтерфейси RS-232 або RS-485.

1.3. Огляд методів та засобів зважування вагонів під час руху

Особливістю розробки вимірювальної апаратури є вдосконалені засоби забезпечення завадостійкості, які оптимально узгоджуються з характеристиками завад та конкретними умовами експлуатації. Ці засоби є однією з ключових ознак спеціалізованої апаратури різного призначення і в більшості розробок складають важливий елемент наукової та технічної новизни.

Засоби захисту, які використовуються у ваговимірювальній апаратурі, аналогічні класичним і включають екранування ланцюгів передачі аналогових сигналів, гальванічне розділення вимірювальних ланцюгів, симетризацію паразитних ємностей та провідності витоку в лініях зв'язку, а

також пристрої термोकорекції, компенсації та фільтрації завад. Практика показує, що ускладнення засобів завадозахисту не призводить до значного ефекту через внутрішньосистемний характер більшості завад.

Основними труднощами, з якими стикаються розробники вимірювальної апаратури, є несприятлива характеристика завад та обмежений час для реалізації вимірювального сигналу. Загальна завада, яка виникає внаслідок побічних ефектів процесу зважування, зовнішніх електричних завад, нестабільності тензорезисторних датчиків, ліній зв'язку та АЦП, характеризується переважанням низькочастотних квазіперіодичних коливань з частотами від 3 до 7 Гц, що є основним джерелом значних похибок у вимірюваннях.

Більшість відомих методів обробки сигналу можна поділити на дві групи: методи, що базуються на обробці сигналу в аналоговій формі (з подальшим перетворенням обробленого сигналу в цифровий код), і безпосередньо цифрові методи перетворення та вимірювання сигналу. Алгоритми, що реалізуються в різних пристроях, часто дуже схожі, а відмінності зводяться до засобів їх апаратної реалізації. Тому пропонується класифікувати методи не за способом реалізації, а за методом подавлення завад. З цієї точки зору всі відомі методи можна поділити на дві основні групи:

- фільтрація сигналу (відокремлення корисного сигналу від завади);
- методи оцінки параметрів сигналу.

Цілком логічно припустити, що в обох випадках визначення шуканої величини (корисного сигналу) має ймовірнісну природу.

До першої групи належать методи, які для визначення постійної складової сигналу не потребують визначення параметрів завади. Натомість друга група включає методи, що відтворюють динамічні та статичні складові сигналу через оцінку параметрів самого сигналу.

Оскільки для більшості масових вантажів похибка зважування не перевищує 1 % (а в найгіршому випадку величина завади складає 10 % від маси вантажу), за максимальну величину відносної похибки визначення постійної складової сигналу будемо вважати 1 %.

1.3.1. Фільтрація сигналу. Методи цієї групи широко використовуються в більшості ваговимірних систем, де час обробки сигналу перевищує період низькочастотної періодичної складової сигналу, тобто при зважуванні об'єкта, що рухається зі швидкістю до 10 км/год.

Основними методами цієї групи є методи, що ґрунтуються на спектральному аналізі вимірних сигналів для визначення нульового коефіцієнта дискретного перетворення Фур'є. Ця операція може виконуватися як у цифровій, так і в аналоговій формі через інтегрування вхідного сигналу.

Перетворенню Фур'є присвячено багато досліджень [2-4], при цьому особлива увага йому приділяється в статичній радіотехніці для аналізу спектральних властивостей сигналу. У контексті поставленої задачі, спектральне розкладання сигналу є важливим для аналізу сигналу (визначення амплітудно- і фазочастотних характеристик динамічних завод), фільтрації завод через видалення з спектра гармонік певної частоти, а також для інтерполяції та апроксимації сигналу.

Найбільш поширеним є гармонійне розкладання сигналу, при якому тригонометричні функції — синус і косинус — використовуються як ортогональна система базисних функцій. Однак, крім гармонійного спектру сигналу, можна також застосовувати спектри Чебишева, Лагерра, Лежандра, Ерміта та інші.

Практичну цінність мають методи, які реалізовані та впроваджені у вагові системи обліку вантажів, оскільки їх розробка враховує як динамічні, так і статичні характеристики сигналу під час зважування об'єктів, що перебувають у русі.

Одним з таких методів є метод визначення корисного сигналу за двома його екстремальними значеннями, який був використаний у перших електронно-тензометричних терезах. Згідно з цим методом, визначається середнє арифметичне між найбільшим і найменшим значенням сигналу в проміжку часу, що охоплює один період динамічної завади.

Для вимірюваного сигналу екстремуми виникають у моменти, коли синусоїдальна складова наближається до значень $+1$ і -1 . Хоча ефект зниження впливу завади на результат визначення корисного сигналу є незначним (похибка зменшується лише в 5-10 разів), цей метод має дві позитивні характеристики. Перша з них — це простота визначення екстремальних значень сигналу, для чого в перших вагових пристроях використовувалися діод-ємнісні комірки. Друга важлива властивість — це можливість визначення корисного сигналу (з достатнім наближенням) всього за один період завади.

Одним із можливих рішень є метод інтегрування сигналу за час, що охоплює ціле число періодів завади, яке визначається через порівняння сигналу з приблизно середнім значенням. Основним недоліком цього підходу є похибка при оцінці тривалості періодів низькочастотної компоненти, оскільки вони спотворюються випадковими похибками та високочастотними складовими.

Цікавим є метод реалізації адитивного фільтру, в якому обробка сигналу здійснюється лінійним фільтром з дзвіноподібною ваговою функцією, доповненим компенсацією низькочастотної компоненти завади за допомогою гармонічного сигналу. Параметри цього сигналу визначаються через швидке перетворення Фур'є. Для узгодження частот перетворення повинно проводитися за час, кратний періоду низькочастотної компоненти завади. Похибка в оцінці цього часу призводить до зниженого ефекту подавлення завади, що вимагає вибірки сигналу мінімум за 1,5 періоду низькочастотної завади. Однак складність реалізації цього методу не

виправдовує його переваг у завадостійкості порівняно з методом простого інтегрування сигналу за період завади.

Найкращі результати досягаються при використанні фільтрів з дзвіноподібною ваговою функцією, які забезпечують оптимальне передвикривлення коротких реалізацій сигналу, мінімізуючи внесок гармонічної завади в нульову гармоніку корисного сигналу. Зазвичай такі фільтри базуються на ступінчатих апроксимаціях Хемінга, і при тривалості оброблюваних реалізацій, що перевищує 2 періоди завади, фільтр може досягати ослаблення завади до 40 дБ. Якщо ця умова не виконується, коефіцієнт ослаблення завади швидко зменшується.

На даний момент фільтри цього типу застосовуються в більшості ваговимірювальних комплексів ТНВЦ «ТОМ» для зменшення завад, викликаних механічними коливаннями вантажів[1].

1.3.2. Методи оцінки параметрів сигналу. Найбільший внесок у похибку вимірювальної апаратури вносить періодична завада, спричинена динамічними процесами, що виникають через взаємодію рухомого об'єкта з ваговою платформою. Коли тривалість вимірюваних сигналів обмежена часом перебування об'єкта на платформі обмежених розмірів, класичне усереднення сигналу за часом може суттєво спотворити оцінку математичного очікування сигналу, відхиляючи його від реального значення постійної складової. Тому така похибка не може бути значно зменшена за допомогою стаціонарних фільтрів, незалежно від їх частотних характеристик.

У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що при критичному скороченні часу спостереження сигналу для вирішення поставленої задачі найбільш ефективно застосовувати методи оцінки параметрів сигналу. В якості оптимального критерію для оцінки методу доцільно обрати критерій найменшої середньоквадратичної похибки. Варто відзначити, що в цьому

випадку йдеться про вимірювання сигналів, тривалість яких приблизно відповідає періоду низькочастотної завади

Загалом, задача оцінки параметрів сигналу полягає в наступному. Нехай на відрізку $[a, b]$ задана функція $f(t)$ з невідомими параметрами $\eta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n; t)$. Потрібно, використовуючи спостережувану реалізацію $f(t)$ цієї функції, оцінити невідомі параметри β [5-7].

Як можливе розв'язання поставленої задачі пропонується застосувати систему диференціальних рівнянь другого порядку

$$U''(t) + a_1 U'(t) + a_2 U(t) = U_0, \quad (1.1)$$

де $U(t), U'(t), U''(t)$ — Аналізований сигнал та його похідні;

a_1, a_2 — Коефіцієнти, що визначають зменшення амплітуди та частоту апроксимуючої функції — це невідомі коефіцієнти;

U_0 — Сталий компонент сигналу.

Для розв'язання системи (1.1) слід застосувати розкладання сигналу в ряд Фур'є з метою визначення першої гармоніки відповідної функції. Однак точне вирішення можливе лише при наявності більше ніж одного періоду досліджуваної функції, відсутності високочастотних завад і достатньому наближенні початкових умов до реальних значень.

У цьому контексті особливий інтерес становить регресійний аналіз та створення на його основі регресійних фільтрів, які не потребують специфічних вимог щодо тривалості досліджуваного сигналу.

Регресійний аналіз полягає в підборі значень незалежних змінних для набору спостережень за допомогою методу найменших квадратів. Цей метод дозволяє досліджувати вплив однієї або кількох незалежних змінних на залежну змінну. Наприклад, форма вхідного сигналу залежить від кількох параметрів, таких як амплітуда, початкова фаза та частота. Регресія розподіляє міру якості між цими параметрами, спираючись на отримані статичні значення

сигналу. Результати регресії можуть бути використані для прогнозування поведінки сигналу в майбутньому або для оцінки кожного з його параметрів.

Метод найменших квадратів [5-13], що є основою регресійного аналізу, полягає в наступному. Нехай у певних вузлах t_i задані значення деякої функції $y = f(t)$, $i = \overline{0, n}$ — це вузли t_i , які можуть повторюватися. Завдання методу найменших квадратів полягає в знаходженні полінома $P_m(t)$ ступеня m , $m \leq n$, який мінімізує вираз

$$S = \sum_{i=0}^n (P_m(t_i) - y_i)^2 \quad (1.2)$$

набуває найменшого значення.

В залежності від характеру вхідного сигналу застосовуються різні методи регресії. Наприклад, для апроксимації даних згідно з лінійною залежністю необхідно додати або відняти постійну величину, яка дорівнює різниці початкових значень $y = at + b$. У випадку експоненційної залежності початкові значення множаться на певну постійну величину $y = a \cdot e^{-t}$. Однак ці формули мають обмежені можливості. Наприклад, сигнал може бути ламаним, тобто складатися з кількох лінійних процесів, що розділені в часі. У таких випадках застосування однієї формули для побудови лінійної апроксимації є недостатнім. Тому для оцінки параметрів сигналу на практиці використовуються поліноми, які, крім згаданих видів залежностей, можуть точно апроксимувати також сигнали невідомої форми.

Апроксимація ортогональними поліномами є варіантом регресійного аналізу, схожим на спектральний аналіз сигналу. Основна відмінність полягає в ступені m апроксимуючого полінома $P_m(t)$, який, на відміну від попереднього, задовольняє нерівності, де $n+1$ — це кількість вузлів дискретної функції $f(t)$.

Апроксимація за допомогою ортогональних функцій, таких як багаточлени Чебишева, Лежандра, Ерміта або тригонометричні поліноми

(синус та косинус), має важливу перевагу: покращення апроксимації шляхом додавання нового члена $a_{m+1}\varphi_{m+1}(t)$ не впливає на раніше обчислені коефіцієнти $a_0, a_1, \dots, a_m$.

Якщо функція є безперервною, операцію підсумовування замінюють на інтегрування.

Зазначимо, що для обчислення коефіцієнтів полінома необхідно, щоб функція $f(t)$ була цілком визначена на всьому розглянутому інтервалі. Це означає, що апроксимація функцій ортогональними поліномами проводиться для функцій, представлених повним періодом, або припускається, що апроксимовані дані представляють повний період функції.

Апроксимація ступеневими рядами — це найбільш поширений метод регресійного аналізу, який використовується для аналізу нелінійних процесів. Нелінійна характеристика $y = f(t)$ апроксимується поліномом такого виду:

$$P_m(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m. \quad (1.3)$$

де $a_0, a_1, \dots, a_m$ шукані коефіцієнти полінома (1.3), які відповідають умові (1.2).

Апроксимація ступеневими рядами дозволяє вирішувати задачі наближення функцій, інтерполяції (за наявності шуму та оптимально вибраного ступеня m), екстраполяції (для наближення значень функції $f(t)$) та оцінки параметрів сигналу. Наприклад, у радіотехніці цей метод використовується для вивчення властивостей тріода, де отримані коефіцієнти характеризують крутизну вольтамперної характеристики, а також її перші та наступні похідні.

Апроксимація узагальненим поліномом методом найменших квадратів. За використання методу найменших квадратів апроксимуюча функція $P_m(t)$ не обов'язково повинна бути поліномом. Головне, щоб вона була лінійною комбінацією заданої системи лінійно незалежних функцій

$$P_m(t) = a_0 \varphi_0(t) + a_1 \varphi_1(t) + \dots + a_m \varphi_m(t). \quad (1.4)$$

Вираз (1.4) є узагальненим поліномом для конкретної системи функцій.

Тоді метод найменших квадратів полягає в пошуку серед узагальнених поліномів такого, для якого вираз (1.2) досягає мінімуму.

Апроксимація узагальненим поліномом має ту перевагу, що, вибираючи відповідні базисні функції $\varphi_i(t)$, можна отримати будь-який з раніше описаних поліномів. Однак на практиці використовувати узагальнений поліном замість ступеневого або полінома на основі ортогональної системи функцій не є доцільним, оскільки пошук коефіцієнтів апроксимації в цьому випадку є більш трудомістким процесом.

Варто зазначити, що цей метод є універсальним, оскільки дозволяє створювати будь-які комбінації лінійно незалежних базисних функцій та регулювати їх кількість для досягнення найкращої апроксимації функції $f(t)$. З цього випливає, що апроксимація узагальненим поліномом, в загальному випадку, є найбільш перспективним підходом для розв'язання задачі оцінки параметрів сигналу.

Більш загальні методи апроксимації не обмежуються лише лінійними агрегатами виду (1.4), а включають використання раціональних дробів або інших функцій, які легко обчислюються. Параметри таких функцій $P(t) \equiv P(t; a_1, a_2, \dots, a_m)$ визначаються таким чином $a_0, a_1, \dots, a_m$, щоб мінімізувати зважену середню квадратичну помилку або найбільшу абсолютну помилку апроксимації [40].

Метод Паде дозволяє отримати наближення для функції $f(t)$, що має достатньо багато похідних, використовуючи раціональні дроби [14]

Використання раціональних дробів для апроксимації функцій є альтернативою апроксимації за допомогою ступеневих рядів, які зазвичай застосовуються для апроксимації даних з невизначеною функціональною залежністю. Однак у разі використання раціональних дробів процес знаходження відповідних коефіцієнтів є більш трудомістким.

1.3.3. Порівняльний аналіз розглянутих методів і засобів вимірювання маси рухомих об'єктів дозволяє однозначно встановити, що основним підходом до боротьби з динамічними завадами, при заданому рівні точності, є розробка алгоритмів для різних методів і їх реалізація в програмному або апаратному вигляді. Однак варто відзначити, що найкращий результат досягається при поєднанні цих методів із засобами захисту вимірювального обладнання (наприклад, екрануванням ліній зв'язку тощо) та створенні оптимальних умов для зважування (відсутність гальмування під час зважування, вирівнювання стиків вагової платформи і рейки тощо).

Загальні результати порівняльного аналізу представлені в таблиці 1.1. Ключовим чинником є оцінка придатності кожного методу для вирішення поставленої задачі — визначення корисного сигналу при високій швидкості руху об'єкта, що зважується.

На основі даних таблиці 1.1 та результатів аналітичного огляду можна зробити такі висновки:

- Кожен із розглянутих методів може знайти своє практичне застосування при створенні вагових вимірювальних приладів або використовуватись у комбінації з іншими методами для покращення точності подавлення динамічних завад;

- Найбільш перспективними є методи апроксимації ступеневими рядами та узагальненим поліномом;

- Особливу увагу варто приділити методу апроксимації узагальненим поліномом, оскільки він найкраще підходить для вирішення задачі оцінки параметрів сигналу при обмеженому часі спостереження;

- Методи фільтрації сигналу мають великі можливості при їх використанні в поєднанні з різними підходами до подавлення динамічних завад, зокрема при високій швидкості руху об'єктів.

**Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз методів боротьби з динамічними
перешкодами**

Найменування методу	Умови зважування		
	Стаціонарні вимірювання	Вимірювання із швидкістю до 5 км/г	Вимірювання із швидкістю до 40 км/г
Звичайне усереднення	+	—	—
Фільтрація сигналу (загальний випадок для всіх приведених методів)	+	±	—
Апроксимація ортогональними поліномами	+	+	—
Апроксимація ступеневими рядами	+	+	—
Апроксимація узагальненим поліномом	+	+	+
Апроксимація за допомогою раціональних дробів	+	—	—

1.4. Критерії оцінки зважування: точність, стабільність, швидкість, ефективність

Проведення вагових вимірів для рухомих об'єктів викликає низку динамічних процесів, пов'язаних з взаємодією об'єкта з ваговою платформою, зчепленням вагонів, власними коливаннями вагона тощо. Крім того, швидкість руху потягу та величина завад, спричинених цими процесами, значно ускладнюють розробку методів подавлення завад і виділення корисного сигналу. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці критеріїв для оцінки результатів зважування, що дозволяють максимально точно визначити

придатність отриманих даних для конкретних умов вимірювань.

Ці критерії використовуються таким чином: припустима швидкість руху потягу, частотний діапазон завад та досяжна точність зважування. Частотний діапазон завад вводиться для обмеження смуги пропускання фільтра, що дозволяє максимально придушити завади, які найбільше впливають на досліджуваний сигнал. Два інших критерії — припустима швидкість руху та досяжна точність зважування — є суперечливими, оскільки з підвищенням швидкості руху потягу визначення маси стає складнішим через коротший час вимірювання та наявність динамічних завад. Водночас при низькій швидкості або статичних вимірюваннях точність зважування найвища, оскільки в таких умовах відсутні динамічні завади, які можуть значно знизити точність результатів. Отже, в сукупності ці критерії дають можливість оцінити придатність того чи іншого методу визначення маси об'єкта в різних умовах зважування.

1.5. Формулювання задачі автоматизації процесу визначення маси рухомого залізничного транспорту

Конфлікт між швидкістю руху об'єкта, що зважується, і точністю вимірювань можна вирішити двома способами.

Для проведення вагових вимірів при високій швидкості руху потягу необхідно застосовувати швидкодіючий прецизійний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) для збирання великої кількості вибірок досліджуваного сигналу. Отримані дискретні значення потім обробляються методом, який базується на визначенні параметрів об'єктно-орієнтованої моделі процесу зважування, створеної на основі реальних даних вимірювального обладнання.

Оцінка параметрів об'єктно-орієнтованої моделі процесу зважування проводиться шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки апроксимації, що дозволяє отримати інформативну величину — масу об'єкта, що зважується.

Безсумнівно, другим шляхом досягнення необхідної точності вимірювань буде конструктивне вдосконалення вагової платформи при збереженні існуючих методів подавлення завад, що використовуються в сучасних ваговимірювальних системах.

З урахуванням сучасних досягнень у галузі автоматизованих систем управління та передових інформаційних технологій, було зроблено спробу вирішення першої задачі.

Для вирішення основної задачі автоматизації — розробити новий метод зменшення часу зважування при збереженні точності вимірювань за допомогою об'єктно-орієнтованої інформаційної моделі процесу зважування — необхідно розв'язати низку допоміжних підзадач:

1. Дослідження взаємодії об'єкта, що зважується, з автоматизованою ваговою платформою для створення об'єктно-орієнтованої моделі процесу зважування; аналіз існуючих методів оцінки параметрів цієї моделі з метою визначення найбільш ефективного, з огляду на час та точність, способу побудови інформаційної моделі процесу зважування;

2. Аналіз можливостей підвищення завадостійкості обраного методу розв'язання задачі, проведення досліджень для розробки оптимального апаратно-програмного забезпечення, що відповідає реальним умовам вимірювань;

3. Розробка алгоритму та експериментальна перевірка запропонованих методів побудови інформаційної моделі процесу автоматизованого зважування для оцінки інформативного параметра — маси об'єкта, що рухається з високою швидкістю.

2 Розробка інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта за умов обмеженого часу зважування

2.1. Загальна проблема розробки інформаційної моделі

Модель — це фізична система або математичний опис, що відображає ключові властивості чи характеристики досліджуваного об'єкта, процесу або явища [15]. Як відомо, ідеальних моделей не існує, і кожна модель має певні обмеження та припущення, які не впливають на основні характеристики досліджуваного процесу чи явища.

У нашому випадку задача полягає в розробці нового методу побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, що дозволить з максимальною можливою точністю визначити інформативний параметр тензометричного сигналу — масу вантажу.

Для розв'язання цієї задачі необхідно встановити зв'язок між об'єктом зважування, який містить інформативний параметр, та вимірювальною системою, що має за мету виявлення цього параметра, породженого об'єктом зважування. Іншими словами, потрібно розробити об'єктно-орієнтовану модель процесу зважування та метод оцінки інформативного параметра цієї моделі, тобто метод створення інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта.

У зв'язку з цим потрібно вирішити дві підзадачі. По-перше, необхідно дослідити закономірності взаємодії об'єкта, що зважується, з ваговою платформою, для чого слід створити об'єктно-орієнтовану модель процесу зважування. По-друге, на основі цієї моделі потрібно вивчити існуючі методи та розробити нові підходи до побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування.

Розв'язання першої підзадачі полягає у вивченні об'єкта зважування, його взаємодії з ваговою платформою, а також усіх фізичних явищ, що виникають під час зважування в русі. Результатом цього етапу є об'єктно-

орієнтоване моделювання реального процесу зважування з урахуванням певних припущень, що дозволяють перейти до розв'язання другої підзадачі.

Розв'язання другої підзадачі полягає у виборі методу побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, який відповідає розробленій моделі та обраним критеріям оцінки.

2.2. Модель інформаційного процесу зважування

2.2.1. Характеристика динамічних явищ, що виникають під час зважування. Вагові вимірювання супроводжуються динамічними процесами, які можуть значно збільшити похибку результатів порівняно зі статичними вимірюваннями. Тому детальне вивчення цих динамічних явищ є ключовим етапом для подальших розробок і досліджень методів, які використовуються в системах вимірювальної апаратури вагового комплексу.

На рис. 2.1 представлена спрощена структурна схема вагових терезів для вагонів.

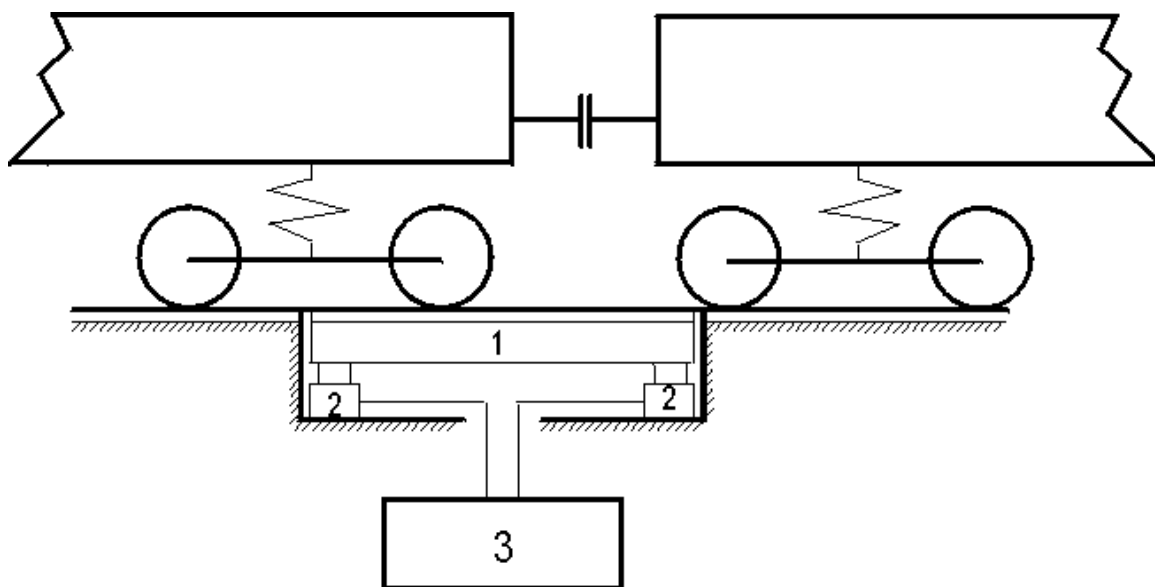


Рисунок 2.1 – Схема спрощеної структури вагонних терезів

При проходженні вагона через ваговий комплекс його колеса заїжджають на вагову платформу 1, яка опирається на тензодатчики 2. Сигнал, що надходить від тензодатчиків, через лінії зв'язку передається до блоку вимірювальної апаратури 3. Цей блок зазвичай включає фільтр

(зазвичай RC-фільтр), комутатор, АЦП та ЕОМ, що використовуються для реалізації методів визначення маси та формування результату (створення бази даних вимірювань і видача відповідних звітів). До складу вагового комплексу також може входити цифрове табло, яке відображає результати поточного вимірювання.

Під час статичних вимірювань сигнал тензодатчиків характеризується лише постійною величиною, що відповідає масі візка (колеса) вагона. У випадку динамічних вимірювань вихідний сигнал тензодатчиків зумовлений додатковими факторами, серед яких:

- Коливання елементів вагона і вагової платформи, що виникають через геометричні нерівності рейкового шляху, дефекти стиків, пружну деформацію конструкцій, овальність коліс, ексцентриситет їх установки, пошкодження поверхні коліс та інше;
- Непостійність тягового опору під час руху вагона, що зважається на терезах;
- Нерівномірність руху і гальмування вагонів під час зважування;
- Передача вертикальних зусиль від сусідніх вагонів через автозчеплення;
- Недосконалість конструкції і установки вагової платформи, зокрема, її невідповідність площині підхідних шляхів, а також ухил вагового шляху.

При цьому припускається, що тензодатчики є ідеальними, а їх інструментальна похибка дорівнює нулю.

Динамічним явищам, що виникають під час зважування, присвячено кілька досліджень, при цьому результати щодо факторів, що викликають динамічні завади, виявляються практично ідентичними. Загальну характеристику цих динамічних явищ, що виникають у процесі зважування, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Опис динамічних явищ, що виникають у процесі зважування

Джерела динамічних явищ	Відносна амплітуда завади, %	Діапазон частот динамічних коливань, Гц	Коефіцієнт загасання коливань
Власні коливання вагона	5..10	2,9..9,0	1,1..1,5
Власні коливання вагової платформи	0,1..0,3	190..310	1,30..1,75
Колівання необресорених мас вагона	0,1..0,2	25..35	1,5..2,0
Нерівномірність руху вагона	0,4..0,8	—	—
Гальмування в момент зважування	1,5..1,8	—	—
Передача зусиль від сусідніх вагонів через автозчеплення	1,0..7,5	—	—
Ухил підхідних шляхів	0,3..0,7	—	—

В цілому, можна зазначити, що вихідний сигнал тензодатчиків, окрім постійної складової, містить динамічні складові, які можна поділити на дві групи — стаціонарні (квазіперіодичні) та нестаціонарні (неперіодичні). Аналіз показує, що стаціонарні динамічні завади, зумовлені коливаннями обресорених мас вагона, мають частотний діапазон 2,9...9 Гц, з основною частотою коливань у межах 3,5...7 Гц. Відносні амплітуди цих завад можуть досягати 10 %, в середньому складаючи 3...4 %. Колівання необресорених мас вагона знаходяться в діапазоні частот 25...35 Гц, з амплітудою не більше 0,2 %. Більш високочастотні коливання в діапазоні 190...310 Гц, що відносяться до коливань елементів конструкції вагової платформи, мають незначну амплітуду і не впливають істотно на похибку зважування через швидке загасання. Зазвичай ці коливання не враховуються в розрахунках.

Нестационарні динамічні явища переважно зумовлені впливом автозчеплення, гальмуванням та нерівномірним рухом. Для зменшення їх впливу на похибку зважування необхідно створити умови, які виключають або максимально знижують ймовірність виникнення таких завад. Однією з рекомендацій, сформульованих на основі практики експлуатації терезів, є забезпечення рівномірного руху потягу через терези (без ривків і гальмування), що легше досягти на високих швидкостях (понад 10 км/год). Інші джерела динамічної похибки, такі як ухил підхідних шляхів, різна висота вагової платформи та підхідних шляхів, а також прогин платформи, можуть бути усунені при дотриманні вимог під час будівництва, монтажу та експлуатації терезів, тому боротьба з ними не є принциповою проблемою.

2.2.2. Об'єктно-орієнтована модель вимірювального сигналу. Аналіз динамічних явищ, що виникають у процесі зважування, показує, що тензометричний сигнал, отриманий від датчиків вагової платформи, має складну стохастичну природу (рис. 2.2), утворену множиною різних факторів. Однак не всі компоненти цього сигналу можна усунути шляхом розробки методів подавлення завад. Частина складових, що виникають через недосконалість конструкції вагової платформи, її монтажу або похибки вимірювальної апаратури, повинна бути усунена конструктивними методами. Інша частина сигналу, в основному спричинена взаємодією рухомого об'єкта з ваговою платформою (рис. 2.1), може бути усунена алгоритмічно, тобто за допомогою розробки відповідних методів придушення завад, реалізованих апаратно чи програмно. Тому необхідно визначити, які складові сигналу слід враховувати при розробці методу подавлення завад, які можна ігнорувати через незначну амплітуду та швидке загасання, а також визначити обмеження та допущення, що дозволяють спростити методи з допустимою втратою точності.

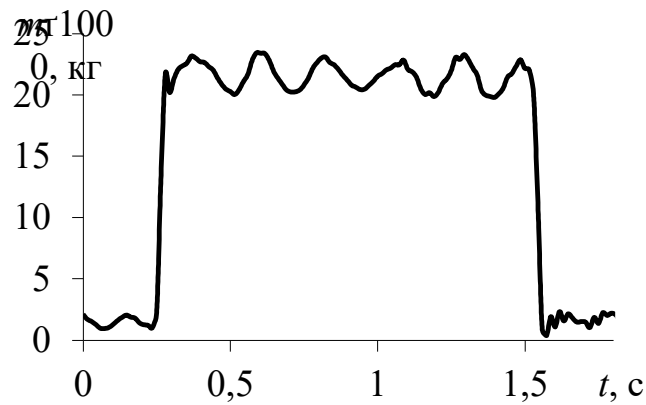


Рисунок 2.2 – Стандартний вигляд реального вихідного сигналу тензодатчиків

У зв'язку з цим, побудуємо узагальнену об'єктно-орієнтовану модель вимірювального сигналу (рис. 2.3), ґрунтуючись на даних пункту 2.2.1.

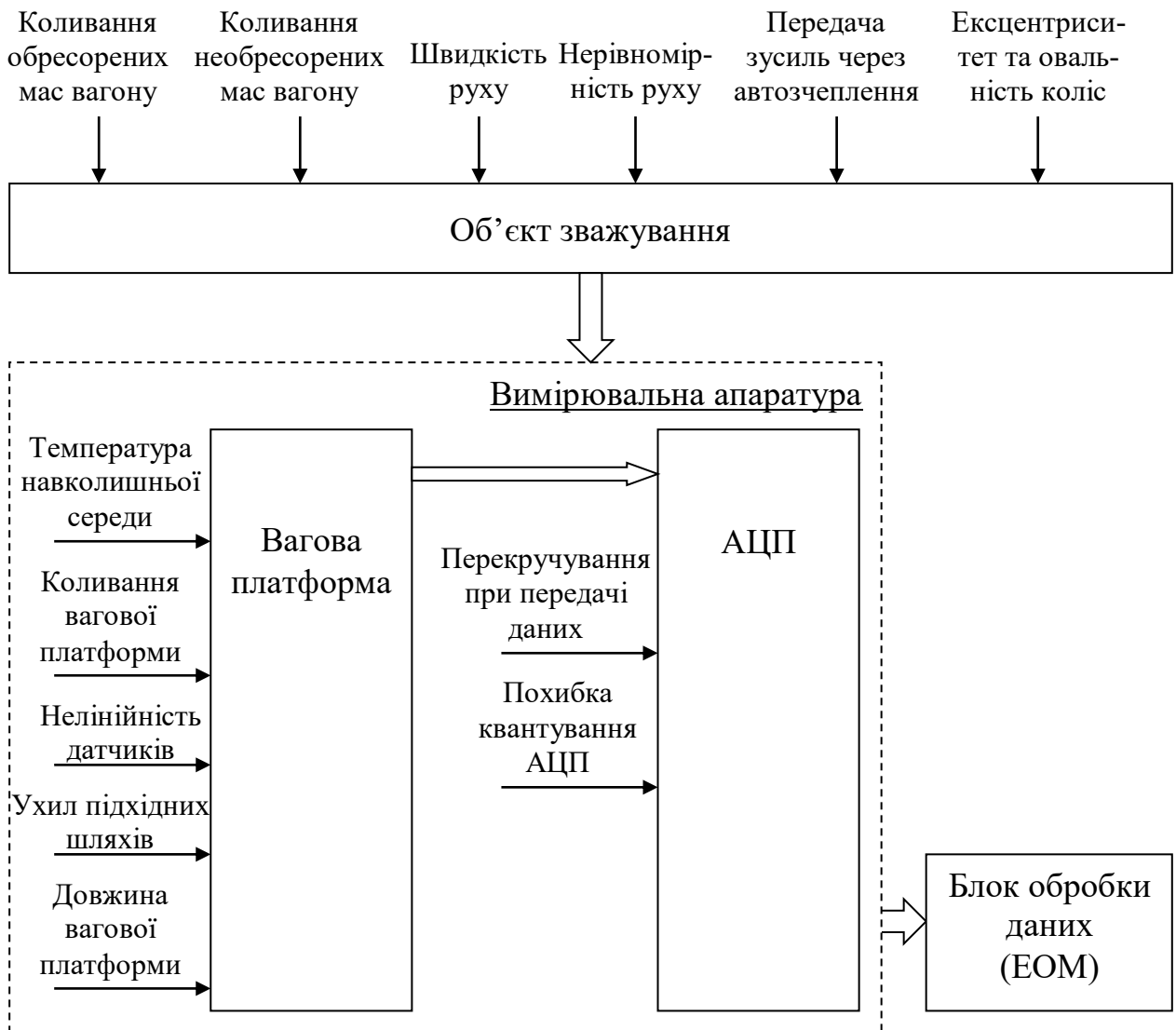


Рисунок 2.3 – Схема формування об'єктно-орієнтованої моделі вимірювального сигналу

Як показано на рис. 2.3, перед тим як потрапити до блоку обробки даних, що реалізує відповідний метод подавлення завад, вимірювальний сигнал, який відображає масу вантажу, спотворюється низкою факторів, зумовлених як рухом зважуваного об'єкта, так і недосконалістю вимірювальної апаратури. Як вказано в табл. 2.1 та п.п. 2.2.1, всі завади за їх функціональним описом можна поділити на стаціонарні та нестаціонарні, що дозволяє представити вимірювальний сигнал у вигляді об'єктно-орієнтованої моделі

$$f(t) = D + \sum_{i=1}^n A_{ni} e^{-\alpha_i t} \sin(\Omega_i t + \psi_i) + \sum_{j=1}^m F_{hj} \quad (2.1)$$

де D — Постійна частина сигналу (яка відповідає масі вантажу);

A_{ni} , α_i , Ω_i , ψ_i — Амплітуда, коефіцієнт загасання, частота та початкова фаза i -ї періодичної завади (стаціонарний компонент сигналу);

F_{kj} — Величина, що відповідає j -ї нестаціонарній компоненті сигналу.

Об'єктно-орієнтована модель (2.1) має такі характеристики:

— Інкапсуляція: усі параметри вимірювального сигналу об'єднані в одному об'єкті — ваговому вимірювальному комплексі.

— Спадкування: модель успадковує всі параметри об'єкта зважування, формуючи ієрархію: "об'єкт зважування → вагова платформа → АЦП → блок обробки даних".

— Поліморфізм: у блок обробки даних надходять дані, що відображають властивості об'єкта зважування, тобто всі властивості ієрархії "блок обробки даних ↔ АЦП ↔ вагова платформа ↔ об'єкт зважування" втілені в моделі.

Подальше припущення полягає в тому, що коливання в горизонтальних площинах не впливають на точність зважування завдяки спеціальній підвісці вагоприймального пристрою (вагової платформи), а основну небезпеку для точності представляють коливання у вертикальній площині. Як зазначалося раніше, існує п'ять основних факторів, що впливають на форму реального вихідного сигналу. Проте, незважаючи на різноманітність і складність процесу

зважування, спричинену індивідуальністю вантажів та їх взаємодією з ваговою платформою або зовнішнім середовищем, всі дискретні вантажі на виході тензодатчиків формують схожий сигнал, типова форма якого наведена на рис. 2.2. Подібність цих сигналів полягає в тому, що вони складаються з постійної складової, пропорційної масі вантажу, і динамічної завади, що являє собою суму гармонічних коливань та неперіодичних складових. Це дає змогу описати різні за характером процеси зважування єдиною моделлю (2.1).

Гармонічні та неперіодичні складові завад залежать від типу зважування, причому в більшості випадків домінують гармонічні завади. Варто зазначити, що стандартні методи обробки вимірювального сигналу $f(t)$ не завжди ефективні для боротьби з неперіодичними завадами, оскільки в багатьох випадках вони не дають задовільних результатів. Тому для зменшення впливу таких завад необхідно створити оптимальні умови зважування, що мінімізують їхній ефект.

При зважуванні вантажів у русі одним із ключових аспектів є час обробки вимірюваного сигналу, який безпосередньо впливає на ефективність застосовуваних методів боротьби з завадами. Відомо, що чим довший час обробки, тим більше періодів завади потрапляє в цей інтервал, що покращує умови для їх подавлення. Однак у випадку, коли зважування має обмежений час, цей фактор стає вирішальним.

Розглянемо умови обробки сигналу при підвищеній швидкості руху вагона (до 40 км/г), коли дефіцит часу для подавлення завад є найбільш критичним. Важливо зазначити, що довжина вагової платформи обмежена і залежить від мінімальної міжосьової відстані для конкретного транспортного засобу, яка становить 1,5 м. Зміна цієї довжини унеможлиблює розрізнення вагонів потягу та виключає тепловоз з процесу зважування. Як показано в п.п. 2.2.1, частота коливань основної гармоніки рухомих вагонів, в залежності від їх маси та жорсткості підвіски, зазвичай знаходиться в діапазоні від 3 до 7 Гц, при цьому відносна амплітуда коливань може досягати 10 %. Якщо не врахувати цей вплив на шукану величину, це

приведе до значної похибки результату. Враховуючи два крайні сценарії, коли швидкість потягу максимальна (40 км/г), а частота коливань вагона мінімальна (3 Гц), і враховуючи довжину вагової платформи, час перебування осі вагона на платформі складе близько 0,13 с. Отже, для виділення постійної компоненти сигналу на фоні періодичних завад, основна періодична завада повинна враховуватися як така, що займає трохи більше чверті періоду коливань.

Вказані умови обробки сигналу визначають новий об'єктно-орієнтований підхід до моделі зважування, який є необхідним для розробки методів, спрямованих на визначення інформативного параметру сигналу — постійної складової, в умовах обмеженого часу. Інакше кажучи, модель процесу повинна точно відображати динамічні явища реального процесу зважування, оскільки їх вплив найбільш суттєво позначається на отриманні точного результату при обробці сигналу протягом інтервалу від чверті періоду до повного періоду коливань.

Об'єктно-орієнтовану модель зважування можна визначити як модель, що враховує основні динамічні фактори процесу

$$f(t) = D + A \sin(\Omega t + \psi) + \vec{\xi}(t), \quad (2.2)$$

де D — Постійна компонента сигналу;

A, Ω, ψ — Амплітуда, частота та початкова фаза головної періодичної компоненти сигналу;

$\vec{\xi}(t)$ — Випадкова величина, що описує стаціонарні та нестаціонарні процеси, які виникають під час зважування.

Варто зазначити, що об'єктно-орієнтована модель (2.2) є адекватною та відповідає вимогам задачі. На відміну від моделі (2.1), вона не включає множник, який характеризує декремент загасання періодичної складової сигналу. Це пояснюється тим, що через малий час обробки сигналу та низький декремент загасання, цей множник можна опустити, оскільки він не має суттєвого впливу на похибку результату. Основна низькочастотна періодична

завада виражена явно, оскільки саме її наявність спричиняє найбільші похибки і ускладнює визначення постійної складової сигналу. Інші динамічні та статичні складові сигналу представлені через $\vec{\xi}(t)$.

2.2.3. Інформаційна модель процесу зважування та її обмеження. Як було зазначено, найбільш перспективними є вагові системи для обліку вантажів, що дозволяють вимірювати масу об'єктів під час їх руху, а також мають зв'язок з ЕОМ для формування повного пакету даних про проведені вимірювання (див. розділ 1). Однак, незважаючи на широкий асортимент наявного обладнання, досягти необхідної точності та оперативності вимірів наразі не вдається. Більшість сучасних вагових систем мають обмежений діапазон швидкості — до 15 км/г, або не забезпечують потрібну точність вимірювань. Для задоволення вимог щодо точності та швидкості зважування процес повинен здійснюватися на швидкості до 40 км/г, з максимальною відносною похибкою не більше 1 %.

Зазначені вимоги суттєво змінюють умови зважування (рис. 2.3 — враховуються фактори швидкості руху та довжини вагової платформи). У цьому випадку час обробки вимірювального сигналу значно менший за період низькочастотної завади. На рис. 2.2 показаний сигнал, отриманий з датчиків вагової платформи під час зважування вагона, що рухається з низькою швидкістю. Як видно з графіка, сигнал містить постійну складову (масу вантажу — інформативний параметр), низькочастотну періодичну заваду та випадковий шум. При цьому періодична завада охоплює більше ніж один період. В таких умовах визначення маси вантажу не є складним, оскільки просте усереднення значень сигналу дає задовільний результат.

Другим, більш складним випадком є проведення вагових вимірювань при русі об'єкта зі швидкістю, близькою до 40 км/г (рис. 2.4). У цьому випадку аналізу піддається лише приблизно чверть періоду низькочастотної періодичної складової сигналу.

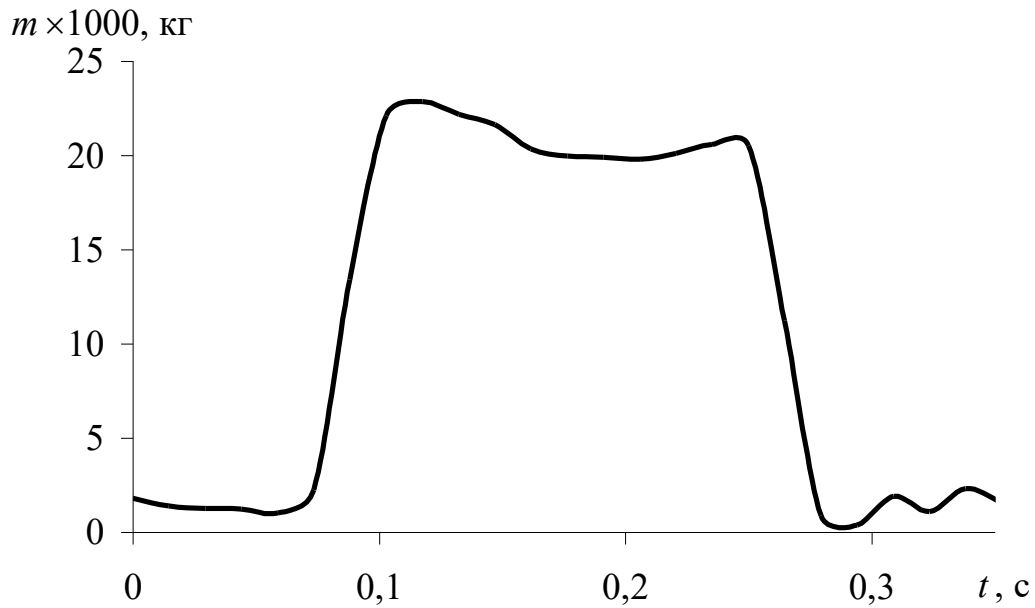


Рисунок 2.4 – Сигнал тензодатчика, отриманий під час вимірювання маси вагона при великій швидкості руху

Як було зазначено раніше, в цьому випадку класичне усереднення вхідного сигналу за часом призводить до значного зсуву оцінки математичного очікування виміряного сигналу від фактичного значення постійної складової. Це свідчить про неможливість зменшення цієї похибки за допомогою стаціонарних фільтрів, незалежно від їх частотних характеристик.

У такому випадку для визначення інформативного параметру сигналу потрібно розробити інформаційну модель, яка відображає вплив кожної з компонент сигналу на результуючий вихідний сигнал.

Інформаційна модель — це система змінних, сконструйованих за певними правилами, де кожна змінна має визначену кількість можливих значень, що разом передають ненульову кількість інформації про об'єкт пізнання. Правила побудови цієї системи визначають методи представлення та аналізу інформаційної моделі [16].

Використовуючи об'єктно-орієнтовану модель з п.п. 2.2.2 (рис. 2.3 та (2.2)), яка описує взаємозв'язок між об'єктом зважування та компонентами вимірювальної апаратури, розробимо інформаційну модель процесу зважування. Ця модель, окрім опису самого процесу зважування (на основі об'єктно-орієнтованої моделі), також визначає вплив кожної складової сигналу на результат вимірювання. Схема такої інформаційної моделі представлена на рис. 2.5

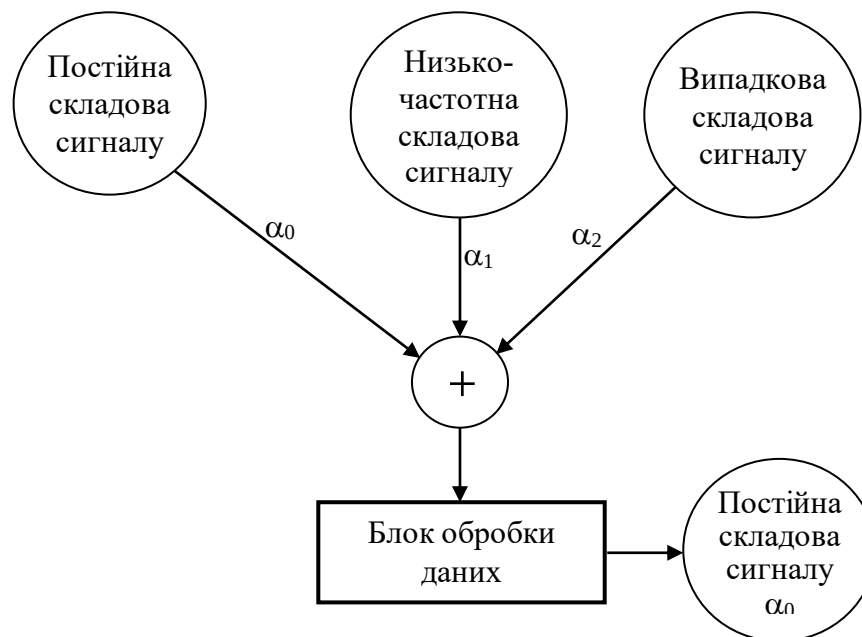


Рисунок 2.5 - Діаграма інформаційної моделі

Згідно з (2.2), основними складовими сигналу є постійна складова, низькочастотна періодична завада та випадковий шум, що визначає три відповідні вузли в інформаційній моделі (рис. 2.5). Кожна складова сигналу має свою вагу — α_0 , α_1 , α_2 , які використовуються для оцінки параметрів моделі (2.2). Отже, під побудовою інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування мається на увазі розробка та дослідження методів визначення величин α_0 , α_1 , α_2 , зокрема інформативного параметру сигналу α_0 , що відповідає масі вантажу.

Для цього визначимо обмеження та припущення щодо величин параметрів моделі (2.2), враховуючи при цьому інформацію, наведену в таблиці 2.1.

Розглянемо досліджуваний сигнал, який представлений сукупністю рівномірно розподілених відліків $t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1} = \Delta t$ у часі, де $i = \overline{0, n}$ — значення сигналу, а $n + 1 = N$ — кількість відліків сигналу.

Форма зміни сигналу в часі відома і задається моделлю (2.2).

У цьому випадку припустимо, що час спостереження за сигналом T_n менший за період завади T_n , тобто $T_n < T_n$. Це впливає з максимальної швидкості руху потягу (40 км/г), мінімальної частоти коливань вагону (3 Гц) та сталого розміру вагової платформи (1,5 м). Таким чином, періодична складова сигналу охоплює менше ніж один повний період, тобто менше ніж $T_n \approx \frac{1}{4} T_n$. Максимальна амплітуда завади не перевищує 10-15 % від постійної складової сигналу, а випадковий шум коливається в межах 0,1-1 %.

Отже, необхідно розробити метод, який за заданих умов гарантуватиме точність визначення постійної складової сигналу D (оцінки α_0) з відносною похибкою, що не перевищує 1 %.

— Дослідження можливих методів побудови інформаційної моделі зважування та визначення інформативного параметру сигналу вказують на те, що для розв'язання поставленої задачі найбільшу увагу варто приділити таким методам:

- метод визначеного діапазону частот;
- методи нелінійної регресії.

2.3. Методи розробки інформаційної моделі процесу зважування

Регресійний аналіз, який включає визначення оцінок характеристик процесу або статистичних даних, ґрунтується на апроксимації (наближенні) досліджуваних даних за допомогою полінома. Як правило, для оптимізації наближення використовується критерій мінімізації середньоквадратичної похибки. Апроксимація досягається шляхом обчислення коефіцієнтів

полінома, які задовольняють обраний критерій оптимальності. Отримані коефіцієнти можна потім використовувати для аналітичного представлення даних, визначення різних характеристик, екстраполяції сигналу тощо.

Метод заданого діапазону частот ґрунтується на апроксимації за допомогою узагальненого полінома, використовуючи метод найменших квадратів. Відмінність цього методу полягає в наявності визначеної системи базисних функцій, що відповідають моделі (2.2). Для визначення інформативного параметру сигналу застосовується поетапний перебір частот у заданому діапазоні. Оскільки метод базується на критерії найменших квадратів, оптимальним вважається результат, при якому середньоквадратична похибка мінімальна.

Апроксимація узагальненим поліномом методом найменших квадратів, що лежить в основі методу заданого діапазону частот, полягає в пошуку полінома m -го ступеня, який найкраще наближає досліджувані дані $m \leq n$

$$P_m(t) = a_0\varphi_0(t) + a_1\varphi_1(t) + \dots + a_m\varphi_m(t) \quad (2.3)$$

такого, для якого справедливий вираз

$$S = \sum_{i=0}^n (P_m(t_i) - f_i)^2 \rightarrow \min \quad (2.4)$$

де $a_0, a_1, \dots, a_m$ — Коефіцієнти узагальненого апроксимуючого полінома визначаються таким чином, щоб мінімізувати помилку апроксимації;

$\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ — Визначена система основних функцій;

S — Середньоквадратична похибка відхилення апроксимуючого полінома (2.3) від заданої функції $f(t)$.

Коефіцієнти $a_0, a_1, \dots, a_m$ полінома (2.3) знаходяться шляхом розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

$$\frac{1}{2} \frac{\partial S}{\partial a_j} = \sum_{i=0}^n (a_0\varphi_0(t_i) + a_1\varphi_1(t_i) + \dots + a_m\varphi_m(t_i) - y_i) \varphi_j(t_i) = 0. \quad (2.5)$$

Вводячи відповідні позначення

$$(\varphi_j, \varphi_k) = \sum_{i=0}^n \varphi_j(t_i) \varphi_k(t_i), \quad d_k = \sum_{i=0}^n y_i \varphi_k(t_i), \quad j, k = \overline{0, m},$$

систему рівнянь (2.5) можна привести до матричної форми

$$Ca = d, \quad (2.6)$$

де

$$C = \begin{pmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_0, \varphi_1) & \dots & (\varphi_0, \varphi_m) \\ (\varphi_1, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_1, \varphi_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\varphi_m, \varphi_0) & (\varphi_m, \varphi_1) & \dots & (\varphi_m, \varphi_m) \end{pmatrix}, \quad a = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_m \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} d_0 \\ d_1 \\ \dots \\ d_m \end{pmatrix}.$$

Розв'язавши систему (2.6) та підставивши отримані значення $a_0, a_1, \dots, a_m$ в рівняння (2.3) з відповідними базисними функціями, отримаємо шуканий узагальнений апроксимуючий поліном.

У методі заданого діапазону частот апроксимація виконується кілька разів, при цьому значення частоти базисних функцій поступово змінюється в межах встановленого діапазону частот.

З огляду на (2.2)

$$A \sin(\Omega t + \psi) = A \sin \psi \cos \Omega t + A \cos \psi \sin \Omega t = A_1 \cos \Omega t + A_2 \sin \Omega t,$$

де $A_1 = A \sin \psi = \text{const}$;

$$A_2 = A \cos \psi = \text{const};$$

Визначимо систему базисних функцій, обмеживши ступінь апроксимуючого полінома $m = 2$. Варто зазначити, що ця модель є повністю $D + A_1 \cos(\Omega t) + A_2 \sin(\Omega t)$ адекватною моделі (2.2), відрізняючись лише іншим записом, який є більш зручним для дослідження за допомогою запропонованого методу.

Отже, система базисних функцій набуває наступного вигляду

$$\begin{cases} \varphi_0(t) = 1; \\ \varphi_1(t) = \cos(\Omega t); \\ \varphi_2(t) = \sin(\Omega t). \end{cases} \quad (2.7)$$

Згідно з (2.7), для постійної складової D використовується функція $\varphi_0(t)$, а періодична складова представлена набором функцій $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$.

Подальші обчислення полягають у знаходженні коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 , для яких величина (2.4) є мінімальною. Алгоритм цих обчислень є ітераційним процесом і передбачає побудову множини апроксимуючих кривих в межах заданого частотного діапазону $[\Omega_{\min}, \dots, \Omega_{\max}]$ з кроком $\Delta\Omega$.

$$Z = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Delta\Omega}$$

На основі отриманих коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 визначаються значення постійної складової сигналу та періодичної завади, при цьому припускається, що найкраща апроксимація ($S \approx 0$) була досягнута на j -й ітерації.

$$D = a_{0_j}, A = \sqrt{a_{1_j}^2 + a_{2_j}^2}, \psi = \arctg\left(\frac{a_{1_j}}{a_{2_j}}\right), \Omega = \Omega_{\min} + j\Delta\Omega. \quad (2.8)$$

Для наочнішого представлення запропонованого методу побудуємо графіки залежності відносної похибки визначення постійної складової сигналу від частоти періодичної завади. Як досліджуваний матеріал використаємо модель сигналу, що відповідає рівнянню (2.2). Для цього змодельуємо сигнал (2.2) з такими параметрами $D=1000; A=100$;

$$f(t) = 1000 + 100 \sin(\Omega t + \psi) + \vec{\xi}(t), \quad (2.9)$$

де Ω — частота періодичної завади, яка варіюється в межах 3...7 Гц;

ψ — початкова фаза, що вибирається випадковим чином в інтервалі 0...3400°;

$\vec{\xi}(t)$ — синусоїдальний сигнал, обраний так, щоб на заданому інтервалі містилося 10 повних періодів.

Кількість дискретних значень у вибірці становить $N = 30$.

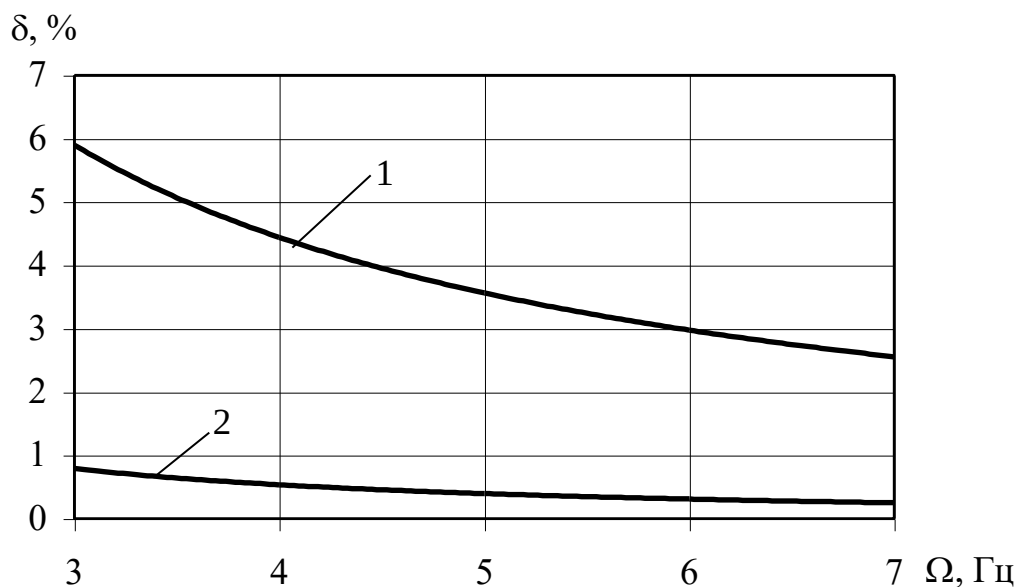


Рисунок 2.6 - Залежність відносної похибки визначення постійної складової сигналу від частоти за допомогою методів: 1 — просте усереднення; 2 — метод заданого діапазону частот

Як показують графіки (рис. 2.6), використання методу заданого діапазону частот дає змогу визначити величину постійної складової сигналу з точністю, яка в десять разів перевищує точність, досягнуту за допомогою середньоарифметичного значення. Цей метод забезпечує необхідну точність вимірювань — $\delta \leq 1\%$, за умови, що швидкість руху потягу становить 40 км/г, а частота коливань не нижча за 3 Гц.

2.4. Загальний порівняльний аналіз наведених методів

Згідно з поставленою задачею, надамо загальну оцінку запропонованих методів.

Порівняльний аналіз методів представлений у табл. 2.2. Аналогічно таблиці 1.1, розглядається можливість застосування кожного з методів для проведення вагових вимірів в різних умовах, оскільки вагові вимірювання планується здійснювати не лише при максимальній швидкості руху (40 км/г), а й на нижчих швидкостях (від 3 до 12 км/г), при цьому частота коливань вагону становить 3 Гц. Також важливою є перспектива впровадження

запропонованих методів у вже існуючі вагові комплекси для підвищення точності визначення інформативного параметру сигналу.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз запропонованих методів

Найменування методу	Умови зважування	
	Похибка вимірювання при швидкості до 15 км/г, %	Похибка вимірювання при швидкості до 40 км/г, %
Звичайне усереднення	1,5	6
Метод заданого діапазону частот	0,1	0,7

Згідно з даними табл. 2.2, можна зробити висновок, що на основі аналітичного огляду та результатів досліджень цього розділу, метод заданого діапазону частот є найефективнішим для розв'язання задачі побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта в реальних умовах. Цей метод забезпечує високу точність вимірювань та здатний визначати шукану величину як при низьких, так і при високих швидкостях руху об'єкта, що зважується.

3 Покращення завадостійкості методу побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта

3.1. Проблема реальних досліджень

Дослідження різних методів побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування показали, що метод заданого діапазону частот є найкращим варіантом. Цей метод забезпечує необхідну точність вимірювань і відзначається високою стійкістю до випадкового шуму, що робить його оптимальним для застосування в реальних задачах зважування рухомих об'єктів.

Однак під час проведення досліджень було виявлено, що в деяких випадках запропонований метод дає збій. Зокрема, серед значень, що задовольняють задану похибку, були отримані результати, у яких похибка перевищувала допустиме значення в 10-20 разів. Додаткові дослідження показали, що це пов'язано з несприятливим розподілом випадкового шуму, вплив якого на крайні ділянки сигналу значно сприяв збільшенню похибки.

Прикладом збійної ситуації є модель тензометричного сигналу, зображена на рис. 3.1. Як показано на графіку, періодичний компонент сигналу, що моделює випадковий шум, має найбільше відхилення від досліджуваного сигналу на крайніх ділянках, де сигнал не містить шуму. У таких випадках похибка методу досягає максимального значення.

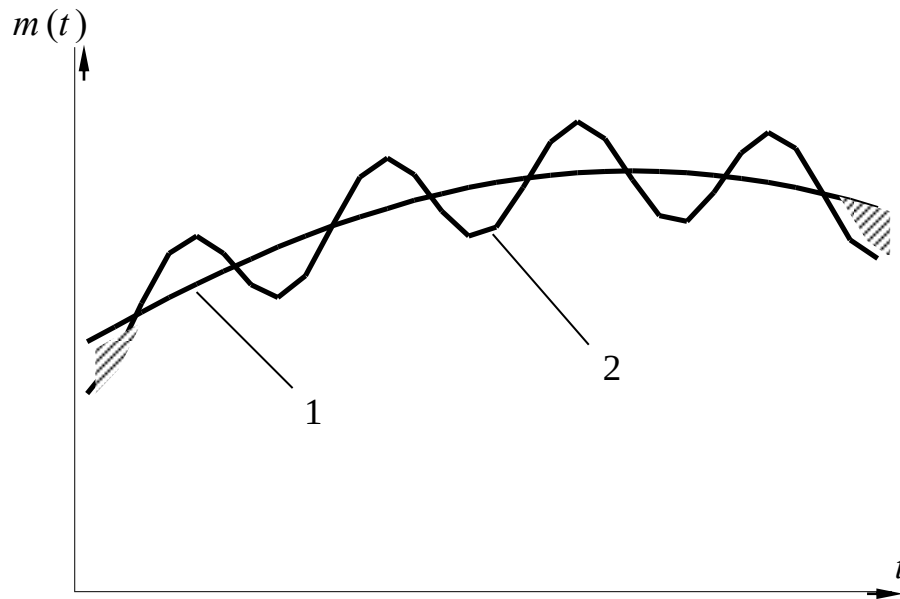


Рисунок 3.1 - Модель досліджуваного сигналу: 1 — без випадкового шуму; 2 — з шумом у вигляді синусоїди, що викликає збій

Ймовірність виникнення подібної ситуації в реальних умовах є дуже низькою, оскільки вона обумовлена трьома факторами: максимальною швидкістю руху об'єкта, що зважується (40 км/год), нижчою частотою коливань вантажу (3 Гц) та несприятливим розподілом випадкового шуму $\vec{\xi}(t)$, який значно впливає на досліджуваний сигнал і призводить до зсуву оцінки постійної складової. Якщо хоча б один із цих факторів змінюється, наприклад, зниження швидкості руху до 20...25 км/год або збільшення частоти коливань вантажу до 5...7 Гц, це дозволяє уникнути помилки вимірювання. Найпростіший спосіб вирішення проблеми — це зниження швидкості руху об'єкта, що зважується. Однак для розв'язання поставленої задачі важливо розробити метод, що дозволить проводити вагові вимірювання при швидкості 40 км/год. Крім того, розробка методу, який здатний уникати збійних ситуацій і забезпечити точність вимірювань навіть при несприятливому розподілі шуму, відкриває можливість отримувати більш точні оцінки інформативного параметру сигналу за однакових умов вимірювання.

Дослідження показали, що застосування різних методів попередньої фільтрації сигналів (таких як фільтр Фур'є, ковзаюче середнє, метод медіан

тощо) призводить до збільшення похибки результату. Це відбувається тому, що в умовах цієї задачі фільтрація змінює модель процесу зважування. Іншими словами, хоча фільтрація і зменшує вплив шуму, вона вносить навіть незначну похибку у формування вихідного сигналу, змінюючи модель (2.2), зокрема, спотворюючи періодичний характер завади. Наприклад, при використанні перетворення Фур'є для фільтрації сигналу періодичний компонент сприймається як сума гармонік вищих частот, що при усуненні високочастотного шуму і зворотному перетворенні призводить до його спотворення. В результаті досліджуваний сигнал не може бути описаний за допомогою моделі (2.2), а стає сумішшю декількох періодичних компонентів з різними частотами $\frac{2\pi}{T}, \frac{4\pi}{T}, \dots, \frac{m\pi}{T}$. Інший приклад — ковзаюче середнє, яке додає до моделі (2.2) лінійний компонент. Ці зміни, зокрема, призводять до збільшення похибки при використанні методу заданого діапазону частот для оцінки маси об'єкта в умовах обмеженого часу зважування.

У зв'язку з цим, необхідно вдосконалити вказаний метод, щоб уникнути збійних ситуацій і підвищити точність результатів. Це можна досягти шляхом застосування різних перетворень вхідного сигналу або зміни підходу до його обробки, зокрема, розглядаючи модель сигналу, відмінну від (2.2), яка враховує додаткові динамічні явища, не враховані в поточній моделі.

Дослідження різних способів удосконалення методу заданого діапазону частот для підвищення його точності та завадостійкості показало, що особливо варто звернути увагу на наступні методи:

- моделювання випадкового шуму через введення додаткової періодичної складової;
- метод подвійного інтегрування;
- метод вагової функції;
- метод воріт.

3.2. Моделювання випадкового шуму за допомогою введення додаткового періодичного компонента

Модель, розглянута в розділі 2 (2.2), є адекватною для опису реального сигналу, отриманого під час вагових вимірів. Однак залишалося відкритим питання про характер розподілу випадкової величини шуму $\vec{\xi}(t)$. Раніше припускалося, що випадковий шум або відсутній, або його математичне очікування дорівнює нулю. Однак такі припущення неможливі для реальних систем, і подальші дослідження показали, що єдиним методом, який може визначити інформативну величину без необхідності виконання цих обмежень, є метод заданого діапазону частот. Водночас виявлено, що без урахування впливу випадкового шуму на сигнал використання цього методу може бути неприпустимим, оскільки в окремих випадках це призводить до значної похибки.

У зв'язку з цим, розглянемо вдосконалений метод заданого діапазону частот, який бере до уваги вплив випадкового шуму на аналізований сигнал.

Ми припускаємо, що уникнути збійної ситуації можна, враховуючи сукупність двох і більше завад, функціональна залежність яких заздалегідь відома. Виходячи з даних таблиці 2.1 та висновків розділу 2.2.1, можна зробити висновок, що окрім низькочастотної завади, викликані власними коливаннями вагону, значний внесок у похибку зважування має стаціонарна періодична завада, що виникає через коливання необресорених мас вагону. Таким чином, врахування цієї завади у моделі сигналу, а також оцінка її впливу на сигнал, може бути ефективним способом підвищення завадостійкості запропонованого методу.

З огляду на вищесказане, припустимо, що досліджуваний сигнал складається з постійної складової та двох періодичних завад, які відрізняються за амплітудою, частотою та початковою фазою. Зокрема, одна з завад має низьку частоту ($\Omega=3\ldots 7$ Гц) і представлена чвертю періоду (що відповідає $\Omega=3$

Гц) на досліджуваному інтервалі, тоді як інша завада має частоту ($\Omega_1=20\ldots 40$ Гц) і представлена одним або більше періодами. У цьому контексті об'єктно-орієнтована модель тензометричного сигналу, яка відображає процес зважування, має наступний вигляд:

$$f(t) = D + A \sin(\Omega t + \psi) + A_1 \sin(\Omega_1 t + \psi_1) + \vec{\xi}(t), \quad (3.1)$$

де D — Незмінна складова сигналу;

A , Ω і ψ — Амплітуда, частота та початкова фаза низькочастотної періодичної завади;

A_1 , Ω_1 і ψ_1 — Амплітуда, частота та початкова фаза високочастотної періодичної завади;

$\vec{\xi}(t)$ — Випадковий незалежний вектор, який має мале значення і може бути вважатися рівним нулю.

Визначимо набір базисних функцій $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$. Отримуємо

$$\begin{cases} \varphi_0(t) = 1, \\ \varphi_1(t) = \cos(\Omega t), \\ \varphi_2(t) = \sin(\Omega t), \\ \varphi_3(t) = \cos(\Omega_1 t), \\ \varphi_4(t) = \sin(\Omega_1 t), \end{cases}$$

де Ω — Значення частоти низькочастотного компоненту;

Ω_1 — Частота високочастотного компоненту сигналу.

Під час проведення досліджень здійснимо наступні кроки: зафіксуємо частоту Ω , а значення частоти Ω_1 змінюватимемо в межах інтервалу $[\Omega_{1\min} \dots \Omega_{1\max}]$. Отримані значення середньоквадратичної похибки збережемо в масиві. Далі змінюватимемо частоту Ω на певний крок $\Delta\Omega$ (крок апроксимації), після чого повторимо аналогічну процедуру для всіх значень Ω_1 . Це продовжуватиметься, поки не буде охоплено весь діапазон Ω частот $[\Omega_{\min} \dots \Omega_{\max}]$. Найбільш точним вважатиметься той результат, для якого значення середньоквадратичної похибки S є мінімальним. В результаті цього

процесу будуть визначені коефіцієнти для відповідних базисних функцій — a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 , на основі яких можна побудувати модель сигналу виду (3.1).

$$f(t) = a_0 + \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \sin\left(\Omega t + \arctg\left(\frac{a_1}{a_2}\right)\right) + \sqrt{a_3^2 + a_4^2} \sin\left(\Omega_1 t + \arctg\left(\frac{a_3}{a_4}\right)\right),$$

І, як результат, визначимо величину постійної складової сигналу D , яка дорівнює значенню коефіцієнта a_0 .

Здійснимо дослідження, на основі яких визначимо ефективність запропонованого методу для оцінки параметрів сигналу, що складається з постійної складової та двох періодичних завад.

Задамо модель сигналу, де $D = 1000$, $A = 150$, $A_1 = 15$, а частота Ω змінюється в діапазоні від 1 до 11 Гц.

Вважатимемо, що фази завад є випадковими. Крім того, значення низькочастотної складової сигналу, згідно з дослідженнями реальних сигналів, знаходяться в діапазоні 3–7 Гц. Таким чином, програма, яка реалізує метод найменших квадратів, послідовно вибирає значення частоти лише з цього діапазону. Далі розглянемо кілька випадків, де частота Ω_1 високочастотної складової сигналу знаходиться в відомому діапазоні 20–40 Гц. Модель сигналу буде досліджена тричі, з різними значеннями високочастотної складової: $\Omega_1=20$ Гц; $\Omega_1=30$ Гц; $\Omega_1=40$ Гц. Дослідження проводяться за описаним алгоритмом: для кожного значення частоти Ω_i з діапазону $[\Omega_{\min} \dots \Omega_{\max}]$ обчислюються значення середньоквадратичного відхилення S для кожної частоти Ω_{1j} з діапазону $[\Omega_{1\min} \dots \Omega_{1\max}]$. Найменше значення середньоквадратичного відхилення відповідатиме найбільш точному оціненню шуканої величини D .

Результати досліджень показані на рис. 3.2 для трьох розглянутих випадків.

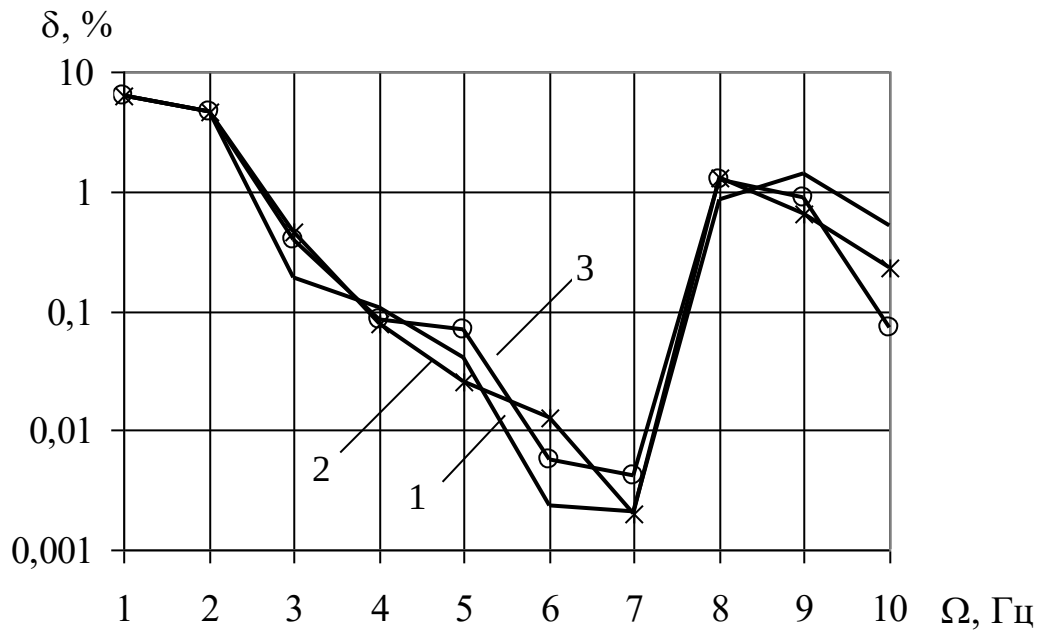


Рисунок 3.2 – Залежність відносної похибки вимірювання постійної складової сигналу від значень частоти низькочастотної завади: 1 — $\Omega_1 = 20$ Гц;
2 — $\Omega_1 = 30$ Гц; 3 — $\Omega_1 = 40$ Гц

Як видно з рис. 3.2, найменші значення відносної похибки спостерігаються в діапазоні частот 3...7 Гц, що було визначено умовами дослідження. Відхилення частоти від цього діапазону в будь-який бік призводить до значного збільшення похибки. Таким чином, можна зробити висновок, що при чітко заданих характеристиках динамічних складових вхідного сигналу метод заданого діапазону частот є ефективним рішенням для оцінки інформативного параметру сигналу.

Результати, отримані при дослідженні моделі сигналу (3.1), демонструють вищу точність, оскільки в цьому випадку апроксимується періодичний компонент, який моделює шум. Проте слід відзначити й недолік цього методу — час обчислень значно збільшується

$$\frac{\Omega_{1\max} - \Omega_{1\min}}{\Delta\Omega_1} \text{ раз,}$$

де $\Delta\Omega_1$ — крок апроксимації для високочастотної завади.

Для вирішення цієї проблеми проведемо додатковий експеримент. Задамо модель сигналу з параметрами: $D = 1000$, $A = 150$, $A_1 = 15$, $\Omega = 4$ Гц. При цьому будемо вважати фази завад випадковими та аналізувати лише ту частину сигналу, де низькочастотна складова представлена чвертю періоду.

Побудуємо три графіки залежності середньоквадратичного відхилення від частоти високочастотної складової сигналу для трьох різних випадків. При цьому частота Ω буде зафіксована на значенні 3 Гц (хоча реальне значення $\Omega = 4$ Гц), а частота Ω_1 змінюватиметься в діапазоні 15...45 Гц з кроком $\Delta\Omega_1 = 1$ Гц. Для кожного з трьох випадків моделі сигналу (3.1) будуть розглянуті такі значення частоти високочастотної складової: $\Omega_1 = 20$ Гц; $\Omega_1 = 30$ Гц; $\Omega_1 = 40$ Гц. У результаті буде отримано три графіки, що показують залежність середньоквадратичного відхилення від частоти високочастотної завади.

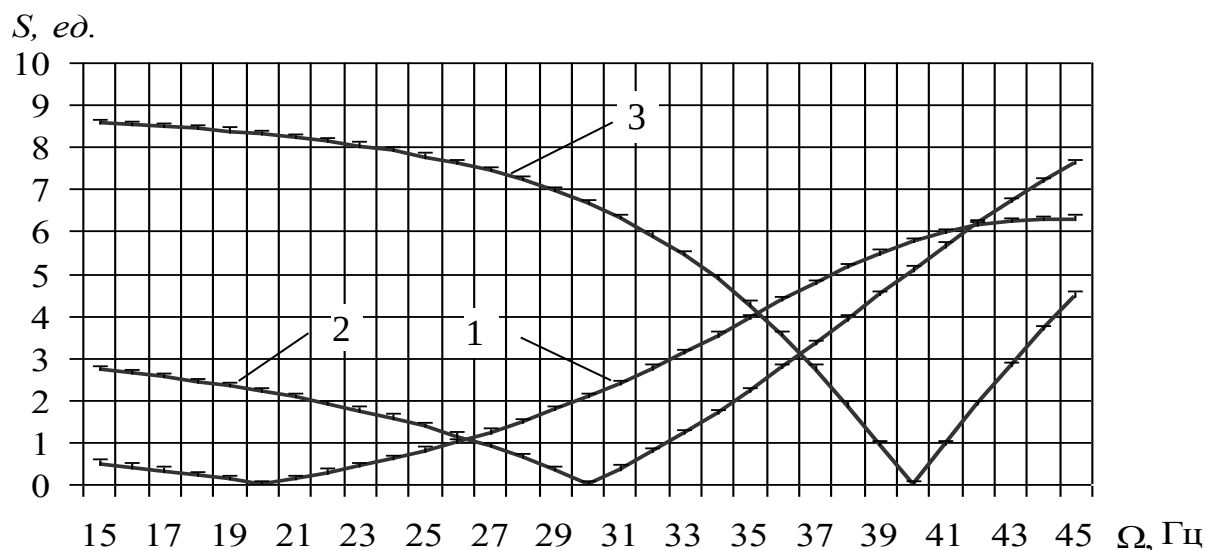


Рисунок 3.3 - Графіки залежності середньоквадратичного відхилення від частоти високочастотної складової: 1 — $\Omega_1 = 20$ Гц; 2 — $\Omega_1 = 30$ Гц; 3 — $\Omega_1 = 40$ Гц

Як видно з рис. 3.3, мінімальне середньоквадратичне відхилення спостерігається при значенні частоти, яке збігається з реальним значенням високочастотної складової. Це дає змогу визначити частоту Ω_1 , виконуючи апроксимацію (3.1) по Ω_1 лише один раз. Таким чином, подальша задача зводиться до пошуку частоти Ω , яка задовольняє умову $S \rightarrow \min$.

Отже, запропонований метод є ефективним розв'язком задачі оцінки інформативного параметру сигналу при обмеженому часі зважування для сигналів, що складаються з двох періодичних складових та постійної складової, забезпечуючи мінімальні витрати часу та задану точність.

Однак, як зазначалося раніше, реалізація запропонованого методу дає позитивні результати лише в тому випадку, якщо всі складові вхідного сигналу і діапазон їх змін точно відомі. Подальші дослідження показали, що наявність випадкового шуму, зумовленого нестаціонарними явищами (такими як передача зусиль через автозчеплення, перекручування сигналу при передачі через лінії зв'язку тощо), розподіл яких зазвичай неможливо передбачити, суттєво погіршує завадостійкість методу. Порівняльний аналіз запропонованого методу та методу оцінки параметрів моделі сигналу виду (2.2) показав, що метод заданого діапазону частот, описаний у п. 2.3.1, має вищу завадостійкість. Таким чином, цей метод є окремим випадком, який може бути застосований для конкретного виду сигналу з відомими динамічними та статичними характеристиками і дуже низьким рівнем випадкового шуму. В іншому випадку, використання запропонованого удосконалення буде недоцільним.

З урахуванням викладеного, можна зробити висновок, що подальше удосконалення методу заданого діапазону частот для підвищення точності оцінки постійної складової сигналу та уникнення збійних ситуацій повинно бути орієнтоване на розробку методів, які забезпечують узагальнене подавлення випадкового шуму з урахуванням специфіки конкретної практичної задачі.

3.3. Метод дворазового інтегрування

Згідно з висновками п.п. 2.2.1 і 2.2.2, можна стверджувати, що основними складовими сигналу є гармонійні завади. Таким чином, випадковий шум, присутній у сигналі, можна представити як суму кількох

гармонічних компонентів, частоти яких, як мінімум, на порядок вищі, а амплітуди — на порядок менші, порівняно з відповідними значеннями періодичної складової в моделі (2.2) (див. табл. 2.1). Використовуючи цю властивість, розглянемо модель

$$f(t) = D + A \sin(\Omega t + \psi) + \bar{\xi}(t), \quad (3.2)$$

де D — Постійна складова сигналу — це параметр, який необхідно визначити;

A, Ω і ψ — Згідно з цим, амплітуда, частота та початкова фаза завади;

$\bar{\xi}(t)$ — Випадковий незалежний вектор, який може бути виражений як

$$\bar{\xi}(t) = A_1 \sin(\Omega_1 t + \psi_1) + A_2 \sin(\Omega_2 t + \psi_2) + \dots + A_m \sin(\Omega_m t + \psi_m), \quad (3.3)$$

У якому амплітуди $A_1, A_2, \dots, A_m$ є щонайменше на порядок меншими, а частоти $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$ — щонайменше на порядок більшими за відповідні величини сигналу (3.2).

Підставивши рівняння (3.3) у (3.2), ми двічі інтегруємо отриманий вираз, використовуючи формулу Ейлера-Маклорена, оскільки саме ця формула дає найкращі результати. Дворазове інтегрування вибрано з двох причин: по-перше, однократне інтегрування не дає значних покращень порівняно з дворазовим, а по-друге, при багаторазовому інтегруванні виникає похибка чисельного інтегрування, що знижує точність отриманих результатів.

$$\iint f(t) dt dt = \frac{Dt^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t + \psi) - \frac{A_1}{\Omega_1^2} \sin(\Omega_1 t + \psi_1) - \dots - \frac{A_m}{\Omega_m^2} \sin(\Omega_m t + \psi_m). \quad (3.4)$$

Як впливає з рівняння (3.4), після дворазового інтегрування амплітуда кожної складової сигналу пропорційна оберненому квадрату її частоти. Оскільки амплітуди складових шуму (3.3) на порядок менші, а частоти на порядок більші за відповідні величини в моделі сигналу (3.2), це призводить до значного подавлення високочастотних компонентів випадкового шуму. Таке перетворення не усуває високочастотні компоненти сигналу, як це відбувається в фільтрі Фур'є, а лише зменшує їхній вплив на досліджуваний

сигнал, перетворюючи його в інший вигляд, згідно з рівнянням (3.4). При цьому інформація про сам сигнал зберігається, що дозволяє отримати найточніші результати дослідження за допомогою методу заданого діапазону частот.

Введене перетворення змінює метод, оскільки дослідженню підлягає не початковий, а перетворений сигнал. Формула (3.4) представляє собою подвійний невизначений інтеграл, однак на практиці таке визначення неможливе, оскільки інтеграція виконується по верхній та нижній межах. Тому після виконання інтегрування формула (3.2) з урахуванням меж інтегрування набуває такого вигляду

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_n} f(t)dt &= \left(Dt - \frac{A}{\Omega} \cos(\Omega t + \psi) \right) \Big|_{t_0}^{t_n} = \\ &= Dt_n - \frac{A}{\Omega} \cos(\Omega t_n + \psi) - Dt_0 + \frac{A}{\Omega} \cos(\Omega t_0 + \psi). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Оскільки нижня межа інтегрування дорівнює $t_0 = 0 = \text{const}$, а верхня межа — $t_n = t$, інтеграл (3.5) можна записати у такій формі

$$\int_{t_0}^{t_n} f(t)dt = Dt_n - \frac{A}{\Omega} \cos(\Omega t_n + \psi) + \frac{A}{\Omega} \cos(\psi). \quad (3.6)$$

У формулі (3.6) вираз $\frac{A}{\Omega} \cos(\psi) = \text{const}$. Для спрощення подальших записів введемо позначення $K1 = \frac{A}{\Omega} \cos(\psi)$. Тоді (3.6) можна записати у такому вигляді

$$\int_{t_0}^{t_n} f(t)dt = Dt_n - \frac{A}{\Omega} \cos(\Omega t_n + \psi) + K1.$$

Другий інтеграл з рівняння (3.2) можна записати у такому вигляді

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_n} \int_{t_0}^{t_n} f(t) dt dt &= \left(\frac{Dt^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t + \psi) + K1t \right) \Big|_{t_0}^{t_n} = \\ &= \frac{Dt_n^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t_n + \psi) + K1t_n - \frac{Dt_0^2}{2} + \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t_0 + \psi) - K1t_0. \end{aligned}$$

Зважаючи на те $t_0 = 0$, що

$$\int_{t_0}^{t_n} \int_{t_0}^{t_n} f(t) dt = \frac{Dt_n^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t_n + \psi) + K1t_n + \frac{A}{\Omega^2} \sin(\psi).$$

Позначивши постійну величину як $\frac{A}{\Omega^2} \sin(\psi) = K2 = const$, отримаємо кінцевий вираз:

$$\int_{t_0}^{t_n} \int_{t_0}^{t_n} f(t) dt = \frac{Dt_n^2}{2} - \frac{A}{\Omega^2} \sin(\Omega t_n + \psi) + K1t_n + K2. \quad (3.7)$$

Як показує вираз (3.7), внаслідок дворазового інтегрування до складу сигналу (3.2) додаються дві нові величини $K1t_n$ і $K2$, які слід врахувати при застосуванні методу заданого діапазону частот. Таким чином, система базисних функцій (2.7) розширюється і набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} \varphi_0(t) = t^2; \\ \varphi_1(t) = \cos(\Omega t); \\ \varphi_2(t) = \sin(\Omega t); \\ \varphi_3(t) = t; \\ \varphi_4(t) = 1, \end{cases}$$

де a_3, a_4 — це коефіцієнти, що відповідають базисним функціям $\varphi_3(t)$ і $\varphi_4(t)$, які визначаються значеннями $K1$ та $K2$.

Крім того, змінюється метод обчислення оцінок необхідних параметрів

$$D = 2a_0, \quad \Omega = \Omega_{\min} + j\Delta\Omega, \quad A = \Omega^2 \sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \quad \psi = \arctg\left(\frac{a_1}{a_2}\right).$$

Для оцінки точності отриманих результатів проведемо дослідження, в яких той самий сигнал буде оброблятися без застосування перетворень і з

використанням дворазового інтегрування. Для цього змодельємо сигнал (2.2) з такими параметрами: $D = 1000$; $A = 100$;

$$f(t) = 1000 + 100 \sin(\Omega t + \psi) + \vec{\xi}(t),$$

де Ω — Частота періодичної завади, що змінюється в межах 1...12 Гц з кроком $\Delta\Omega = 0,2$ Гц;

ψ — Початкова фаза, яка випадковим чином визначається в межах 0...3400°;

$\vec{\xi}(t)$ — Синусоїдальний сигнал, обраний таким чином, щоб під час досліджень відтворити ситуацію, яка призводить до виникнення збою.

Розмір вибірки дискретних значень сигналу становить $N = 30$.

Результати дослідження зображені на рисунку 3.4.

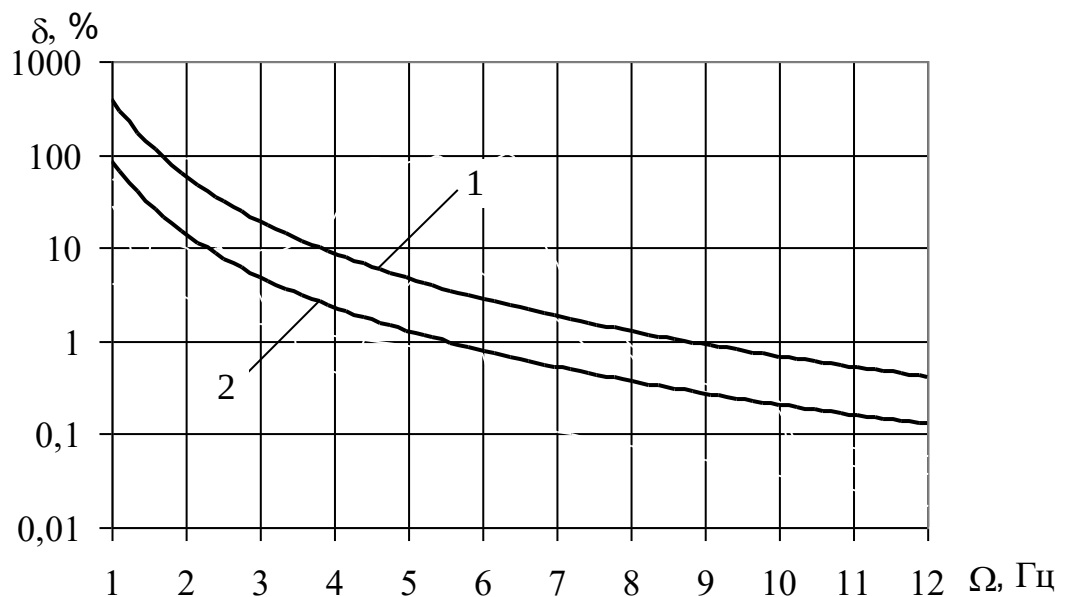


Рис. 3.4. Залежність відносної похибки вимірювання постійної складової сигналу від частоти, отримана: 1 — без застосування перетворень; 2 — із застосуванням подвійного інтегрування

Як показують графіки на рис. 3.4, у присутності випадкового шуму використання дворазового інтегрування дозволяє знизити похибку отриманого результату при низьких та високих частотах, зменшуючи її, як мінімум, на порядок.

Узагальнюючи отримані результати, можна зазначити, що метод подвійного інтегрування суттєво покращує точність оцінки досліджуваного сигналу, що робить можливим ефективне застосування методу заданого діапазону частот у реальних вагових системах.

3.4. Метод функції ваги

Як було зазначено раніше (п. 3.1), найбільші похибки оцінки постійної складової сигналу спостерігаються, коли випадковий шум впливає на крайні ділянки сигналу, тоді як похибка, зумовлена шумом у центральних частинах сигналу, є значно меншою. Сучасні вагові системи використовують методи, які дозволяють зменшити вплив шуму на крайні ділянки сигналу під час вагових вимірів до 15 км/г (див. розділ 1). Подібний підхід можна застосувати і до вирішення поточної задачі для зменшення похибки.

У теорії оцінювання для виділення найбільш значущих (точних, надійних) даних пропонується використовувати вагові коефіцієнти для кожного отриманого значення. Таким чином, найбільш надійним даним надається найбільший коефіцієнт — вага, тоді як значення, які ймовірно є помилковими, отримують коефіцієнт, близький до нуля. Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться оцінка отриманих даних.

Для поставленої задачі найбільша похибка виникає через вплив випадкового шуму на крайні ділянки сигналу. Тому для покращення точності оцінок сигналу введемо систему вагових коефіцієнтів, при цьому найменшу вагу буде присвоєно граничним значенням, а вага буде збільшуватися по мірі наближення до центральних значень досліджуваного сигналу.

Для цього використаємо вагову функцію, яка дає змогу обчислити оптимальні значення вагових коефіцієнтів для кожного окремого значення сигналу.

Отже, функцію, яка визначає значення кожного вагового коефіцієнта w_i , запишемо як

$$W(t) = \sin\left(\frac{\pi}{N}t + \frac{\pi}{2N}\right), \quad (3.8)$$

де N — кількість вимірювань сигналу.

Отже, система базисних функцій (2.7) набуде вигляду

$$\begin{cases} \varphi_0(t) = W(t), \\ \varphi_1(t) = \cos(\Omega t)W(t), \\ \varphi_2(t) = \sin(\Omega t)W(t). \end{cases} \quad (3.9)$$

Значення досліджуваного сигналу (2.2) також збільшуються пропорційно величині (3.8). — $f(t)W(t)$.

Варто зауважити, що існує ще один метод, який сприяє покращенню точності оцінок параметрів моделі (2.2).

За допомогою серії експериментів і їх аналізу було встановлено, що при використанні методу вагової функції обчислення середньоквадратичного відхилення в методі заданого діапазону частот має виконуватися згідно з формулою

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} (P_m(t_i) - f(t_i))^2 W(t_i). \quad (3.10)$$

Формула (3.10) відрізняється від класичної формули для обчислення середньоквадратичного відхилення (2.4) тим, що в неї вводиться вагова функція. Це дає змогу досягти мінімального значення середньоквадратичного відхилення, яке відповідає найбільш точному значенню частоти в заданому діапазоні $[\Omega_{\min} \dots \Omega_{\max}]$, що, в свою чергу, дозволяє отримати найбільш точну оцінку постійної складової сигналу D .

Для оцінки точності запропонованого методу ми досліджуємо модель сигналу, подібну до тієї, що була розглянута в п. 3.3.

Результати досліджень показано на рис. 3.5. Для порівняння також наведено графік відносної похибки з п. 3.3, отриманий за допомогою подвійного інтегрування.

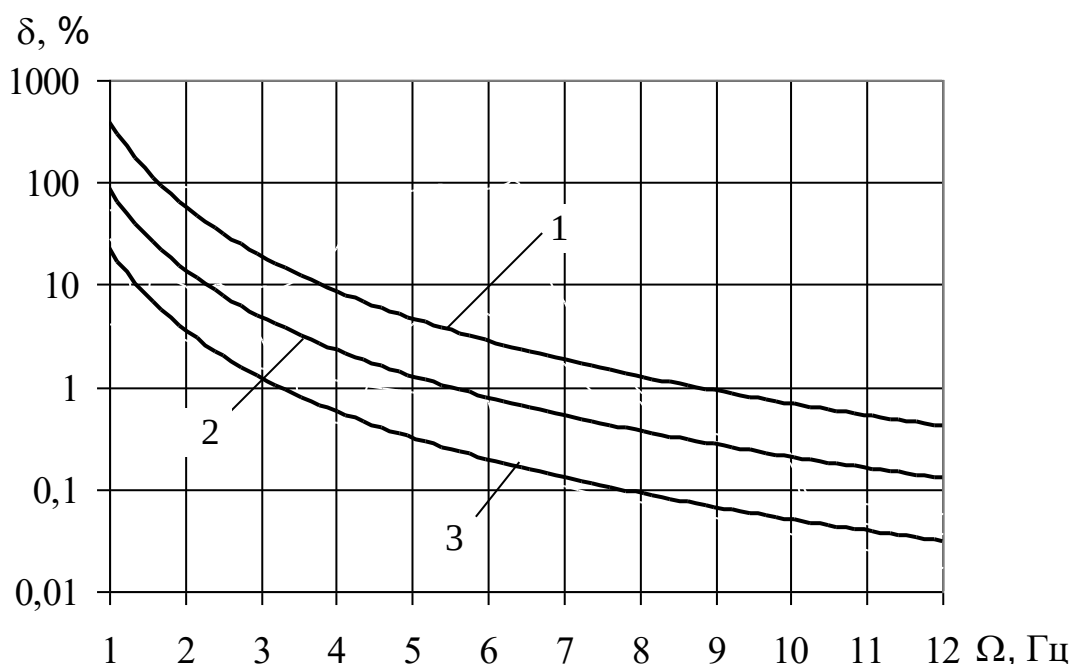


Рисунок 3.5 - Залежність відносної похибки вимірювання постійної складової сигналу від частоти, отримана: 1 — без застосування перетворень; 2 — із застосуванням подвійного інтегрування; 3 — із використанням вагової функції

Як показують графіки на рис. 3.5, у разі наявності випадкового шуму використання вагової функції дозволяє зменшити похибку результатів щонайменше на порядок, як при низьких, так і при високих частотах. У випадку відсутності випадкового шуму похибки, отримані за допомогою систем базисних функцій (2.7) та (3.9), виявляються однаковими.

Отже, на основі проведених досліджень можна стверджувати, що в умовах збійної ситуації використання вагової функції за формулою (3.8) суттєво підвищує точність отриманих результатів. Це також дозволяє ефективно застосовувати метод заданого діапазону частот у реальних вагових системах, де наявність шуму є неминучою. При цьому забезпечується необхідний рівень точності визначення постійної складової сигналу.

3.5. Метод воріт

Як було зазначено в п. 3.3 і 3.4, метод подвійного інтегрування та метод вагової функції дають позитивні результати при оцінці постійної складової сигналу в умовах збійної ситуації. Проте реальний сигнал має широкий спектр високочастотних завад, які в загальному випадку являють собою шум, накладений на сигнал (2.2). Цей шум складається з періодичного компоненту, викликаного коливаннями необресорених мас вагона, а також випадкового шуму, амплітуда якого становить від 1/100 до 1/50 від амплітуди низькочастотного компоненту сигналу, що виникає через численні динамічні явища під час вимірювання (див. табл. 2.1). Хоча деякі з цих динамічних явищ можна розглядати як окремі складові сигналу, їх велика кількість і мала амплітуда дозволяють трактувати реальний сигнал як сигнал виду (2.2) з накладеною періодичною завадою (яка в деяких випадках може викликати збій) та випадковим шумом. Отже, моделюваний і реальний сигнал є майже ідентичними (див. рис. 2.2 та 3.6).

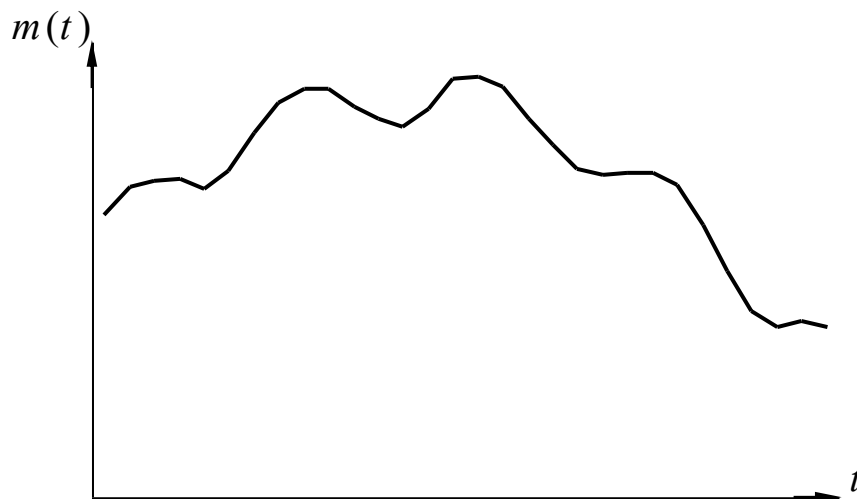


Рисунок 3.6 - Модель досліджуваного вихідного сигналу тензодатчика

Подальші дослідження показали, що ані метод подвійного інтегрування, ані метод вагової функції не здатні забезпечити необхідну точність

вимірювань для заданої моделі сигналу. Вплив випадкового шуму створює умови, при яких досягти заданої точності результату стає неможливим. У реальних умовах похибка вимірювань, отримана за допомогою кожного з цих методів, в окремих випадках може перевищити похибку, що виникає при простому усередненні сигналу, що є неприпустимим і може призвести до збою. Однак, у більшості випадків метод вагової функції дає прийнятну похибку (1–2 %), яка є нижчою, ніж похибка методу подвійного інтегрування.

У зв'язку з цим пропонується удосконалити метод вагової функції, щоб забезпечити гарантовану величину похибки, яка не перевищуватиме похибку, що виникає при усередненні значень сигналу, незалежно від умов виміру.

Для цього запропоновано застосувати обмеження на вибір оцінок параметрів моделі (2.2) у вигляді так званих "воріт", що визначають припустимий діапазон отриманого значення постійної складової сигналу D . У цьому контексті використовуються дані з досліджень реальних сигналів. Відомо, що амплітуда низькочастотної складової сигналу (2.2) на порядок менша за величину постійної складової сигналу D . Тому під час апроксимації отримані значення не повинні перевищувати середньоарифметичне значення сигналу $\bar{F}$ на певну величину.

$$G = \pm \bar{F}/10,$$

де G — величина воріт.

Отже, з урахуванням введених доповнень найбільш точним вважається результат, який, по-перше, знаходиться в межах інтервалу

$$a_0 \in [\bar{F} \pm G], \quad (3.11)$$

де a_0 — поточний результат апроксимації, який відповідає значенню D ;

а по-друге, має найменшу середньоквадратичну похибку, обчислену за формулою (3.10). Якщо жодне з отриманих значень не відповідає умові (3.11), то шуканим результатом вважається середньоарифметичне значення досліджуваного сигналу $\bar{F}$.

Для оцінки точності методу воріт було проведено дослідження, у яких модель сигналу (2.2) представлена як

$$f(t) = D + A \sin(\Omega t + \psi) + A_1 \sin(\Omega_1 t + \psi_1) + \vec{\xi}(t),$$

де D — Постійна складова сигналу, що дорівнює 1000;

A — Амплітуда низькочастотної періодичної складової сигналу, яка становить 100;

Ω — Частота періодичної завади, яка змінюється в діапазоні від 1 до 12 Гц із кроком $\Delta\Omega = 0,2$ Гц, при цьому 3 Гц відповідають чверті періоду низькочастотної складової сигналу.;

ψ — Початкова фаза задається випадковим чином в межах діапазону від 0 до 360° ;

$A_1 \sin(\Omega_1 t + \psi_1)$ — Синусоїдальний сигнал, який моделює динамічні явища, що виникають під час вимірювань, з параметрами — $A_1=10$, $\Omega = 5\pi/18$ — частота, ψ_1 — початкова фаза, що випадковим чином задається в межах від 0 до 360° ;

$\vec{\xi}(t)$ — Випадкова величина в інтервалі $[0...5]$.

Кількість дискретних значень у вибірці сигналу становить $N=30$.

Результати досліджень представлені у вигляді узагальнених графіків на рис. 3.7. Для порівняння наведено графіки відносної похибки, отриманої методом усереднення значень сигналу, а також похибку, що виникає при застосуванні методу вагової функції.

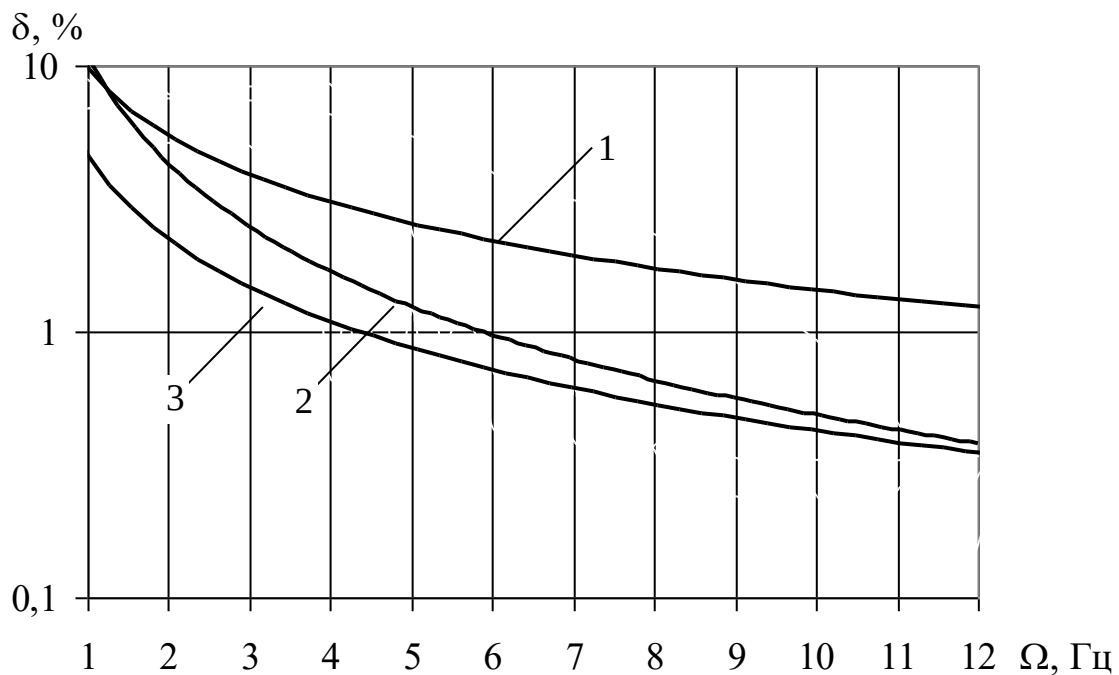


Рисунок 3.7 - Залежність відносної похибки вимірювання постійної складової сигналу від частоти, отримана: 1 — методом усереднення; 2 — з використанням методу вагової функції; 3 — з застосуванням методу вагової функції та методу воріт

Як видно з графіків (рис. 3.7), при наявності випадкового шуму використання методу воріт дозволяє покращити точність отриманих результатів у 5-7 разів порівняно з точністю, що досягається шляхом усереднення. Водночас, введення обмеження (3.11) допомагає уникнути збійних ситуацій в методі вагової функції та гарантує, що похибка вимірювань не перевищує похибку математичного очікування.

3.6 Моделювання функціонування системи

Для перевірки достовірності інформаційної моделі оцінки маси об'єкта за обмежений час зважування за реальними даними було застосовано метод математичного моделювання роботи системи. Для цього, на основі розробленої моделі динаміки процесу зважування, була змодельована сукупність реалізацій вихідного сигналу тензодатчика, що включав постійну

складову, низькочастотні та високочастотні синусоїдальні складові, а також випадковий шум. Параметри моделі задавались випадковим чином. Кількість реалізацій становила $N = 2000$. Після виконання алгоритмів обробки вимірної інформації визначалася відносна похибка оцінки маси об'єкта.

Дослідження статистичних характеристик якості роботи системи дало такі результати: відносна похибка склала $\mu = -0.0053 \%$, $\sigma = 0.3026 \%$. Закон розподілу (рис. 3.8) виявився близьким до нормального

$f_t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.1026} e^{\frac{-(x-0.0035)^2}{2 \cdot 0.1026^2}}$ за критерієм χ^2 для рівня значимості $\alpha = 0,05$ (таблиця 3.1).

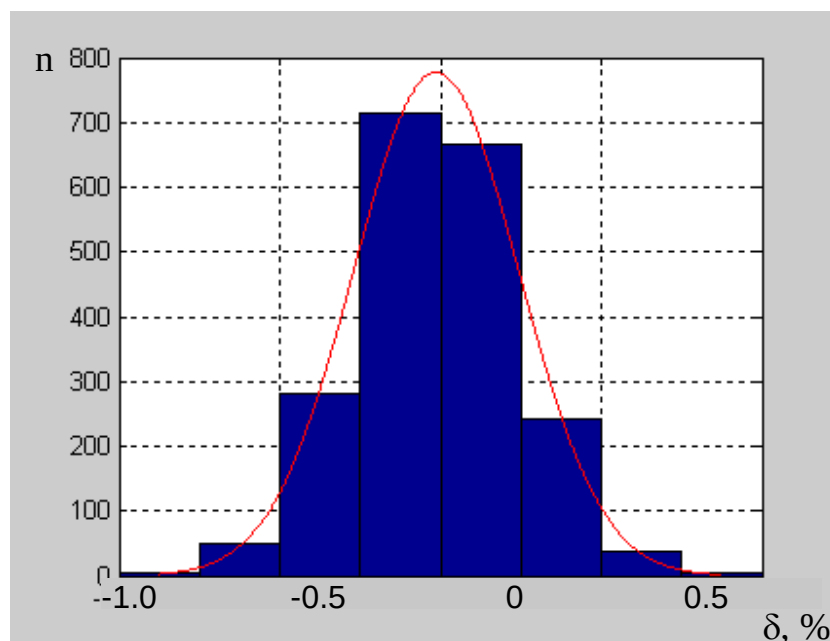


Рисунок 3.8 - Гістограма експериментальних даних та графік теоретичного закону розподілу значень відносних похибок оцінки маси

Як показано на рис. 3.8, застосування алгоритму побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування значно знижує похибку результату. Примітно, що надані графіки враховують умову, коли об'єкт рухається з максимально допустимою швидкістю — 40 км/год.

Таблиця 3.1 – Аналіз закону розподілу відносної похибки вимірювань

i	інтервал	m_i	p_i	np_i	$\frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}$
1	$x < -0,9$	6	0,0021	4,2	0,771
2	$-0,9 \leq x < -0,6$	50	0,0271	54,2	0,325
3	$-0,6 \leq x < -0,3$	280	0,1488	297,6	1,041
4	$-0,3 \leq x < 0$	713	0,3426	685,2	1,128
5	$0 \leq x < 0,3$	667	0,3271	654,2	0,25
6	$0,3 \leq x < 0,6$	241	0,1295	259,0	1,251
7	$0,6 \leq x < 0,9$	38	0,0213	42,6	0,497
8	$0,9 \leq x$	5	0,0015	3,0	1,333
сума		2000	1,000	2000,0	6,596
Для $\alpha = 0,05$ та $m = 5$ одержуємо $\chi_{\alpha}^2 = 11,1$. Так як розраховане χ^2 менше табличного, то гіпотеза про нормальний розподіл абсолютної похибки вимірювань підтверджена.					

Як показано на рис. 4.6, застосування алгоритму побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування значно зменшує похибку результату. При цьому на графіках передбачається, що об'єкт, що зважується, рухається з максимально допустимою швидкістю — 40 км/г.

Отже, на основі проведених досліджень можна зробити висновок, що застосування алгоритму, побудованого на методі заданого діапазону частот з включенням вагової функції в систему базисних функцій та використанням методу воріт, дозволяє збільшити точність визначення постійної складової сигналу в 2–7 разів порівняно з простим усередненням. При цьому особливо важливим є правильний вибір кроку зміни частоти апроксимації $\Delta\Omega$, який для всіх розглянутих випадків рекомендується встановлювати рівним $\pi/90$ Гц. Це

забезпечує оптимальний компроміс між точністю вимірів та ефективністю обчислень.

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

— для вирішення задачі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування найбільш ефективним є метод заданого діапазону частот, доповнений інтеграцією вагової функції в систему базисних функцій;

— для практичної реалізації системи зважування, а також для розробки програмного забезпечення та вимірювальної апаратури, рекомендується застосовувати метод заданого діапазону частот із включенням вагової функції в систему базисних функцій і використанням методу воріт.

4 Практичне впровадження інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування

Останнім часом, завдяки швидкому розвитку технологій у виробництві технічних засобів для систем автоматизації, як вітчизняні, так і закордонні компанії пропонують широкий асортимент обладнання та елементної бази для створення різноманітних пристроїв. Основний напрямок розвитку технологій зосереджений на покращенні якості роботи та мініатюризації обладнання. Це відкриває нові можливості для розробки нових та удосконалення існуючих вимірювальних пристроїв і систем обробки інформації, що дозволяє досягати значно вищих рівнів точності.

Розроблювана система для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування включає аналогову та цифрову частини. Головною задачею аналогової частини є точне представлення сигналу, отриманого від тензодатчиків, для його подальшого перетворення в цифровий формат за допомогою АЦП. Цифрова частина системи реалізована на персональному комп'ютері і відповідає за виконання алгоритмів для оцінки маси об'єкта на основі отриманих даних сигналу.

4.1 Проектування аналогової частини схеми

4.1.1 Для реалізації цієї системи зважування були обрані тензодатчики низького профілю серії LPC, виробництва новозеландської компанії «Precision Transducers Ltd». Технічні характеристики цих датчиків наведені в таблиці 4.1, а їх габаритні розміри зображено на рисунку 4.1.

Обраний тензодатчик відповідає вимогам щодо габаритних розмірів (висота 35 мм) та забезпечує високу точність і стійкість до перешкод. Напрямок живлення датчика може бути вибрана в широкому діапазоні значень і підтримує як змінну, так і постійну напругу. Висока точність вимірювань досягається завдяки наявності температурної компенсації та комбінованій погрішності, яка становить 0,03 % від робочого коефіцієнта передачі (РКП).

Таблиця 4.1 – Основні технічні характеристики тензодатчиків серії LPC (PT Ltd, Нова Зеландія)

Показник	Одиниці вимірювання	Значення
Номінальне навантаження, $E_{\max}$	тс	1, 2.5, 5, 10, 25, 50, 100
Допустиме перевантаження	% от $E_{\max}$	150
Руйнівне перевантаження	% от $E_{\max}$	>300
Рекомендована напруга живлення	В	5...20
Максимальна напруга живлення	В	25
Вхідний опір	Ом	820
Вихідний опір	Ом	705
Опір ізоляції	МОм	≥ 5000
РКП номінальний, S	мВ/В	$2,0 \pm 0,1\%$
Комбінована погрішність	% от S	0,03
Повторюваність	% от S	0,02
Температурний дрейф нуля	% от S / 10°K	0,025
Температурний дрейф сигналу	% от S / 10°K	0,02
Відхід характеристики за 30 хв	% от S	0,03
Температурний діапазон з компенсацією дрейфу	$^{\circ}\text{C}$	-10...+50
Довжина кабелю	м	3
Маса нетто	кг	$\approx 3,5$
Клас захисту	IP67	
Матеріал датчика	Нікельована сталь	

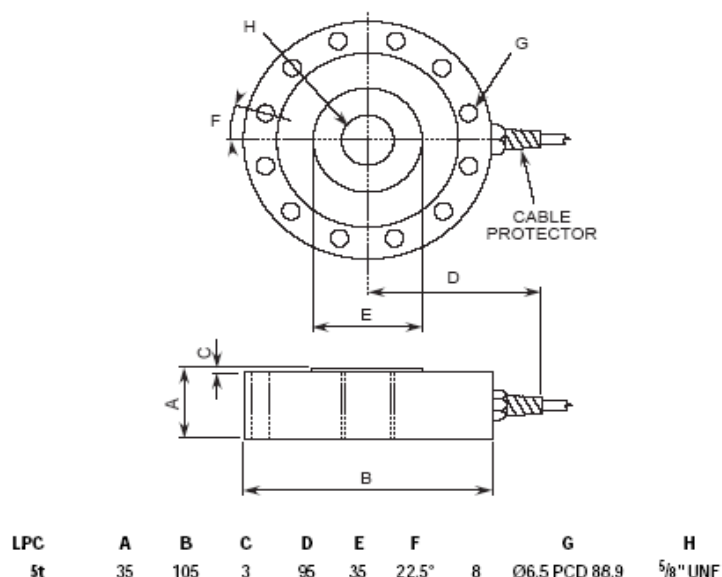


Рисунок 4.1 – Габаритні розміри тензодатчика LPC – 10 т (серія LPC)

4.1.2 Вибір операційних підсилювачів. Основною вимогою до вхідного каскаду підсилювачів є мінімальний рівень шуму їх елементів. Оскільки вихідний сигнал тензодатчиків має дуже низьке значення, каскад інструментальних підсилювачів повинен мінімізувати внесення перешкод у корисний сигнал. Зокрема, при напрузі живлення $U_{\text{ж}} = 12 \text{ В}$ та РКП $= 2 \text{ мВ/В}$, для номінального навантаження $R = 10 \text{ т}$ на один тензодатчик вихідна напруга складе $U_{\text{вих}} = 24 \text{ мВ}$. Для визначення коефіцієнта підсилення вхідного каскаду припустимо, що АЦП працюватиме в діапазоні $0...5 \text{ В}$. Оскільки у вагоприймальному пристрої використовується чотири тензодатчики, загальне навантаження $R = 40 \text{ т}$ відповідатиме вихідній напрузі $U_{\text{вих}} = 96 \text{ мВ}$. Таким чином, можна визначити необхідний коефіцієнт підсилення

$$K = \frac{5}{0.096} = 52.083. \quad (4.1)$$

Для реалізації вхідного каскаду був обраний інструментальний підсилювач INA 128 компанії Texas Instruments (рис. 4.2). Цей підсилювач відрізняється низьким рівнем власного шуму і є зручним у використанні.

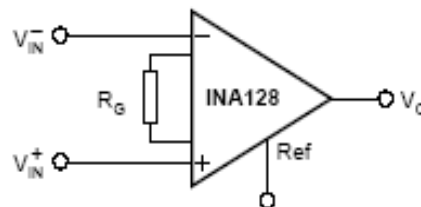


Рисунок 4.2 – Схема підключення інструментального підсилювача INA 128

Коефіцієнт підсилення встановлюється за допомогою резистора R_G , згідно з формулою

$$K = 1 + \frac{50 \text{ кОм}}{R_G}. \quad (4.2)$$

З стандартного ряду номінальних значень резисторів вибираємо резистор $R_G = 988 \text{ Ом}$, що дає коефіцієнт підсилення $K = 51,6$.

4.1.3 Вибір АЦП є критичним етапом при розробці цієї схеми, оскільки він забезпечує перехід між аналоговою та цифровою частинами системи. АЦП має значний вплив на точність роботи всього пристрою. Основними

характеристиками АЦП є розрядність і швидкість перетворення. При цьому часто між ними доводиться знаходити компроміс, оскільки збільшення розрядності може призвести до зниження швидкодії перетворювача.

Для цієї системи було обрано дванадцятирозрядний АЦП з послідовним виходом ADS1286 виробництва Texas Instruments. Основною особливістю цього перетворювача є організація управління через одно- або двопровідну послідовну шину, а не через паралельний інтерфейс. Завдяки цьому, цей АЦП легко інтегрується з послідовним портом комп'ютера RS-232.

4.2 Реалізація алгоритму вагового обліку через магістральний принцип

Згідно з результатами досліджень, представленими в розділі 3, реалізація алгоритму магістрального вагового обліку — методу побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, має базуватись на методі заданого діапазону частот із інтеграцією вагової функції в систему базисних функцій і застосуванням методу воріт. Водночас необхідно забезпечити високу швидкодію обчислень, використовуючи математичні перетворення, які мінімізують кількість обчислень.

Алгоритм запропонованого методу зображено на рис. 4.3.

Згідно з наведеним алгоритмом (рис. 4.3), блок 2 відповідає за формування масиву вихідних даних досліджуваного сигналу шляхом обміну інформацією між АЦП та ПЕОМ через послідовний інтерфейс RS-232.

Блоки 3 і 4 утворюють цикл, який потрібен для обчислення середньоарифметичного значення $\bar{F}$ та визначення величини воріт $G = \pm \bar{F}/10$ (блок 5).

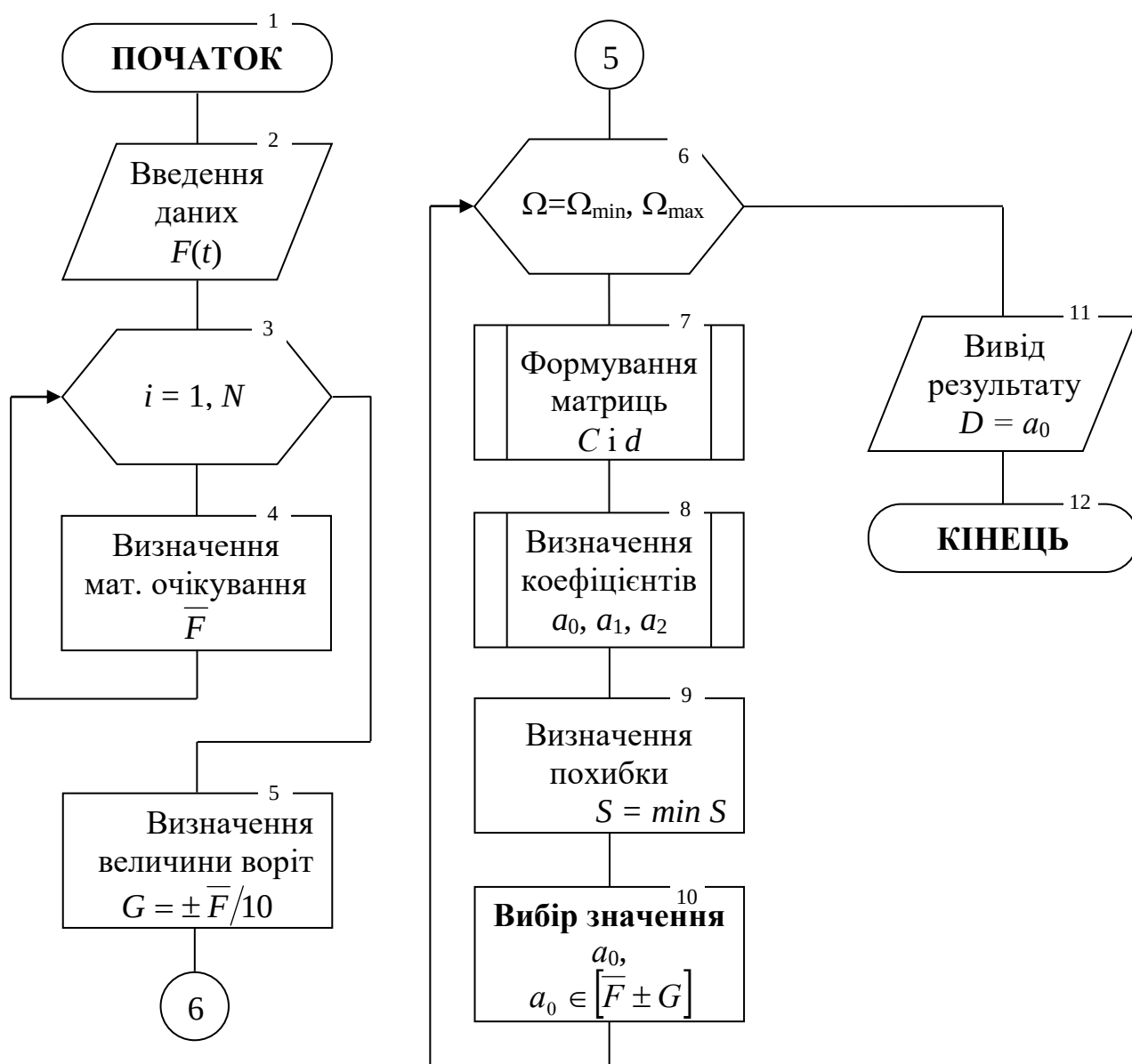


Рисунок 4.2 - Алгоритм побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, який використовується в системах магістрального вагового обліку

Блоки 6-10 утворюють цикл, який дозволяє визначити мінімальне середньоквадратичне відхилення та відповідні коефіцієнти апроксимації. Якщо значення коефіцієнта a_0 ($a_0 = d$) виходить за межі визначених воріт $a_0 \notin [\bar{F} \pm G]$, то шуканим результатом є середньоарифметичне значення сигналу $\bar{F}$. При цьому блок 7 формує матриці c і d наступного вигляду:

$$C = \begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0)(\varphi_0, \varphi_1)(\varphi_0, \varphi_2) \\ (\varphi_1, \varphi_0)(\varphi_1, \varphi_1)(\varphi_1, \varphi_2) \\ (\varphi_2, \varphi_0)(\varphi_2, \varphi_1)(\varphi_2, \varphi_2) \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

$$d = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$\text{де } (\varphi_j, \varphi_k) = \sum_{i=0}^n \varphi_j(t_i) \varphi_k(t_i), \quad d_k = \sum_{i=0}^n f(t_i) \varphi_k(t_i), \quad j, k = \overline{0, m}.$$

Блок 8 розв'язує систему лінійних рівнянь у матричній формі $Ca = d$, де

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \text{ шуканими є коефіцієнти.}$$

Блок 9 обчислює мінімальне значення середньоквадратичного відхилення для різних частот Ω_j із заданого діапазону $[\Omega_{\min}, \dots, \Omega_{\max}]$ та відповідні коефіцієнти a_0, a_1, a_2 . Блок 10 порівнює отриманий коефіцієнт a_0 з граничним значенням воріт. Після завершення циклу відбувається формування та виведення результату (блок 11).

Якщо результат обчислень знаходиться в межах воріт, то за допомогою формул (2.8) можна визначити такі параметри, як амплітуда, частота та початкова фаза періодичної завади.

4.2.1. Програмна реалізація алгоритму може бути представлена в спрощеному вигляді як послідовність етапів: "вагова платформа $\rightarrow$ АЦП $\rightarrow$ ПЕОМ". Спочатку вагова платформа перетворює зусилля, що діє на тензодатчики, в аналоговий сигнал. АЦП здійснює прийом цього сигналу та перетворює його в двійковий код. Після цього ЕОМ приймає двійковий код від АЦП і проводить його подальшу обробку. Керування усім процесом вимірювання здійснюється ЕОМ, яка задає режими роботи АЦП, періодичність опитування (для статичних вимірювань), виконує алгоритми температурної корекції та цифрової фільтрації сигналів. Отже, взаємодія між

вузлом керування (ЕОМ) та ваговою платформою відбувається через обмін даними між АЦП і ЕОМ. Програма, що реалізує алгоритм оцінки постійної складової сигналу, повинна забезпечити передачу даних від АЦП до ЕОМ для подальшої обробки.

Після налаштування обміну даними між АЦП та ЕОМ, програма користувача передає керуюче слово та слово запиту, отримуючи у відповідь пакет даних про стан датчиків вагової платформи. Оскільки автоматично не визначається момент наїзду та з'їзду колеса вагона з вагової платформи, програма повинна самостійно обчислювати ці моменти на основі отриманих даних. Для правильного функціонування алгоритму оцінки постійної складової сигналу, формування масиву вихідних даних має відбуватися тільки в ті моменти часу, коли коливання, викликані перехідними процесами "шлях → платформа" або "платформа → шлях", є мінімальними.

Тому в програмі, окрім основного алгоритму обробки даних, реалізовано також алгоритм для формування масиву вихідних даних.

Після формування масиву вихідних даних, виконання програми користувача продовжується відповідно до алгоритму, представленого на рис. 4.3. На цьому етапі здійснюється розрахунок коефіцієнтів системи лінійних рівнянь (4.3) та їх розв'язання (блоки 7 і 8). Отриманий результат зберігається в базі даних (у текстовому файлі або виводиться на екран, залежно від налаштувань користувача). Після цього програма повертається до етапу формування вихідних даних, очікуючи наїзд наступного колеса вагона.

Висновки

1. Було проведено аналіз сучасних методів і засобів автоматизованих систем управління та передових інформаційних технологій для задачі підвищення точності і швидкодії автоматизованих ваговимірювальних систем. Досліджено, що класичні методи, засновані на усередненні вибірки сигналу, не можуть забезпечити необхідну точність вимірювань, оскільки вони не враховують специфіку вхідного сигналу при автоматизованому зважуванні об'єктів, що рухаються на високих швидкостях. Це підтверджує необхідність розробки нових методів обробки сигналу, таких як методи побудови інформаційної моделі оцінки маси об'єкта в умовах обмеженого часу зважування.

2. Досліджено автоматизовану ваговимірювальну систему з метою розробки нової об'єктно-орієнтованої моделі автоматизованого процесу зважування об'єктів у русі як базової моделі для подальших розробок методів побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єктів, що рухаються з підвищеною швидкістю.

3. На основі нової об'єктно-орієнтованої моделі зважування вагонів у русі розроблено метод заданого діапазону частот, який, шляхом послідовного аналізу частот у визначеному діапазоні, дозволяє визначити оцінки інформативних параметрів тензометричних сигналів для побудови інформаційної моделі процесу автоматизованого зважування об'єктів, що рухаються.

4. Запропоновано нові ефективні методи підвищення завадостійкості методу заданого діапазону частот, шляхом його доповнення методами подвійного інтегрування вхідного сигналу або вагової функції. Ці методи знижують вплив високочастотних завад при автоматизованому вимірюванні маси рухомих об'єктів, що сприяє поліпшенню інформаційних параметрів розроблюваної інформаційної моделі.

5. З урахуванням методу вагової функції розроблено метод та алгоритм побудови інформаційної моделі для оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування, що забезпечує високу точність і швидкодію завдяки введенню обмежень на величину постійної складової сигналу — метод воріт.

6. За допомогою математичного моделювання визначено статистичні характеристики якості оцінки маси рухомих об'єктів при швидкості до 40 км/год: відносна похибка становить $\mu = -0.0053 \%$, $\sigma = 0.3026 \%$, при цьому

розподіл наближається до нормального $f_t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0.1026} e^{\frac{-(x-0.0035)^2}{2 \cdot 0.1026^2}}$.

Список літератури

1. ГОСТ 30414-96 Весы для взвешивания транспортных средств в движении. Общие технические требования.
2. ГОСТ 29329-92 Весы для статического взвешивания. Общие технические требования.
3. Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Дубиняк С.Г. Теорія технічних систем .-К.: Тернопіль, 1998.-310с.
4. Шендрик Є.В. Інформаційна модель оцінки маси об'єкта при обмеженому часі зважування: Дис...канд. техн. наук. – Одеса, 2003. – 128 с.
5. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління: Підручник. – К.: НАУ, 2003. – 208 с.
6. Руденко О.Г., Бородянський Є.В. Штучні нейронні мережі: Навчальний посібник. – Харків: ТОВ „Компанія СМІТ”, 2006. – 404 с.
7. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
8. Осадчий С.І., Дідик О.К. Дослідження якості комплексної системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Випуск 43 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2006. – С. 133 – 137.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
10. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
11. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.

12. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
13. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. Львів : Афіша, 2005. 350 с.
14. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. 3-є вид., стереотипн. Львів : «Новий Світ – 2000». 2006. 232 с.
15. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
16. Конституція України. Київ : Андронум, 2020. 60 с.
17. Про охорону праці : Закон України. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 21.10.2024).
18. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 03.11.2024).
19. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 03.11.2024).
20. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 29.10.2024).
21. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 24.10.2024).
22. Кодекс цивільного захисту України. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 17.11.2024).
23. Кодекс законів про працю України. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення:

07.10.2024).

- 24.Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
- 25.Вікіпедія. Вільна енциклопедія : веб-сайт. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (дата звернення: 31.09.2024).
- 26.Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці

Охорона праці (ОП) – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я та працездатності людини в процесі праці [13, 14, 15].

Охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності, створення безпечних і нешкідливих умов праці є одним із найважливіших державних завдань.

Правовими актами, у яких закріплено основні положення вітчизняного законодавства про ОП, є загальні закони, а також спеціальні нормативні та підзаконні акти.

Серед загальних законів, які утворюють правову основу з питань ОП, перш за все, слід відзначити: Конституцію України; Закони України: «Про охорону праці», «Основи законодавства України про охорону здоров'я», «Про систему громадського здоров'я», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування»; Кодекс цивільного захисту України (КЦЗ); Кодекс законів про працю України (КЗпП) [13, 14, 15].

Спеціальними нормативними актами в галузі ОП є Нормативно-правові акти з ОП (НПАОП), Державні стандарти України (ДСТУ), Державні будівельні норми (ДБН), Санітарні норми, Правила пожежної безпеки, Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) та інші нормативні документи [13, 14, 15].

В Основному Законі – Конституції України [16] питанням ОП присвячені декілька статей.

В статті 43 Конституції України записано: «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної

законом».

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (стаття 45 Конституції України).

У тексті статті 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист.

Основоположним законодавчим документом у галузі охорони праці є Закон України «Про охорону праці» [17], дія якого поширюється на всі підприємства, установи і організації, незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на усіх громадян, які працюють.

З прийняттям у 1992 р. Закону України «Про охорону праці» принципово змінилися взаємовідносини власника підприємства і робітника у вирішенні проблем ОП. Власник підприємства почав нести повну відповідальність за створення безпечних умов праці, а за державою закріпилася функція нагляду за охороною праці, чим раніше опікалися профспілки.

В цьому Законі були задекларовані основні принципи державної політики в галузі ОП [17]:

- пріоритет життя і здоров'я працівників по відношенню до результатів виробничої діяльності підприємства;
- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- повне відшкодування шкоди особам, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки, підвищення кваліфікації працівників з охорони праці та ін.

Відповідно до статті 49 Закону України «Про охорону праці» [17], за порушення законодавчих та інших нормативних актів про ОП, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за ОП і представників професійних спілок винні притягаються до дисциплінарної, адміністративної, кримінальної відповідальності, згідно із законодавством.

Питання охорони здоров'я та гігієни праці регламентуються Законами

України «Основи законодавства України про охорону здоров'я» [18] та «Про систему громадського здоров'я» [19]. Вони визначають правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні; регулюють суспільні відносини у цій галузі; передбачають розробку й реалізацію адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення, в необхідних випадках, лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події чи ситуації, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам та іншим громадянам збитків, яких завдано їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Основними принципами державної політики в сфері використання ядерної енергії та радіаційного захисту, відображені у Законі України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [20], є:

- пріоритет захисту людини та навколишнього середовища від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії;
- відкритість і доступність інформації, пов'язаної з використанням ядерної енергії і т. ін.

Основними принципами соціального страхування від нещасного випадку Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» [21] проголошує:

- обов'язковий порядок страхування працівників, а також учнів та студентів навчальних закладів;
- сплату страхових внесків тільки роботодавцями;
- своєчасне та повне відшкодування шкоди потерпілим;
- надання державних гарантій застрахованим у реалізації їх прав та ін.

КЦЗ України [22] регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, реагуванням на них, функціонуванням єдиної державної системи

цивільного захисту, та визначає повноваження органів державної влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, органів місцевого самоврядування, права та обов'язки громадян України, іноземців та осіб без громадянства, підприємств, установ та організацій незалежно від форми власності.

Одним із головних документів, який забезпечує чітке виконання службових обов'язків працівниками, є КЗпП України [23]. КЗпП трактує вимоги до трудової діяльності громадян в Україні і регулює трудові відносини всіх працівників, сприяючи зростанню продуктивності праці і поліпшенню її якості. Кодекс спрямований на охорону трудових прав працюючих.

В КЗпП України зазначені наступні положення [23]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (стаття 176), а також осіб молодших 18 років (стаття 192); забороняється застосування праці жінок на важких роботах і роботах із шкідливими або небезпечними умовами праці (стаття 174).

НПАОП, які до початку 2003 р. носили назву Державні нормативні акти про ОП (ДНАОП), – це правила, норми, положення, стандарти, інструкції та інші документи, обов'язкові до виконання [13, 14, 15]. Законодавством передбачено, що залежно від сфери дії НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядом праці в 1997 р. З 2003 р. ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [15].

Серед НПАОП досить важливе місце посідають Державні стандарти України (ДСТУ) та Державні будівельні норми (ДБН) [13, 14]. ДСТУ почали розроблятися з 1992 р. і поступово вводилися в якості Національних стандартів у всіх сферах економіки, на заміну стандартам колишнього СРСР (Міждержавних стандартів ГОСТ). ДБН – нормативний акт технічного характеру, що встановлює обов'язкові вимоги до об'єкта нормування у будівництві. Об'єктами нормування у будівництві є: планування та забудова території, об'єкт будівництва, містобудування та архітектури і його складові частини, склад і зміст документації об'єктів будівництва, містобудування та архітектури тощо [13, 15].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми) затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), Державні санітарні правила і норми (ДСанПіН) стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв, Державні санітарні норми та правила (ДСНП), Державні санітарні норми (ДСН), Державні санітарні правила (ДСП) [13, 15].

Доповнюють право у в галузі пожежної безпеки Правила пожежної безпеки України, постанови Верховної Ради України, укази і розпорядження Президента України, декрети, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, рішення органів державної виконавчої влади, місцевого та регіонального самоврядування, прийняті в межах їх компетенції [13, 15].

ПУЕ визначають будову, принципи улаштування, особливі вимоги до окремих систем, їх елементів, вузлів і комунікацій електроустановок. ПУЕ встановлюють вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ [24].

Власники підприємств, установ, організацій, або уповноважені ними органи, розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції та інші нормативні акти з ОП, що діють у межах підприємства, установи, організації [13, 14, 15].

До основних нормативних актів підприємства належать:

- Положення про систему управління ОП на підприємстві;
- Положення про службу ОП підприємства;
- Положення про комісію з питань ОП підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань ОП;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань ОП;

- Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;
- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативним актам про ОП;
- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;
- Положення про санітарну лабораторію підприємства;
- Інструкції з ОП для працюючих за професіями і видами робіт;
- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;
- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань ОП;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;
- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;
- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Цей перелік може змінюватись і доповнюватись, залежно від специфіки кожного конкретного підприємства [14, 15].

Держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

A.2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва при експлуатації системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого на

працівника за певних умов призводить до захворювання або зниження працездатності [13].

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого на працівника, при певних умовах, призводить до травм або раптового різкого погіршення здоров'я [13].

Усі шкідливі та небезпечні фактори, що виникають у виробничих умовах, поділяються за природою дії на: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні [13, 14, 15].

До фізичних шкідливих та небезпечних виробничих факторів належать: рухомі машини та механізми; пересувні частини виробничого устаткування; підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура поверхонь устаткування; підвищений рівень шумів та вібрацій на робочому місці, підвищений або понижений барометричний тиск в робочій зоні та його різка зміна; підвищена або понижена: вологість повітря, іонізація повітря; небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів; відсутність чи нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони та ін.

При недостатній увазі до особливостей виробничого обладнання та технологічного процесу, а також неправильному зберіганні горючих, паливо-мастильних та вибухонебезпечних речовин вони можуть стати джерелом вибуху або пожежі.

Вибух – швидкоплинний фізичний або фізико-хімічний процес, що відбувається в обмеженому об'ємі за короткий проміжок часу [25].

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним вогнищем, що розповсюджується в часі і просторі та створює загрозу життю і здоров'ю людей, навколишньому середовищу, призводить до матеріальних збитків [13, 15, 25]. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60°C вже є життєво-небезпечним для людини. Вдихання робітниками розігрітого повітря, разом із продуктами згорання, може призвести до ураження органів дихання та смерті. Крім того, коли людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити

під дію наступних небезпечних та шкідливих факторів: токсичні продукти згорання; вогонь; підвищена температура середовища; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи, витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Ще одним суттєво небезпечним фактором є можливість враження персоналу підприємства природною електрикою (блискавкою) під час грози. Особливо небезпечним цей чинник є для підприємств, на території яких є висотні споруди (будинки, водонапірні башти, антени зв'язку, димові труби та інші будівельні конструкції), а також географічно і кліматично розташованих у місцевостях, з підвищеною грозовою активністю. Причому, блискавка здатна як завдавати людям враження високою напругою і, як наслідок, електротравм, так і стати причиною пожеж та вибухів.

Хімічний шкідливий та небезпечний виробничий фактор – це наявність на робочому місці хімічних речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на: загальнотоксичні, дратівні, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію.

До біологічних шкідливих та небезпечних факторів виробництва відносять об'єкти, дія яких на робітників викликає травми або захворювання: патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, грибки, спори і пилок рослин та ін.), макроорганізми (рослини, комахи, тварини) і продукти життєдіяльності мікро- та макроорганізмів.

Психофізіологічні небезпеки та шкідливості – це нервово-психічні та емоційні перевантаження; фізичні перевантаження (статичні й динамічні); монотонність праці; розумове перенапруження; перенапруження аналізаторів, зокрема, стомлення зору працюючого.

За характером дії на організм людини шкідливі та небезпечні виробничі чинники поділяються на 4 класи [14]:

- 1-й – надзвичайно небезпечні;
- 2-й – високонебезпечні;
- 3-й – помірно небезпечні;

4-й – малонебезпечні.

Один і той же небезпечний та шкідливий виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до кількох різних груп [13, 14, 15].

Конкретні умови діяльності істотно впливають на психічні та життєво важливі функції людини. Якщо вплив факторів (з врахуванням їх взаємодії) в конкретних умовах діяльності такий, при якому забезпечується нормальне здійснення психічних та життєво важливих функцій організму, не виникає високого напруження компенсаторних систем організму і вдало виконується задана трудова діяльність, то такі умови можуть бути визначені як сприятливі, або комфортні, а в найкращих умовах – як оптимальні. Коли, в силу дії факторів, виникає високе напруження компенсаторних систем організму, то такі умови визначаються як несприятливі, або дискомфортні, а при вираженому несприятливому ефекті – як екстремальні.

А.3 Заходи з усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва при експлуатації системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні

Безпечність виробничого устаткування – це властивість виробничого устаткування відповідати вимогам безпеки праці під час монтажу (демонтажу) і експлуатації в умовах, установлених нормативною документацією.

Для усунення або зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів на автопідприємстві, де здійснюється динамічне зважування транспортних засобів, слід дотримуватись основних правил техніки безпеки та виробничої санітарії [13, 14]:

- територія підприємства має бути огорожена і доступ до неї стороннім особам заборонений;
- у місцях проведення вантажно-розвантажувальних робіт територія

повинна бути спланована і мати тверде покриття. Нахил площ повинен бути не більше 3°;

- на транспортних шляхах (залізничного, автомобільного та трубопровідного транспорту) мають бути встановлені попереджувальні знаки, вивішені плакати, які забороняють переходити шляхи у невстановленому місці;

- під час роботи всі працівники мають дотримуватись засобів колективної та особистої гігієни і виробничої санітарії.

Безпечність будь-якого виробничого устаткування забезпечується правильним вибором принципів дії, конструктивних схем, елементів конструкції; використанням засобів механізації, автоматизації та дистанційного керування; застосуванням у конструкції засобів захисту; дотриманням ергономічних вимог; включенням вимог безпеки в технічну документацію з монтажу, експлуатації, ремонту; транспортування та зберігання устаткування; використанням у конструкції устаткування безпечних та нешкідливих матеріалів.

Для того, щоб запобігти виникненню небезпеки при раптовому вимкненні джерел енергії всі робочі органи, а також пристрої, які використовуються для захоплення, затискування та підймання заготовок, деталей виробів, тощо, повинні оснащуватись спеціальними захисними пристосуваннями. Причому необхідно унеможливити самовільне вмикання робочих органів при відновленні подачі енергії.

Конструкції устаткування повинні забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, запобігати накопиченню статичної електрики в небезпечних кількостях. Устаткування має бути оснащене засобами сигналізації про порушення нормального режиму роботи, а в необхідних випадках (аваріях, небезпечних пошкодженнях, режимах близьких до небезпечних) – засобами автоматичної зупинки, гальмуванні та від'єднання від джерела енергії.

Для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки на підприємстві передбачено наступні засоби пожежогасіння:

- внутрішній пожежний кран;

- вогнегасник хімічний;
- вогнегасна речовина – ящик з піском;
- вуглекислотний вогнегасник;
- пожежний щит: азбестове полотно, відра, лопати, сокира, багор.

Пожежна профілактика передбачає заходи з попередження та ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери розповсюдження вогню та забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять.

Розміщення та улаштування складів для зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин. на території підприємства виконуються із врахуванням протипожежних вимог (ДСТУ 2272-93).

При проектуванні устаткування необхідно враховувати умови його експлуатації з тим, щоб, при дії на нього різноманітних природних чинників: вологи, сонячної радіації, високих та низьких тисків і температур, а також механічних коливань, агресивних речовин тощо, устаткування не ставало небезпечним.

Для захисту будівлі підприємства, де розміщується персонал з обслуговування та налагодження системи оцінювання маси автомобіля при динамічному поосному зважуванні, від ураження природною електрикою (блискавкою) необхідно передбачити систему блискавкозахисту.

А.4 Розрахунок системи штучного виробничого освітлення у приміщенні оператора системи вимірювання маси рухомого залізничного транспорту

Початкові дані

Розрахувати систему загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для виробничого приміщення оператора системи вимірювання маси рухомого залізничного транспорту, в якому виконуються зорові роботи високої точності (розряд III_в).

Розміри приміщення:

- довжина $a = 12$ м;
- ширина $L = 5$ м;
- висота $H = 3,2$ м.

Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $p_{\text{стелі}} = 70$ %;
 $p_{\text{стін}} = 50$ %.

Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м.

Для освітлення використати світильники типу УПМ-15, які підвішуються до стелі; відстань від світильника до стелі $h_c = 0,5$ м.

Мінімальна освітленість, за нормами, $E = 200$ лк.

Розрахунок

Розрахунок проведемо за методикою, викладеною у [13].

Визначаємо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_o = H - h_c = 3,2 - 0,5 = 2,7 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення, з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою, відповідно до СНіП II-4-79 [16, 26], повинна бути 2,5...4,0 м, залежно від характеристики світильника. В нашому випадку h_o відповідає цій вимозі.

Висота підвісу світильника над робочою поверхнею (рис. А.1) дорівнює:

$$h = h_o - h_p = 2,7 - 0,7 = 2,0 \text{ м.}$$

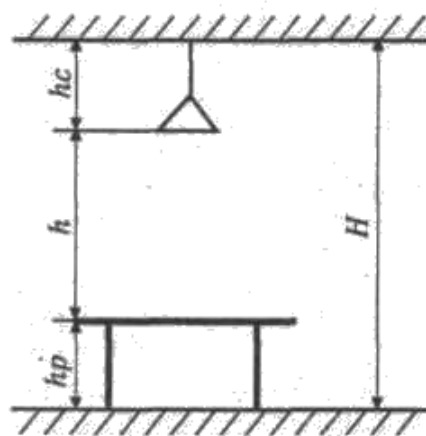


Рисунок А.1 – Схема визначення висоти підвісу світильника

Показник приміщення і становить:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{12 \cdot 5}{2 \cdot (12 + 5)} = 1,76.$$

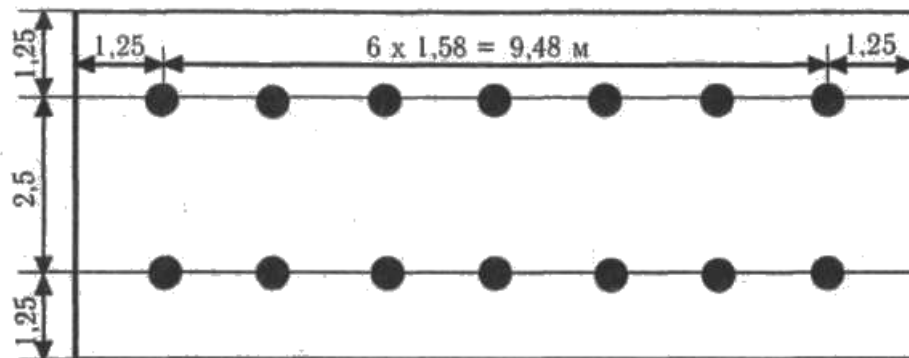
Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками L і висоти їх підвісу h . Визначимо рекомендовану відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2 = 1,4 \text{ м.}$$

Необхідна кількість світильників становить:

$$N = \frac{a \cdot b}{2 \cdot L^2} = \frac{12 \cdot 5}{2 \cdot 1,4^2} = 13,3 \text{ шт.}$$

Приймаємо 14 світильників. Враховуючи розміри приміщення, розташовуємо їх у два ряди по 7 штук (рис. А.2).



**Рисунок А.2 – Схема розташування світильників УПМ-15
у приміщенні оператора системи вимірювання маси
рухомого залізничного транспорту**

За табл. 3.25 [26] знаходимо коефіцієнт використання $\eta = 0,58$ для світильника УПМ-15, при $i = 1,75$, $p_{стелі} = 70 \%$, $p_{стін} = 50 \%$.

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику встановлюється лише одна лампа, дорівнює

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 60 \cdot 1,3 \cdot 1,15}{14 \cdot 0,8} = 2209 \text{ лм},$$

де K_z – коефіцієнт запасу, що враховує запорошення світильників та знос джерел світла в процесі експлуатації ($K_z = 1,4 \dots 1,5$, за умови чищення світильників не рідше двох разів у рік);

S – освітлювальна площа, що, м^2 ;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення ($Z = 1,1 \dots 1,2$);

η – коефіцієнт затінення (запроваджується для помешкань із фіксованим положенням працюючих і приймається рівним $\eta = 0,8 \dots 0,9$);

За табл. 3.27 [26] обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 5 % менше розрахункового, однак не перевищує встановлену норму[^]

$$-10 \% < \Delta \Phi_{\text{л}} < +20 \ \%.$$

Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні складає:

$$\sum P_{\text{св}} = P_{\text{св}} \cdot N = 150 \cdot 14 = 2100 \text{ Вт}.$$