

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

Другий (магістерський)

Автоматизоване управління рухом роботизованої колісної платформи з  
урахуванням обмежень її коливань на ресорах  
(тема)

Виконав:  
студент 2 курсу, групи АУТПм-21-1  
Леонов М.В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація  
та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизоване управління  
технологічними процесами  
( повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю.В  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш  
(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

20.12.2022

М. В. Леонов

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Леонову Микиті Владіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Автоматизоване управління рухом роботизованої колісної платформи з урахуванням обмежень її коливань на ресорах затверджена наказом по університету від 07.11.2022р. № 1463Ст

2. Термін подання студентом роботи: 22.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: Математична модель вертикальних коливань колісної платформи на ресорах. Мова Scilab. Автоматизована оцінка прискорення при вертикальних коливаннях. Графічний редактор Xcos у системі моделювання Scilab.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Дослідження автоматизованої оцінки прискорення при вертикальних коливаннях

4.3 Дослідження процесів вимірювання прискорення вертикальних коливань

4.4 Розробка системи автоматизованого управління швидкістю

4.5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал у вигляді презентації (\*.pptx) – 12 с.

6. Консультанти розділів роботи (п. 6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	2.11.2022	виконано
2	Аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи	12.11.2022	виконано
3	Аналіз існуючих автоматизованих систем обмеження швидкості руху	14.11.2022	виконано
4	Дослідження автоматизованої оцінки прискорення при вертикальних коливаннях	16.11.2022	виконано
5	Дослідження процесів вимірювання прискорення вертикальних коливань	25.11.2022	виконано
6	Дослідження автоматизованого обмеження швидкості колісної платформи	02.12.2022	виконано
7	Алгоритм та розробка системи автоматизованого управління швидкістю	03.12.2022	виконано
8	Подання роботи на перевірку	05.12.2022	виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2022	виконано
10	Подання роботи на рецензію	08.12.2022	виконано
11	Подання на підпис роботи зав. кафедри	21.11.2022	виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	22.11.2022	виконано

Дата видачі завдання 1 листопада 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_ Леонов М. В.

(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

(підпис)

проф. Ромашов Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 109 с., 2 табл., 90 рис., 1 дод., 22 джерел.

### SCILAB, ПРИСКОРЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ, РЕСОРА, КОЛІСНА ПЛАТФОРМА, ОПОРНА ПОВЕРХНЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Метою цього дослідження є розроблення теоретичних основ автоматизованого управління рухом роботизованих колісних платформ з урахуванням обмежень їх коливань на ресорах.

Об'єкт дослідження – автоматизоване управління рухом колісних роботизованих платформ.

Предмет дослідження – врахування обмежень коливань на ресорах на автоматизоване управління рухом колісної роботизованої платформи.

Методи дослідження – виконання досліджень здійснюється на основі математичного та комп'ютерного моделювання руху та коливань на ресорах колісних роботизованих платформ, а також систем автоматизованого управління їхнім рухом з використанням рівнянь Лагранжа 2-го роду, методів теорії стійкості та засобів комп'ютерної системи Scilab.

У кваліфікаційній роботі пропонується метод автоматизованого управління рухом колісної платформи на ресорах у залежності від зміни її прискорення вертикальних коливань, яке вимірюється акселерометром.

Практична частина реалізована програмного засобу Scilab та графічного редактору системи комп'ютерного моделювання Xcos та проведено експериментальні дослідження автоматизованого керування рухом колісної платформи з урахуванням обмеження її коливань на ресорах.

## ABSTRACT

Explanatory note: 109 pages, 2 tables, 90 figures, 1 appendices, 22 sources.

### SCILAB, ACCELERATION of VERTICAL VIBRATIONS, SPRING, WHEELED PLATFORM, UNDERLAYMENT, MATHEMATICAL MODEL

The aim of this research – development of theoretical automated government motion of the роботизованих wheeled platforms bases taking into account the limits of their vibrations on springs.

A research object – automated traffic of the wheeled robo-platforms control.

The article of research – taking into account of limitations of vibrations on springs on the automated traffic of the wheeled роботизованої platform control.

Research methods – implementation of researches comes true on the basis of mathematical and computer design of motion and vibrations on the springs of the wheeled роботизованих platforms, and also systems of the automated their traffic control with the use of equalizations of Lagrange 2th family, methods of theory of firmness and facilities of the computer system Scilab.

In qualifying work the method of the automated traffic of the wheeled platform control is offered on springs in dependence on the change of her acceleration of vertical vibrations, that is measured by an accelerometer.

Practical part is realized programmatic means of Scilab and graphic to the editor of the system of computer design of Xcos and experimental studies of the automated traffic of the wheeled platform control are undertaken taking into account the limit of her vibrations on springs.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень і термінів .....	8
Вступ.....	9
1 Стан проблеми обмеження вертикальних коливань колісних платформ ....	11
1.1 Вертикальні коливання колісних платформ.....	11
1.2 Ресори та їхні конструкції.....	14
1.3 Автоматизована система обмеження швидкості руху .....	19
1.4 Висновки за розділом.....	21
2 Розробка системи автоматизованого управління рухом роботизованої платформи з урахуванням обмежень її коливань на ресорах.....	22
2.1 Математична модель вертикальних коливань на ресорах колісної платформи.....	22
2.2 Автоматизована оцінка прискорення при вертикальних коливаннях....	30
2.3 Автоматизоване обмеження швидкості колісної платформи.....	34
2.4 Висновки за розділом.....	40
3 Комп'ютерне моделювання вертикальних коливань та процесів автоматизованого управління рухом колісних платформ .....	41
3.1 Компютерна система scilab.....	41
3.2 Вертикальні коливання колісної платформи на ресорах .....	45
3.3 Процеси вимірювання прискорення вертикальних коливань .....	67
3.4 Автоматизоване управління швидкістю .....	78
3.5 Висновки за розділом.....	96
4 Охорона праці.....	97
4.1 Аналіз умов праці в лабораторії.....	97
4.2 Промислова безпека в лабораторії.....	100
4.3 Пожежна профілактика в лабораторії.....	101
4.4 Висновки за розділом.....	102
Висновки .....	103
Перелік джерел посилання .....	105
Додаток а текст програми.....	108

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- АВК – амплітуда вертикальних коливань;  
АКШ – автоматизоване керування швидкістю;  
ВОП – вертикальне відхилення опорної поверхні;  
ДОП – довжина опорної поверхні;  
ЖР – жорсткість ресори;  
КП – колісна платформа;  
МДН – максимальна допустима напруга;  
МП – мобільна платформа;  
НА – напруга акселерометру;  
ОП – опорна поверхня;  
ПВК – прискорення вертикальних коливань;  
ПЕ – пружні елементи;  
ПР – плавність руху;  
РКП – роботизована колісна платформа;  
РП – ресорна підвіска;  
ЧВК – частота вертикальних коливань.

## ВСТУП

Забезпечення плавності ходу колісних платформ, автомобілів, потягів та їх вагонів стало необхідною умовою науково-технічного прогресу, а отже, і сталого розвитку економіки, технологій, виробництва та держави.

Незважаючи на те, що ресору багато хто вважає застарілим, він активно використовується на сьогоднішній день. Ресора – незмінна частина підвіски спорткарів, масивних позашляховиків, автомобілів, які здатні витримувати великі навантаження, колісних платформ на виробництвах та об'єктах промисловості. В залежності від того, в якому транспорті вони використовуються, ресори можуть бути:

- поперечні – мають просту конструкцію, з заміною можна справитись самостійно, однак роблять хід авто жорстким;
- повздовжні – монтуються на кожне колесо, забезпечують плавність ходу;
- еліптичні – забезпечують м'який хід авто, проте мають недоліки, серед яких висока вартість та вплив на якість управління;
- напівеліптичні – варіант, який часто використовується в сучасних позашляховиках.

Установлювати ресори на сучасний легковий автомобіль немає сенсу, адже вони зроблять його більш жорстким та вибагливим в управлінні. Проте ця деталь є ідеальним рішенням для багатьох моделей колісних платформ, вантажівок, спортивних авто та позашляховиків. Оскільки вона відповідає за рівномірний розподіл навантаження між несучими частинами, то повинна бути високоякісна та надійна.

Метою дослідження є розроблення теоретичних основ автоматизованого управління рухом роботизованих колісних платформ з урахуванням обмежень їх коливань на ресорах.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних задач:

- аналіз технічного завдання та літератури з питання, що розглядається;

- аналіз існуючих методів підвищення стійкості та плавності ходу колісних платформ;
- аналіз сучасних рішень використання ресор;
- теоретичне обґрунтування методів підвищення довговічності колісної платформи;
- аналіз методів та способів оцінки коливань на ресорах під час руху;
- розробка та програмна реалізація математичної моделі;
- дослідження властивостей для збільшення плавності ходу колісної платформи;
- розглянути питання охорони праці [9];
- оформити пояснювальну записку згідно [1] та [2].

## **1 СТАН ПРОБЛЕМИ ОБМЕЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ КОЛІСНИХ ПЛАТФОРМ**

Проблема обмеження вертикальних коливань є актуальною та важливою у процесах виробництва, бо коливання – одне з найпоширеніших явищ у природі, фізиці та техніці. Вони є причиною багатьох аварій і катастроф (втомні руйнування машин, відмови приладів, землетруси), шкідливо впливають на людину (віброзахворювання). Водночас коливання виконують і корисну роль, будучи основою технологічних операцій (вібропереміщення вантажів) і цілих галузей техніки (радіотехніка). Під час коливань відбувається неперервне перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки. При цьому внаслідок недосконалої пружності частина механічної енергії перетворюється на теплову, яка випромінюється з коливальної системи. Це може негативно впливати на безпеку людей, вантажу та довговічність елементів колісної платформи через вплив постійних коливань на систему підвіски, якщо розглядати випадок з роботизованою колісною платформою на ресорах. Важливо враховувати, що вертикальні коливання впливають не тільки на систему підвіски, але й на всю колісну платформу, вантаж та пасажирів, тому це може спричинити аварії та проблеми на виробництві, будівництві, тощо.

### **1.1 Вертикальні коливання колісних платформ**

Коливання – специфічні рухи або зміни стану систем різної фізичної природи (механіка, фізика, біологія, хімія, економіка та ін.) для яких спостерігається певна повторюваність у часі. В багатьох випадках для опису коливальних процесів використовуються близькі за змістом поняття вібрація, осциляція [3]. Коливальний процес в будь-якій системі виникає лише тоді, коли її будова забезпечує виникнення сил, що намагаються

повернути систему до стабільного стану при внесенні зовнішніх збурень. Такі сили називають відновлювальними.

Вимушені коливання колісної платформи виникають під дією зовнішніх обурюючих сил. Обурюючі сили з'являються внаслідок нерівності опорної поверхні та у результаті змінення швидкості колісної платформи, або змінення напрямку її руху.

Найбільше значення мають вимушені коливання, викликані нерівностями опорної поверхні. Нерівності опорної поверхні (мікропрофіль дороги) визначаються довжиною, висотою, формою та чергуванням нерівностей.

Опорна поверхня навіть гарної якості не є ідеально рівною. З часом опорна поверхня зношується та руйнується і нерівності опорної поверхні збільшуються.

Знос і руйнування опорної поверхні залежать не тільки від виду та якості покриття, атмосферних та температурних впливів, але також від впливу колісної платформи.

При русі колісна платформа робить на опорну поверхню додатковий динамічний вплив, обумовлене ударами, що передаються дорожньому полотну при проході коліс через вибоїни, і збільшенням тиску коліс на опорну поверхню внаслідок коливання кузову та коліс мобільної платформи. Це викликає збільшення сил тертя між колесами та опорною поверхнею, посилення стирання поверхні дороги. При коливанні колеса мобільної платформи елемент бігової доріжки колеса спочатку щільно прилягає до опорної поверхні, а після швидко від неї відділяється. У опорної поверхні утворюється розрідження та в область з пониженим тиском з всіх сторін, у тому числі від опорної поверхні, спрямовується повітря. Вплив колісної платформи на опорну поверхню проявляються сильніше, чим жорсткіше ресори та шини [4].

Колівання колісної платформи залежать від траєкторії, по якій рухаються осі коліс. Ця траєкторія не завжди співпадає з мікропрофілем

опорної поверхні. Колесо та ресора згладжує, нівелює та поглинає дрібні нерівності опорної поверхні. Це відбувається внаслідок двох причин: значної величини радіуса колеса порівняно з розмірами нерівностей та пружності і гнучкості ресори з шиною.

Чим більша швидкість колісної платформи, тим швидше вона зношується. Якщо зменшити коливання колісної платформи введенням ресор та амортизаторів, руйнування опорної поверхні сповільниться приблизно у два рази. У міру зносу опорної поверхні число вибоїн збільшується, займана площа також збільшується, внаслідок цього окремі вибоїни зливаються у цілі ділянки дороги [4].

Дорога навіть з твердим покриттям має незначну кількість рівних ділянок, та вони бувають невеликої протяжності. В основному дороги складаються з впадин та виступів, що безперервно чергуються. Взаємодія коліс мобільної платформи, що рухається, з нерівностями опорної поверхні викликає її коливання і вібрації, якими і характеризується плавність руху колісної платформи. Коливання стають особливо відчутними на пошкоджених (тріщини, вибоїни тощо) дорогах та дорогах с бруківкою. Ці коливання створюють великі незручності, викликаючи підвищену стомлюваність, запаморочення та інші неприємні фізіологічні відчуття у водія та пасажирів, шкідливо впливають на збереження вантажів, що перевозяться, а також на технічний стан мобільної платформи та її експлуатаційні властивості. Коливання та вібрації супроводжуються виникненням додаткових динамічних навантажень на різні агрегати КП, що спричиняють підвищене зношування та поломки деталей.

Нерівності дороги та пов'язані з ними коливання КП призводять до значного зниження швидкостей руху та продуктивності колісних платформ, погіршення тягових властивостей, зниження міжремонтних пробігів.

Тому однією з основних експлуатаційних вимог, що висувуються до сучасних мобільних платформ є максимальне покращення плавності його

ходу, яке має велике значення для рівня безпеки вантажу та підвищення ефективності використання.

Для визначення власної частоти коливань вантажу достатньо знати лише величину статичного прогину ресори. Отже, чим більший статичний прогин ресори, тим менша частота власних коливань. Після проїзду дорожніх нерівностей виникають вільні коливання колісної платформи. Ці коливання є згасаючими, оскільки завжди супроводжуються розсіюванням механічної енергії та переходом її у теплову енергію. Зменшення величини вертикальних коливань досягається зменшенням жорсткості ресори та шини, а також установкою амортизаторів, що гасять коливання за рахунок внутрішнього супротиву.

Для рішення задач аналізу та визначення оптимальної швидкості руху МП необхідно обрати оціночний параметр – критерій, що характеризує плавність руху КП, за допомогою якого оцінюють якість підбору оптимальної швидкості та порівнюють її різні варіанти. Швидкість у якої цей критерій має мінімальне значення, вважається найкращою. Пропонуються різні критерії та різні їх допустимі значення, наприклад у якості критерію приймають амплітуду коливань, потужність коливань, третю похідну переміщення, прискорення тощо. Якщо оцінка ведеться по перенавантаженню, що впливають на вантаж, то питання вирішується однозначно – оцінку необхідно вести по прискоренням.

## 1.2 Ресори та їхні конструкції.

Колісні пари платформи пов'язані з рамою візка через систему пружних елементів і гасителів коливань, що має назву ресорне підвішування. Пружні елементи пом'якшують удари, що передаються колесами кузову, а гасителі коливань гасять коливання, що виникають при русі [5]. Крім того, ресори і пружини передають спрямовуючі зусилля з боку коліс на раму візка і кузова. Коли колісна пара проходить яку-небудь нерівність колії (стики, хрестовини

тощо), виникають динамічні навантаження, у тому числі ударні. При цьому на колісну пару і букси діють великі прискорення. Появі динамічних навантажень сприяють також дефекти колісної пари: місцеві дефекти поверхонь катання, ексцентричність посадки колеса на вісь, неврівноваженість колісної пари та ін. За відсутності ресорного підвішування платформа жорстко сприймала би всі динамічні навантаження.

Пружні елементи, розташовані між колісними парами і платформою, під дією динамічної сили з боку колісної пари деформуються і виконують коливальні рухи разом з платформою, причому період таких коливань у багато разів більше, ніж період зміни збурюючої сили. Внаслідок цього зменшуються прискорення і сили, що діють на платформу, а отже, на вантажі, що перевозяться.

Як пружні елементи застосовують гвинтові пружини і листові ресори, а також гумометалеві елементи, пневматичні, торсіонні, кільцеві та інші типи ресор. Всі ці елементи часто називають загальним терміном – ресори. Якщо в системі ресорного підвішування відсутні або малі сили тертя, то при русі по періодичних нерівностях можуть з'явитися неприпустимо великі амплітуди коливань платформи на ресорах, особливо при настанні резонансу. У таких випадках для гасіння коливань у системі підвішування передбачають спеціальні гасителі – фрикційні або гідравлічні. Деякі пружні елементи одночасно є і гасителями коливань, володіючи достатнім внутрішнім тертям або тертям між частинами (наприклад, листові ресори) [4].

Ресорою називають пружний елемент, зібраний з окремих смуг, тарілок або кілець. До ресор також відносять торсіони, гумові і пневматичні пристрої.

Підвісна незамкнута листова ресора (рис. 1.1), які склалися з листів сталі, що мала жолоб всередині. Верхній лист мав назву корінний, другий, а іноді і третій – підкорінні, інші – набірні. Листи сполучалися між собою у середній частині шпилькою і стягувалися хомутом. Такі ресори використовувалися тривалий час і відрізнялися один від одного переважно кількістю листів і відстанню між вушками (хордою).



Рисунок 1.1 – Будова підвісної незамкнутої листової ресори

Ресора конструкції Галахова (рис. 1.2), розроблена у 1909 р. техніком Тамбовських майстерень Н. К. Галаховим, за гнучкістю і простотою конструкції вважається однією з кращих до теперішнього часу [4].



Рисунок 1.2 – Будова еліптичної ресори Галахова

Еліптична ресора Галахова [4] складається з двох п'ятирядних половин, сполучених разом наконечниками та спеціальної форми, що кріпляться до кінців корінних листів болтами або заклепками. Причому наконечник нижньої половини має 129 виступаючий буртик циліндричної форми, а наконечник

верхньої половини має жолоб, створюючи таким чином півшарнір. Для обмеження поперечного зсуву половин ресори в середній частині верхнього наконечника зроблено виступ, а в нижній половині відповідний виріз. Відстань між центрами наконечників незавантаженої ресори називається довжиною хорди, а завантаженої – довжиною ресори. Стріла прогинання еліптичних ресор вимірюється між корінними листами верхньої та нижньої половин біля хомутів, а висота ресори – між зовнішніми листами [5].

Останнім часом набули поширення пневматичні, гумометалеві, торсіонні та інші типи ресор. Пневматичні ресори, що є найпрогресивнішими елементами ходових частин, застосовують у візках пасажирських вагонів швидкісних потягів. Пневматичні ресори мають здатність підтримки положення кузова на певному рівні щодо головок рейок. Це є основною перевагою пневматичних ресор перед іншими типами пружних елементів. Крім того, вони володіють хорошими властивостями запобігати вібраціям та шуму. Пневматичні ресори мають меншу масу.

На рухомому складі найбільше розповсюдження отримали пневматичні ресори балонного (рис. 1.3), діафрагмового і змішаного типів.



Рисунок 1.3 – Пневматична ресора

Пневматичні ресори балонного типу (рис. 1.3) конструктивно являють собою гумокордну оболонку, заповнену повітрям, тиск якого всередині оболонки підтримується автоматичним регулюванням тиску повітря залежно від рівня діючих навантажень [6]. Найчастіше застосовують ресори діафрагмового типу, оскільки вони дозволяють одержувати регульовані характеристики вертикальної і горизонтальної жорсткості. На пневморесору спирається надресорна балка (рис. 1.3), яка з'єднується з діафрагмовим балоном, прикріпленим до корпусу. Всередині ресори є гумовий обмежувач, що передбачений на випадок різкого падіння тиску в системі або великого прогину надресорної балки під дією динамічних навантажень.

Торсіонні ресори застосовують у підвішуванні вагонів [6]. Така ресора є прямим сталевим стрижнем (торсіон) (рис. 1.4), один кінець якого закріплений у кронштейні, а інший жорстко пов'язаний з важелем, який шарнірно з'єднується з обресореною частиною вагона (надресорна балка, наприклад). Другою опорою служить підшипник, встановлений у кронштейні, причому в підшипнику може бути створено необхідне тертя, що сприятиме гасінню коливань вагона. Кронштейни і можуть бути укріплені на рамі візка. Торсіон, що виготовляється із спеціальної хромонікельмолібденової термічно обробленої сталі, по кінцях кріпиться жорстко, наприклад, за допомогою шліцьових з'єднань.

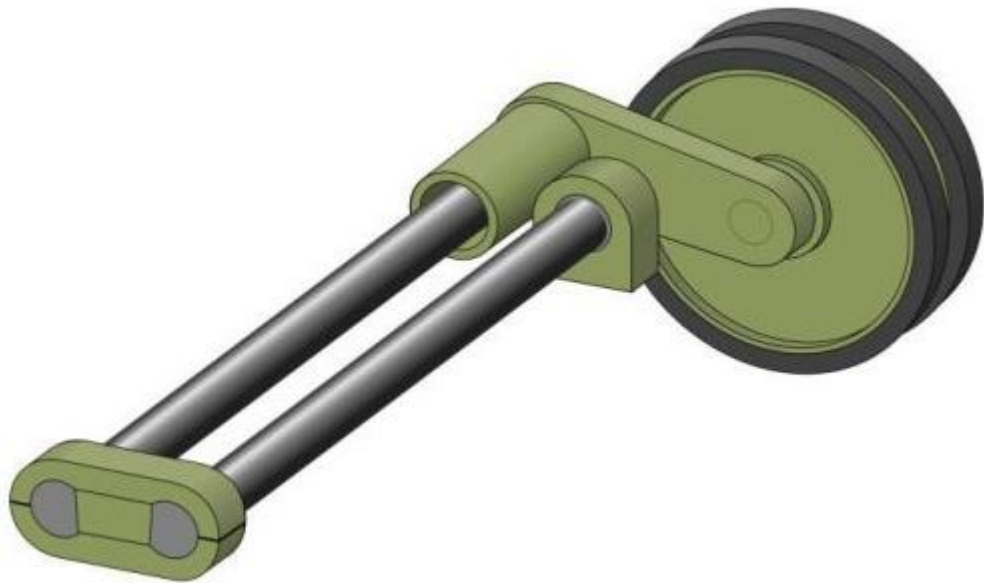


Рисунок 1.4 – Торсіонна ресора

Навантаження на торсіонну ресору викликає обертання важеля та скручування торсіона, викликаючи таким чином пружні деформації кручення. Подібні торсіонні пристрої застосовують у платформах для полегшення закриття кришок люків після розвантаження кузова: один кінець торсіона кріпиться до кришки люка, а інший до важеля, шарнірно пов'язаного з хребтовою балкою рами. Торсіон при цьому закручується під дією ваги вантажу, що висипається. Після звільнення кришки від ваги пружно-деформований торсіон підніме її в горизонтальне положення [8].

### 1.3 Автоматизована система обмеження швидкості руху

Автоматизована система обмеження швидкості руху використовує інформацію про дорогу для визначення місцевих обмежень швидкості. Інформацію можна отримати, знаючи положення МП, беручи до уваги обмеження швидкості, відомі для цього положення та шляхом інтерпретації особливостей опорної поверхні.

Дорожні особливості, такі як повороти та схили, можуть вимагати нижчої швидкості, ніж указане максимальне обмеження швидкості. Отже,

треба враховувати можливість зниження швидкості МП нижче встановленої, якщо цього вимагає система автоматизованого обмеження швидкості руху. Це дозволяє зменшити ризики аварій та нещасних випадків на виробництві, дорозі тощо.

Для деяких практиків безпеки руху МП активна система обмеження швидкості руху вважається прикладом «жорсткої автоматизації» який був значною мірою дискредитований. Але це більш стосується систем обмеження швидкості руху автомобілів, у нашому випадку це не має великого впливу, бо система призначена для регулювання швидкості колісних платформ на підприємствах та виробництвах, можливо складах сировини та готової продукції [9].

Управління швидкістю, яке має бути одним із центральних елементів будь-якої стратегії в галузі безпеки руху МП може допомогти досягненню належних швидкісних режимів з урахуванням потреб мобільності, потреб економіки, а також вимог безпеки та екології. Узгоджена та послідовна політика буде успішнішою за серію розрізнених заходів. Оцінка належної швидкості для всіх типів доріг та критичний огляд діючих обмежень швидкості у зв'язку з ризиком аварій на основі функції даної дороги, присутності вразливих користувачів дорогою, складу учасників руху, конструктивних особливостей дороги та придорожніх об'єктів на підприємствах. Інженерне вдосконалення мобільних платформ, подібне до систем запобігання зіткненням та обмежувачам швидкості. У країнах, де вони не прийняті, варто розглянути можливість запровадження обов'язкових обмежувачів швидкості [10].

Швидкості властиві багато позитивних рис, з яких найбільш очевидною є скорочення часу в дорозі та на цій основі підвищення мобільності. За минуле століття вдосконалення доріг, моторних засобів пересування та перевезень вантажу суттєво скоротили час поїздок та сприяли розвитку національної економіки, полегшили доступ до робочих місць, товарів та послуг, швидкості виробництва та поліпшення систем логістики на підприємствах та складах.

Занадто велика та неналежна швидкість – проблема №1 безпеки руху на багатьох виробництвах та підприємствах, яка часто проявляється у значній частці до третини аварій зі смертельним наслідком і є погіршуючим фактором у всіх аваріях. Висока швидкість, яка включає перевищення швидкості (тобто швидше встановлених обмежень швидкості) або неналежну швидкість (тобто занадто більшу для переважаючих умов, хоч і в межах встановленого обмеження), – небезпечна. Будучи однією з причин приблизно у третині аварій зі смертельними наслідками, швидкість є також фактором, що посилює тяжкість усіх зіткнень та аварій [10].

#### 1.4 Висновки за розділом

У цьому розділі було проведено аналіз інформації про вертикальні коливання колісних платформ та зроблені висновки. Розглянуті конструкції та види ресор та їх використання в залежності від транспорту. Проаналізовані інші автоматичні системи керування швидкості руху. Пропонуються різні критерії та різні їх допустимі значення, наприклад у якості критерію приймають амплітуду коливань, потужність коливань, третю похідну переміщення, прискорення тощо. Якщо оцінка ведеться по перенавантаженню, що впливають на вантаж, то питання вирішується однозначно – оцінку необхідно вести по прискоренням.

Незважаючи на те, що ресору багато хто вважає застарілим, він активно використовується на сьогоднішній день. Ресора – незмінна частина підвіски спорткарів, масивних позашляховиків, автомобілів, які здатні витримувати великі навантаження, колісних платформ на виробництвах та об'єктах промисловості.

## 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ ЇЇ КОЛИВАНЬ НА РЕСОРАХ

Для розробки системи автоматизованого управління рухом роботизованої платформи з урахуванням обмежень її коливань на ресорах буде використано математичну модель об'єкта автоматизації, запропоновано перетворення вимірювального сигналу для автоматизованої оцінки прискорення вертикальних коливань колісної платформи та будуть визначені параметри автоматичного регулятора швидкості для автоматизованого обмеження швидкості колісної платформи [7].

### 2.1 Математична модель вертикальних коливань на ресорах колісної платформи

Вертикальні коливання колісних платформ обумовлені нерівностями опорної поверхні (дороги, ґрунту тощо) по якій вона рухається [6].

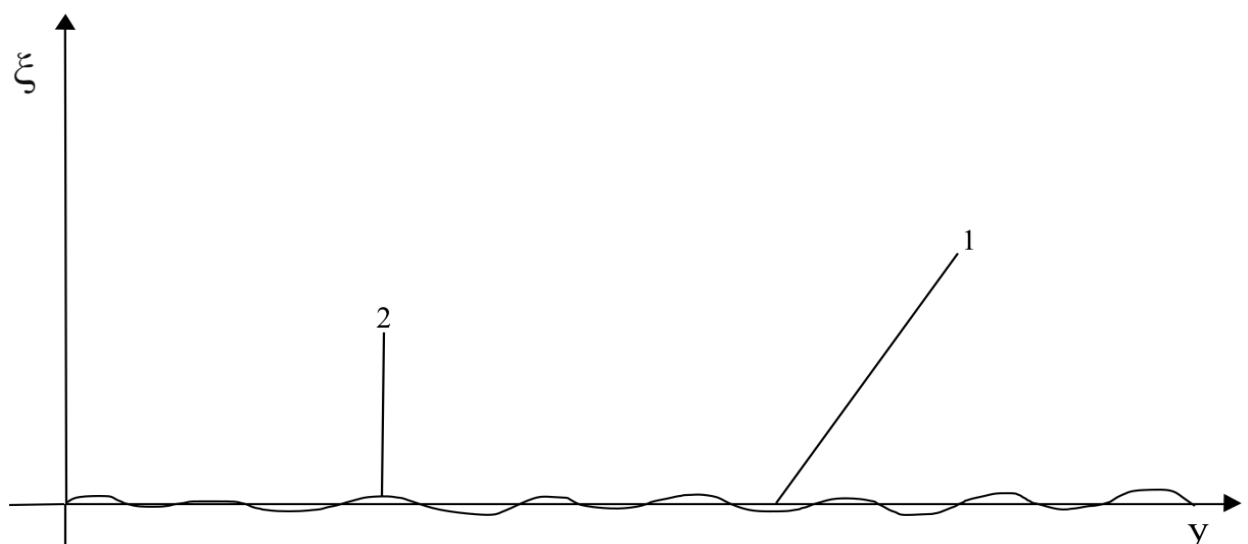


Рисунок 2.1 – Профіль опорної поверхні (дороги); 1 – Ідеальна опорна поверхня; 2 – Фактична опорна поверхня

Візьмемо значення  $\xi$ :

$$\xi = 0 \quad (2.1)$$

Фактична опорна поверхня:

$$\xi = \xi(y) \quad (2.2)$$

де  $\xi$  – відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку.

Нерівності опорної поверхні викликають коливання колісної платформи на ресорах [3].

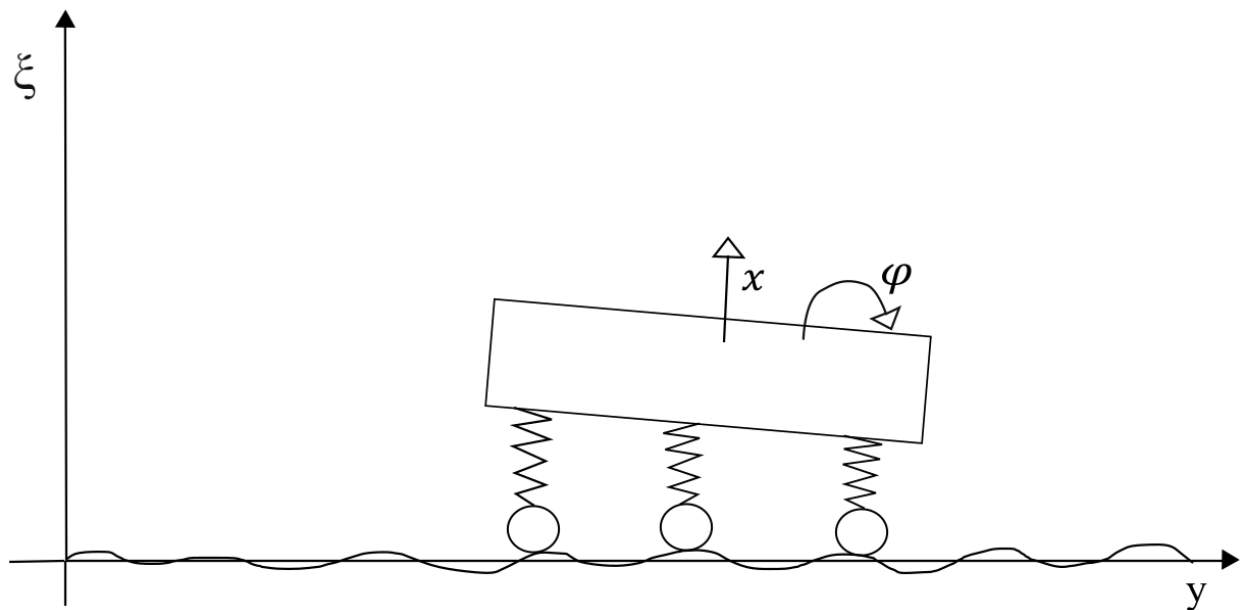


Рисунок 2.2 – Коливання колісної платформи на ресорах

Через нерівності опорної поверхні колісна платформа на ресорах під час руху починає рухатись у напрямку осі  $x$  і при цьому платформа повертається під кутом  $\varphi$ .

Виходячи з цього приймаємо:

$$x = x(t); \quad (2.3)$$

$$\varphi = \varphi(t); \quad (2.4)$$

де  $x$  – вертикальне відхилення колісної платформи від положення її рівноваги на ресорах;

$\varphi$  – кут нахилу колісної платформи відносно фактичної опорної поверхні;

$t$  – час.

Коливання колісної платформи на ресорах залежать від швидкості  $U_y$  її руху у горизонтальному напрямку. Об'єктом автоматизації є рух колісної платформи на ресорах [6].

Задача побудувати математичну модель вертикальних коливань колісної платформи на ресорах для проектування автоматизованої системи обмеження горизонтальної швидкості. Загальний підхід до побудови математичної моделі полягає у тому, що колісна платформа розглядається як механічна система на основі формалізму Лагранжа.

Стан механічної системи визначається узагальненими координатами:

$$q_k = q_k(t), \quad k = 1, 2, 3 \dots n; \quad (2.5)$$

де  $q_k$  – узагальнена координата;

$n$  – число степенів свободи механічної системи.

Відомо, що рівняння руху голономних механічних систем в узагальнених координатах записуються у виді рівнянні Лагранжу 2-го роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dq'_k} - \frac{dL}{dq_k} = -\frac{dR}{dq'_k} + Q_k, \quad k = 1, 2 \dots n; \quad (2.6)$$

де  $L$  – функція Лагранжу;

$R$  – дисипативна функція Реле;

$Q_k$  – узагальнена сила відповідна узагальненій координаті  $Q_k$ .

Функція Лагранжу  $L$  є різницю між дисипативною та потенціальною енергією систем:

$$L = T - n; \quad (2.7)$$

де  $T$  – дисипативна енергія системи;

$n$  – потенційна енергія системи.

Дисипативна функція Реле характеризує сили в'язкого опору та дорівнює потужності цих сил. Узагальненими силами звичайно характеризує сили що не є потенційними та дисипативними. Узагальнені сили визначають на основі обчислення віртуальної роботи системи:

$$\delta A = \sum_{k=1}^n Q_k \delta q_k; \quad (2.8)$$

де  $\delta A$  – Віртуальна робота системи (не потенційних та не дисипативних);

$\delta q_k$  – варіації узагальнених координат.

Формалізм Лагранжа полягає у тому, що для побудови рівняння руху механічної системи необхідно ввести узагальнені координати, записати вираз функції Лагранжа, функції Реле та узагальнених сил. Після цього диференціальне рівняння руху отримують за допомогою рівняння Лагранжу 2-го роду [11]. При розгляді вертикальних коливань колісної платформи обмежуємось розглядом тільки вертикальних поступальних рухів, що приводить до системи з одним ступенем свободи ( $n=1$ ) та узагальненої координати:

$$q = x; \quad (2.9)$$

Ресори узагальнено уявляємо у вигляді пружини з жорсткістю  $C$ , а гасителі коливань у вигляді в'язкого елемента з параметром  $b$  (Рис. 2.3) [5]. Саму платформу уявляємо в виді точкової маси  $m$  [3].

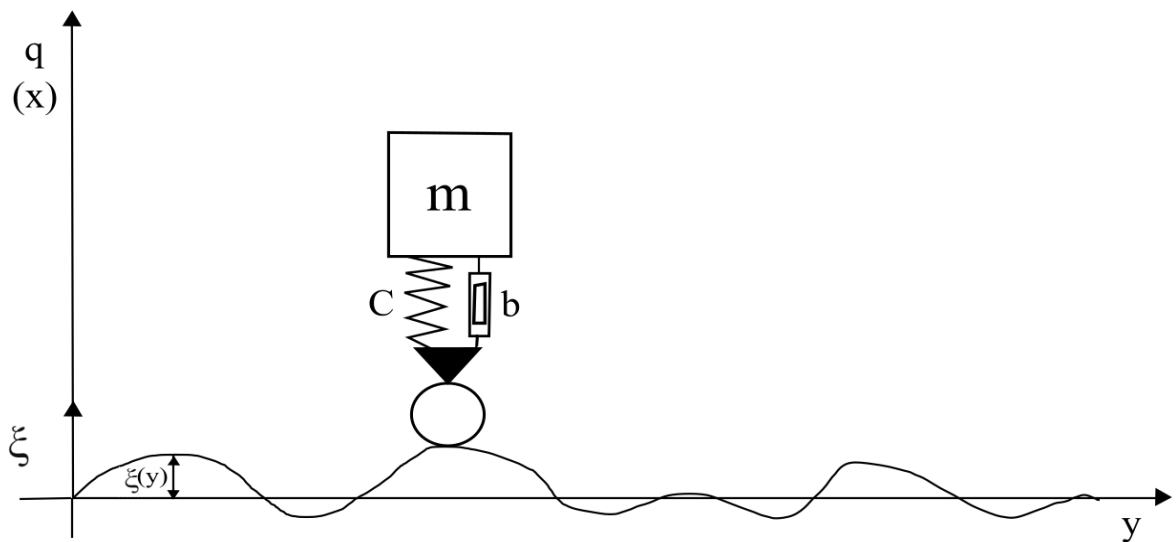


Рисунок 2.3 – Схематизація вертикальних коливань колісної платформи на ресорах

З врахуванням прийнятих припущень:

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{2}mq'^2 - \frac{1}{2}C(q - \xi)^2 ; \\ R &= \frac{1}{2}bq'^2 ; \\ Q &= 0 ; \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Розглянемо рівняння Лагранжа 2-го роду, яке буде використано для запису рівнянь руху механічних систем в узагальнених координатах:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dq'} - \frac{dL}{dq} = -\frac{dR}{dq'} + Q; \quad Q = 0; \quad (2.11)$$

Візьмемо похідні виразів (2.10), щоб підставити у рівняння (2.11) та отримати рівняння руху:

$$\frac{dL}{dq'} = mq' ; \quad \frac{dL}{dq} = -C(q - \xi) ; \quad \frac{dR}{dq'} = bq' ; \quad (2.12)$$

Далі записуємо рівняння руху, яке ми отримали після підставлення похідних (2.12) у рівняння (2.11):

$$mq'' + C(q - \xi) = -bq' ; \quad (2.13)$$

Перепишемо рівняння (2.13) в наступному зручному для подальшого розгляду виді:

$$mq'' + bq' + Cq = C\xi(y) ; \quad (2.14)$$

Ми отримали рівняння, яке визначає диференціальне рівняння руху. Ми маємо що  $y = y(t)$  внаслідок руху колісної платформи. Отже, виходить наступне:

$$y(t) = \int_0^t v_y(\tau) d\tau \Leftrightarrow \frac{dy}{dt} = v_y(t) ; \quad (2.15)$$

де  $v_y(t)$  – швидкість руху колісної платформи.

Математична модель колісної платформи має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} mq'' + bq' + Cq = C\xi(y) ; \\ y' = v ; \end{array} \right\} \quad (2.16)$$

При рішенні інженерних задач автоматизації використовують поняття про динамічні ланки. У даному випадку вхідним сигналом є швидкість  $V_y$ , а вихідним – координата  $q$  у вертикальній площині [3].



Рисунок 2.4 – Модель колісної платформи, як об’єкт автоматизації

Щоб отримати рівняння, що зв’язує  $V_y$  та  $q$ , використовуємо математичну модель руху колісної платформи (2.16). Беремо похідну, яка має наступний вигляд:

$$mq''' + bq'' + cq' = c \frac{d\xi}{dy} y'; \quad (2.17)$$

Таким чином, з цього рівняння ми отримуємо:

$$mq''' + bq'' + cq' = c \frac{d\xi}{dy} V_y; \quad (2.18)$$

Виходить рівняння третього порядку. Ми отримали математичну модель руху колісної платформи на ресорах (2.18). Початкові умови згідно з рівнянням (2.16) при  $t = 0$ , будуть мати наступний вигляд:

$$q(0) = 0; \quad q'(0) = 0; \quad q''(0) = \frac{c}{m} \xi(y(0)); \quad (2.19)$$

Введемо більш прийнятні позначення, що:

$$q = x; \quad V_y = U; \quad (2.20)$$

Модель колісної платформи (Рис. 2.4) тепер має наступний вигляд:



Рисунок 2.5 – Узагальнене уявлення математичної моделі

Підставимо змінені позначення (2.20) до рівняння (2.18), щоб отримати оновлену математичну модель руху колісної платформи, яку будемо використовувати для подальших розрахунків [3]:

$$a_3 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} = cf \left( \int U dt \right) U; \quad (2.21)$$

де  $a_3 = m$ ;  $a_2 = b$ ;  $a_1 = c$ ;  $f = \frac{d\xi}{dy}$ ;

При формулюванні початкових умов припускаємо, що:

$$\xi(y(0)) = 0; \quad (2.22)$$

Тоді початкові умови:

$$x(0) = 0; \quad \frac{dx}{dt}(0) = 0; \quad \frac{d^2 x}{dt^2}(0) = 0; \quad (2.23)$$

Після цієї операції математична модель вертикальних коливань колісної платформи на ресорах у рамках прийнятих припущень має вигляд (2.21) та

(2.23), у якому необхідно враховувати вид функції (2.2), яка визначає форму фактичної опорної поверхні.

## 2.2 Автоматизована оцінка прискорення при вертикальних коливаннях.

Прискорення корпусу мобільного робота при вертикальних коливаннях на ресорах визначається швидкістю руху та станом опорної поверхні (дороги, ґрунту тощо), що видно безпосередньо із диференціального рівняння (2.20).

Основна ідея полягає у обмеженні швидкості руху мобільного робота, щоб його вертикальні коливання на ресорах були достатньо малими, і саме ця ідея покладена в основу проектованої автоматизованої системи управління швидкістю руху [12]. Для реалізації такої ідеї вимагається автоматизоване вимірювання вертикальних коливань на ресорах рухомого робота, яке можна виконати за допомогою акселерометра. Звісно, що вихідним сигналом акселерометра буде не амплітуда вертикальних коливань, а їх прискорення, проте саме прискорення при вертикальних коливаннях створює дискомфорт для пасажирів та впливає на бортові системи мобільного робота. Також вертикальні коливання можуть негативно впливати на вантаж, особливо на горючі та вибухонебезпечні речовини, такі як ядерне паливо, балони з газом, нафту, бензин тощо. Треба також враховувати, що переміщення крихкого високотехнологічного обладнання за допомогою мобільної платформи треба здійснювати максимально обережно, тому треба забезпечити плавність руху.

Залежність часу експлуатації ресор від частоти вертикальних коливань неможливо переоцінити, бо при постійних вертикальних коливаннях з великою амплітудою довговічність мобільної платформи (електроавтомобіля, мобільного робота, вантажної колісної платформи) різко знижується [13]. Аби убезпечити вантаж та пасажирів необхідно автоматизувати керування прискоренням в залежності від частоти коливань на ресорах [15]. Це допоможе продовжити час експлуатації мобільної платформи та гарантувати безпеку людей, бо ці параметри також впливають на економічну цінність, яку може

відпрацювати мобільна платформа. Таким чином, оцінка прискорення при вертикальних коливаннях краще всього відповідає задачі обмеження вертикальних коливань при русі мобільного робота.

Для оцінки прискорення при вертикальних коливаннях на ресорах ми будемо використовувати інерційний акселерометр опору, встановлений на корпусі досліджуваної мобільної платформи. Вочевидь, маса  $m_a$  інерційного елемента акселерометра значно менше маси мобільного робота [16].

$$m_a \ll m; \quad (2.24)$$

де  $m_a$  – маса енергійного елемента акселерометра.

Внаслідок того, що нерівність (2.24) акселерометр майже не впливає на вертикальні коливання мобільного робота, але ці вертикальні коливання впливають на акселерометр [7]. Акселерометр є мехатронною системою математичну модель, якої ми отримаємо за допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду. Для цього використаємо функцію Лагранжа 2-го роду, функцію Реле наступного виду [3]:

$$\frac{1}{2}m_a(q'_a - x')^2 - \frac{1}{2}C_a q_a^2 - U_a q_e; R = \frac{1}{2}b_a q_a'^2 + \frac{1}{2}R_a q_e'^2; \quad (2.25)$$

де  $C_a$  – жорсткість пружного елемента акселерометру;

$b_a$  – параметр в'язкого елемента акселерометру;

$R_a$  – електричний опір вимірювального елемента акселерометра;

$q_a$  – зміщення енергійного елемента акселерометра;

$q_e$  – заряд електричного вимірювального ланцюгу акселерометра.

Рівняння Лагранжа 2-го роду для розглянутого акселерометра опору (рис. 2.6) має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dq'_a} - \frac{dL}{dq_a} = -\frac{dR}{dq'_a}; \quad \frac{d}{dt} \frac{dL}{dq'_e} - \frac{dL}{dq_e} = -\frac{dR}{dq'_e}; \quad (2.26)$$

З урахуванням виразів (2.25) за допомогою рівнянь Лагранжу 2-го роду ми отримаємо:

$$m_a(q''_a - x'') + C_a q_a = -b_a q'_a; \quad -U_a = -R_a q'_e; \quad (2.27)$$

Рівняння (2.27) після відповідних тотожних перетворень уявимо у вигляді:

$$m_a q''_a + b_a q'_a + C_a q_a = m_a x''; \quad q'_e = \frac{U_a}{R_a}; \quad (2.28)$$

Для визначення вихідного сигналу акселерометра використовуємо відношення (2.29) (рис. 2.6):

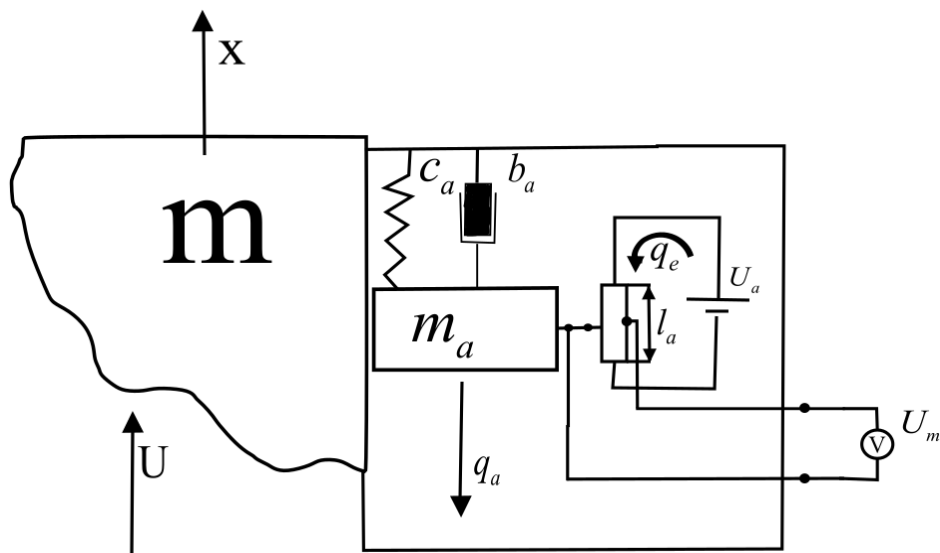


Рисунок 2.6 – Вимірвальний елемент акселерометра

$$U_m = R(q_a) q'_e; \quad (2.29)$$

де  $R(q_a)$  – опір, обмежений між поточним положенням рухомого контакту з'єднаного з інерційним елементом.

Опір, обмежений положенням рухомого контакту:

$$R = \frac{R_a}{l_a} l(q_a); \quad (2.30)$$

де  $l(q_a)$  – довжина вимірювального елемента обмежена положенням рухомого контакту.

Очевидно (рис. 2.6), що:

$$l(q_a) = q_a; \quad (2.31)$$

Тому, за допомогою виразів (2.29) – (2.31) отримаємо вихідний сигнал акселерометру та можемо зробити наступні перетворення:

$$U_m = q'_e \frac{R_a}{l_a} q_a; \quad (2.32)$$

З урахуванням відношення (2.32) та рівнянь (2.28) отримуємо математичну модель акселерометру (рис. 2.5 та рис 2.6) у вигляді:

$$m_a q_a'' + b_a q_a'' + C_a q_a = m x''; \quad (2.33)$$

$$U_m = \frac{U_a}{l_a} q_a; \quad (2.34)$$

Ці два відношення (2.33) та (2.34) визначають математичну модель акселерометру [3]. Акселерометр можна представити у вигляді лінійної динамічної ланки (рис. 2.7) з передаточною функцією:

$$W_a(S) = \frac{U_a m_a S^2}{l_a (m_a S^2 + b_a S + C_a)}; \quad (2.35)$$

Ми отримали кінцеву математичну модель акселерометра (2.35) [3].

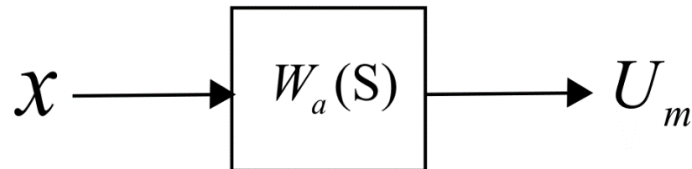


Рисунок 2.7 – Акселерометр у вигляді лінійної динамічної ланки

### 2.3 Автоматизоване обмеження швидкості колісної платформи

Принципова ідея автоматизованого обмеження швидкості колісної платформи полягає у регулюванні швидкості платформи з урахуванням обмеження прискорення вертикальних коливань (рис. 2.8).

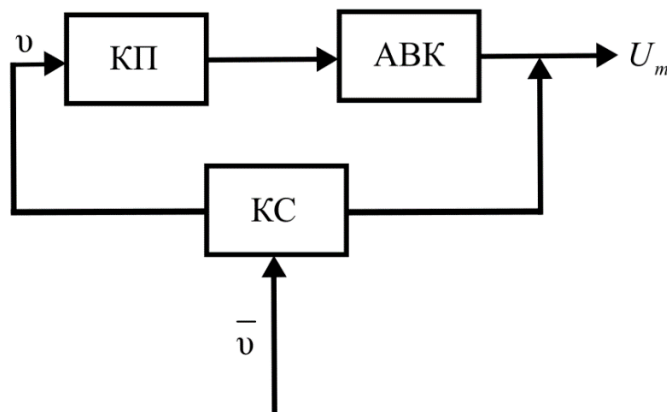


Рисунок 2.8 – Принципова схема автоматизованого обмеження швидкості

Для визначення параметрів регулятора швидкості використаємо отримані раніше математичні моделі вертикальних коливань колісної платформи та акселерометру для вимірювання їх прискорення. Відхилення

профіля опорної поверхні (дороги, ґрунту) від умовно нульової горизонтальної площини приймаємо у вигляді синусоїди (рис. 2.9):

$$\xi(y) = \xi_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L} y\right); \quad (2.36)$$

де  $\xi_0$  – максимальне відхилення, а  $L$  – це характерна відстань між максимальними відхиленнями [3].

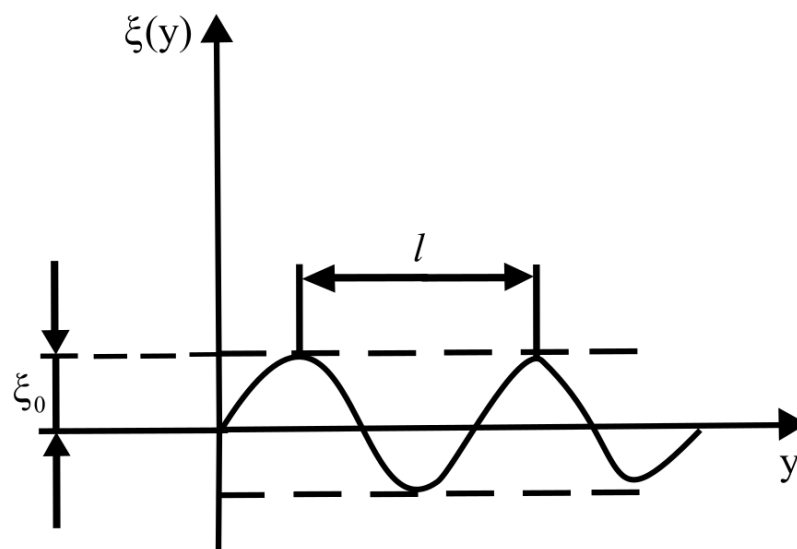


Рисунок 2.9 – Апроксимація нерівностей дороги

З врахуванням відношення (2.36) введена у диференціальному рівнянні (2.21) функція  $f(y)$  буде мати наступний вигляд:

$$f(y) = \xi_0 \frac{2\pi}{l} \cos\left(\frac{2\pi}{l} y\right); \quad (2.37)$$

Тоді з врахуванням відношення (2.37) диференційне рівняння (2.21) набуде вигляду [3]:

$$a_3 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} = C \xi_0 \frac{2\pi}{l} \cos\left(\frac{2\pi y}{l}\right) U; \quad (2.38)$$

Рівняння (2.38) нелінійне по управлінню  $U$ , оскільки  $y = \int U dt$ . Для лініалізації управління (2.38) приймемо:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{l} y\right) \approx 1; \quad (2.39)$$

З врахуванням відношення (2.39) диференціальне рівняння (2.38) буде записано у вигляді:

$$a_3 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} = C \xi_0 \frac{2\pi}{l} U; \quad (2.40)$$

Передаточна функція відповідна рівнянню (2.40) має вигляд:

$$W_{кп}(S) = \frac{C \xi_0}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S}; \quad (2.41)$$

З врахуванням виразу (2.41) та (2.35) отримаємо лініалізовану математичну модель колісної платформи, як об'єкту автоматизації у вигляді двох послідовно з'єднаних лінійних динамічних ланок (рис. 2.10).

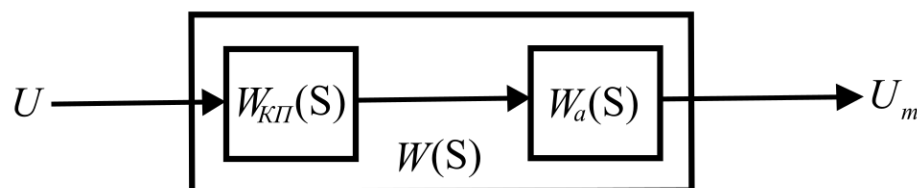


Рисунок 2.10 – Лініалізована модель вертикальних коливань колісної платформи з акселерометром для вимірювання їх прискорень

Введемо нові позначення:

$$u = v_y; \quad x = U_m; \quad (2.42)$$

Тоді з врахуванням (2.41) та (2.35) (рис. 2.10) передаточна функція колісної платформи, як об'єкту автоматизації буде мати наступний вигляд:

$$W(S) = W_{кп}(S) \cdot W_a(S); \quad (2.43)$$

Підставляючи у (2.43) вирази (2.41) та (2.35) отримаємо:

$$W(S) = \frac{C_{\xi_0} \frac{2\pi}{l} \left(\frac{U_a m_a}{l_a}\right) S^2}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S} \frac{1}{m_a S^2 + b_a S + C_a}; \quad (2.44)$$

Щоб привести передаточну функцію до більш зручного вигляду, вирахуємо:

$$\begin{aligned} & (a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S)(m_a S^2 + b_a S + C_a) = \\ & = a_3 m_a S^5 + a_3 b_a S^4 + a_3 C_a S^3 + a_2 m_a S^4 + a_2 b_a S^3 + a_2 C_a S^2 + a_1 m_a S^3 + a_1 b_a S^2 + a_1 C_a S = \\ & = a_3 m_a S^5 + (a_3 b_a + a_2 m_a) S^4 + (a_3 C_a + a_2 b_a + a_1 m_a) S^3 + (a_2 C_a + a_1 b_a) S^2 + a_1 C_a S; \\ & a_5 = m m_a; \quad a_4 = m b_a + b m_a; \quad a_3 = (m C_a + b b_a + C m_a) b_2 a_{\text{д}}; \\ & a_2 = (b C_a + b C_a) b_2 a_{\text{п}}; \quad a_1 = C C_a b_2 a_{\pm}; \quad b_2 = C_{\xi_0} \frac{2\pi}{l} \frac{U_a m_a}{l_a}; \end{aligned} \quad (2.45)$$

Тоді передаточна функція з врахуванням позначень (2.45), передаточна функція (2.44) набуде вигляду:

$$W(S) = \frac{b_2 S^2}{a_5 S^5 + a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S}; \quad (2.46)$$

Виконаємо скорочення:

$$W(S) = \frac{b_2 S}{a_5 S^4 + a_4 S^3 + a_3 S^2 + a_2 S + a_1}; \quad (2.47)$$

По передаточній функції (2.47) відновимо диференційне рівняння:

$$a_5 \frac{d^4 x}{dt^4} + a_4 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_3 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} + a_1 x = b_2 \frac{dU}{dt}; \quad (2.48)$$

Введемо ПД – регулятор швидкості:

$$U = U_0 - a_{\Pi} x - a_{\pm} \int x dt - a_{\mathcal{D}} \frac{dx}{dt}; \quad (2.49)$$

де  $U_0$  – бажана швидкість,  $a_{\Pi}$ ,  $a_{\pm}$ ,  $a_{\mathcal{D}}$  – параметри ПД-регулятора швидкості.

Підставимо (2.49) у (2.48):

$$a_5 \frac{d^4 x}{dt^4} + a_4 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_3 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_2 \frac{dx}{dt} + a_1 x = -b_2 (a_{\Pi} \frac{dx}{dt} + a_{\pm} x + a_{\mathcal{D}} \frac{d^2 x}{dt^2}); \quad (2.50)$$

Наведено складені у отриманому виразі та уявимо його у виді:

$$a_5 \frac{d^4 x}{dt^4} + a_4 \frac{d^3 x}{dt^3} + (a_3 + b_2 a_{\mathcal{D}}) \frac{d^2 x}{dt^2} + (a_2 + b_2 a_{\Pi}) \frac{dx}{dt} + (a_1 + b_2 a_{\pm}) x = 0; \quad (2.51)$$

Таким чином математична модель вертикальних коливань колісної платформи з ПД-регулятором швидкості має вигляд (2.51) [15]. Диференційному рівнянню (2.51) відповідає характеристичне рівняння наступного виду:

$$a_5 \lambda^4 + a_4 \lambda^3 + (a_3 + b_2 a_{\mathcal{D}}) \lambda^2 + (a_2 + b_2 a_{\Pi}) \lambda + (a_1 + b_2 a_{\pm}) = 0; \quad (2.52)$$

де  $\lambda$  – корінь характеристичного рівняння.

Параметри ПД-регулятора визначимо з умови стійкості коренів характеристичного рівняння (2.52). Для цього використаємо критерій Рауса, відповідно якому представимо вираз (2.52) у вигляді:

$$A_0\lambda^4 + B_0\lambda^3 + A_1\lambda^2 + B_1\lambda + A_2 = 0; \quad (2.53)$$

де  $A_0 = a_5$ ;  $B_0 = a_4$ ;  $A_1 = a_3b_2a_D$ ;  $B_1 = a_2b_2a_{II}$ ;  $A_2 = a_1b_2a_{\pm}$ .

Для рівняння (2.53) розглянемо схему Рауса:

$$\begin{array}{ccc} A_0 & A_1 & A_2 \\ B_0 & B_1 & 0 \\ C_0 & C_1 & \\ D_0 & & \end{array} \quad (2.54)$$

де  $C_0 = \frac{B_0A_1 - A_0B_1}{B_0}$ ;  $C_1 = \frac{B_0A_2 - A_0 \cdot 0}{B_0}$ ;  $D_0 = \frac{C_0B_1 - B_0C_1}{C_0}$ ;

Відповідно критерію Рауса поліном (2.53) буде стійким, якщо усі елементи першого стовпа схеми Рауса (2.54) мають однаковий знак. Таким чином для визначення параметрів автоматичного регулятора маємо нерівність:

$$A_0 > 0; B_0 > 0; C_0 > 0; D_0 > 0; \quad (2.55)$$

$$A_0 < 0; B_0 < 0; C_0 < 0; D_0 < 0; \quad (2.56)$$

Вибір умов (2.55) або (2.56) визначається у процесі рішення задач з врахуванням її сенсу та умов безперечливості результатів їх сенсу. Далі використаємо умови (2.55) оскільки умова (2.54) виходить елементарною заміни знаку операції відношення [4]:

$$a_5 > 0; a_4 > 0; \frac{a_4 a_3 - a_5 a_2}{a_4} > 0; \frac{\frac{a_4 a_3 b_2 a_{Д} - a_5 a_2 b_2 a_{П}}{a_4} a_2 b_2 a_{П} - a_5 a_1 b_2 a_{\pm}}{a_4 a_5 - a_5 a_2 b_2 a_{П}}} > 0; \quad (2.57)$$

З врахуванням виразів (2.45) та умов (2.57) підставимо:

$$\frac{\frac{(mb_a + bm_a)(mC_a + bb_a + Cm_a)b_2 a_{Д} - mm_a(bC_a + bC_a)b_2 a_{П}}{mb_a + bm_a} (bC_a + bC_a)b_2 a_{П} - mm_a C C_a b_2 a_{\pm}}{\frac{(mb_a + bm_a)mm_a - mm_a(bC_a + bC_a)b_2 a_{П}}{mb_a + bm_a}} > 0; \quad (2.58)$$

Таким чином ми отримали математичну модель умов для параметрів акселерометру (2.57).

#### 2.4 Висновки за розділом

У цьому розділі була розроблена математична модель вертикальних коливань колісної платформи. Досліджена та проаналізована автоматизована оцінка прискорення при вертикальних коливаннях. Розроблена математична модель ПД-регулятора та проаналізовані його параметри. Відповідно критерію Рауса визначили, що поліном є стійким. Для визначення параметрів регулятора швидкості використали отримані раніше математичні моделі вертикальних коливань колісної платформи та акселерометру для вимірювання їх прискорення. Ми отримали математичну модель умов для параметрів акселерометру для подальшого комп'ютерного моделювання вертикальних коливань колісної платформи на ресорах.

## **3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ТА ПРОЦЕСІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ КОЛІСНИХ ПЛАТФОРМ**

Перед нами стоять непрості задачі, тому ми будемо використовувати саме комп'ютерне моделювання для рішення поставлених задач. У цьому розділі ми будемо використовувати комп'ютерну систему Scilab та системи графічного моделювання Xcos для моделювання вертикальних коливань та процесів автоматизованого управління рухом колісної платформи.

### **3.1 Компютерна система Scilab.**

Scilab – пакет наукових програм для чисельних обчислень, що надає потужне відкрите середовище для інженерних і наукових розрахунків. Середовище комп'ютерної математики Scilab надає схожу на Matlab мову і набір функцій для математичних, інженерних і наукових розрахунків. Пакет підходить для професійного застосування і використання у вишах, надаючи інструменти для різноманітних обчислень. Scilab випущено як відкритий вихідний код під ліцензією GPL і доступний для безкоштовного завантаження. Scilab доступний у GNU/Linux, Mac OS X і Windows XP/Vista/7/8/10 [19].

Scilab містить сотні математичних функцій. Він має мову програмування високого рівня, що дозволяє отримати доступ до розширених структур даних, 2-D і 3-D графічних функцій.

Scilab містить велику кількість функцій:

– Математика та моделювання.

Для звичайних інженерних і наукових застосувань, включаючи математичні операції та аналіз даних.

– 2-D і 3-D візуалізація.

Функції графіки для візуалізації, анотації та експорту даних, а також багато способів створення та налаштування різних типів графіків і діаграм.

– Оптимізація.

Алгоритми розв’язування задач неперервної та дискретної оптимізації з обмеженнями та без обмежень.

– Статистика.

Інструменти для аналізу та моделювання даних.

– Системи управління.

Стандартні алгоритми та засоби дослідження системи керування.

– Обробка сигналів.

Візуалізуйте, аналізуйте та фільтруйте сигнали в часовій і частотній областях.

– Розробка додатків.

Розширюйте власні функції Scilab і керуйте обміном даними за допомогою зовнішніх інструментів.

– Xcos – Моделювання динамічних систем.

Моделювання механічних систем, гідравлічних схем, систем керування.

Завдяки своїй здатності взаємодіяти зі сторонніми технологіями та додатками, Scilab також може діяти як унікальна платформа для об’єднання кодів, написаних різними мовами програмування, в одній уніфікованій мові, таким чином полегшуючи їх розповсюдження, резервне копіювання та використання.

Історія програмного забезпечення Scilab починається у 80-х роках, коли Blaise, програмне забезпечення CACSD (Computer Aided Control System Design), створене в IRIA (Французький інститут досліджень комп’ютерних наук і управління) і розроблене в основному Франсуа Делебеком і Сержем Стером з метою забезпечення інструмент автоматичного керування для дослідників. Його надихнуло програмне забезпечення Matlab Fortran, розроблене Клівом Молером, який пізніше разом із Джоном Літтлом заснував компанію «The MathWorks» [19].

У 1984 році Блейз став Базілем і протягом кількох років розповсюджувався Simulog, першим стартапом Inria (Французький

національний інститут досліджень комп'ютерних наук і управління). На початку 90-х компанія Simulog припинила розповсюдження Basile. Назва програмного забезпечення стала Scilab і була розроблена Inria в рамках Scilab Group, що складається з шести таких дослідників: Жан-Філіп Шансельє з ENPC (École Nationale des Ponts et Chaussées), Франсуа Делебек, Клод Гомес, Моріс Гурса, Рамін Нікуха та Сердж Стір з Inria [19].

Після п'яти років версій Scilab, створених Scilab Enterprises, операційна команда приєднується до ESI Group шляхом придбання компанії.

ESI Group є піонером і провідним світовим постачальником віртуального прототипування, що використовує фізику матеріалів. Команда залишається відданою вільному програмному забезпеченню Scilab з відкритим кодом для чисельних обчислень. Завдяки досвіду OpenFOAM ESI Group вже продемонструвала свою прихильність програмному забезпеченню з відкритим кодом для інженерів і науковців.

Мова програмування Scilab належить мов високого рівня, що інтерпретуються, надаючи користувачеві можливість безпосередньо маніпулювати математичними конструкціями, такими як матриці або поліноми. Тим самим досягається велика швидкість і простота написання програм. Мова Scilab допускає розширення за допомогою визначення призначених для користувача типів даних [19]. При цьому стандартним операціям, наприклад, арифметичним операторам або операторам порівняння, можливо надати особливий сенс стосовно призначених для користувача типів даних.

Користувачі пакету можуть розробляти власні модулі розширення для вирішення конкретних завдань. Можливий також виклик з Scilab функцій, реалізованих на інших мовах програмування, зокрема Fortran або C, завдяки чому сторонні бібліотеки можуть бути використані, начебто вони були частиною вбудованих коштів пакету. Scilab також надає можливості для взаємодії з програмним комплексом LabVIEW компанії National Instruments,

призначеним для візуального проектування вимірювальних систем, а також збору і аналізу експериментальних даних [19].

Моделювання і симуляція динамічних систем у дискретних і неперервних часових областях виконується за допомогою інструменту Xcos.

Xcos – графічний редактор для проектування моделей гібридних динамічних систем. Моделі можна проектувати, завантажувати, зберігати, компілювати та симулювати. Ергономічне та ефективне рішення для промислових і академічних потреб Xcos надає функціональні можливості для моделювання механічних систем (автомобілебудування, аеронавтика), гідравлічних схем (моделювання дамб, труб), систем керування тощо. Xcos є у вільному доступі та розповсюджується разом із Scilab.

Спочатку Scilab і Xcos розглядалися як інструменти для проектування та аналізу системи керування. Його використовували в багатьох інших сферах, але він залишається інструментом, призначеним для контролю потреб. Таким чином, можна створити свою стратегію керування, імітуючи свою систему у відкритому та закритому циклі. Ось чудовий приклад простої фізичної системи, яка регулюється ПІД-регулятором [19]:

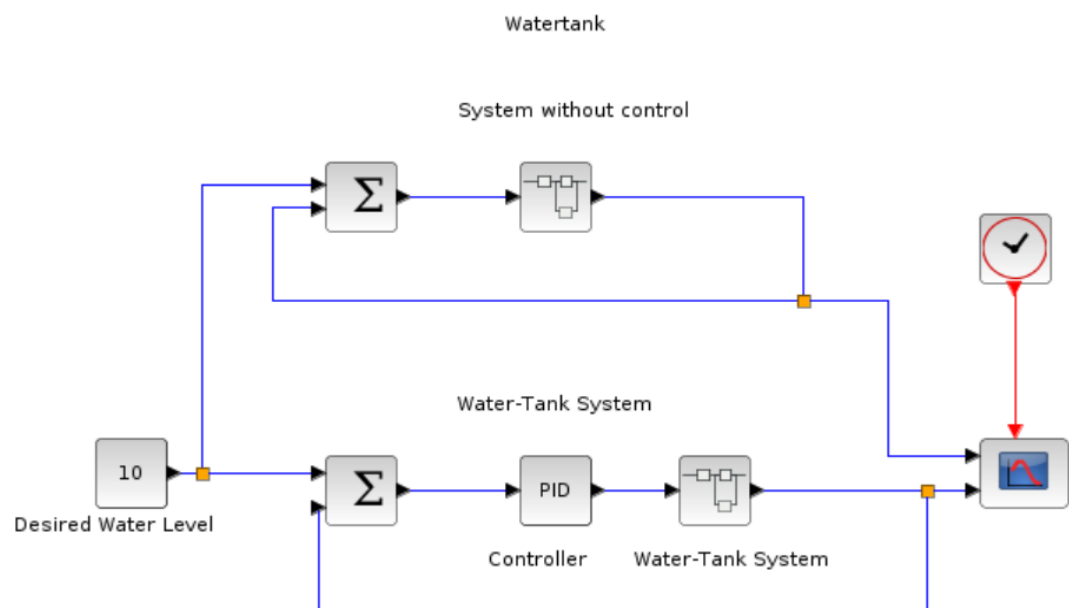


Рисунок 3.1 – Фізична система, яка регулюється ПІД-регулятором

### 3.2 Вертикальні коливання колісної платформи на ресорах

Для апроксимації відхилень опорної поверхні (дороги, ґрунту, тощо) використовуємо відношення (2.36), яке приводить до диференційного рівняння (2.38) [3]:

$$a_3 \frac{d^3 x}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} = C \xi_0 \frac{2\pi}{l} \cos\left(\frac{2\pi y}{l}\right) U; \quad (3.1)$$

Врахуємо, що координата  $y$  зв'язана з швидкістю  $U$ :

$$y = \int U dt; \quad (3.2)$$

Прийmemo такі початкові умови:

$$x(0) = 0; \quad \frac{dx}{dt}(0) = 0; \quad \frac{d^2 x}{dt^2}(0) = 0; \quad y(0) = 0; \quad (3.3)$$

Це ті початкові умови з якими ми будемо розглядати наше диференційне рівняння. Зараз важливо повторити значення змінних  $a_1$ ,  $a_2$  та  $a_3$ :

$$a_1 = C; \quad a_2 = b; \quad a_3 = m; \quad (3.4)$$

Прийmemo числові данні:

$$m = 1000 \text{ кг}; \quad b = 10^4 \text{ кг/с}; \quad C = 10^6 \text{ Н/м}; \quad \xi_0 = 0,05 \text{ м}; \quad l = 1,5 \text{ м}; \quad U = 20 \text{ км/год}; \quad (3.5)$$

Для комп'ютерного моделювання ми використовуємо поняття про передаточні функції:

$$W(S) = \frac{1}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S}; \quad (3.6)$$

Тепер ми повинні записати початкові дані у Scilab Xcos для початку модулювання.

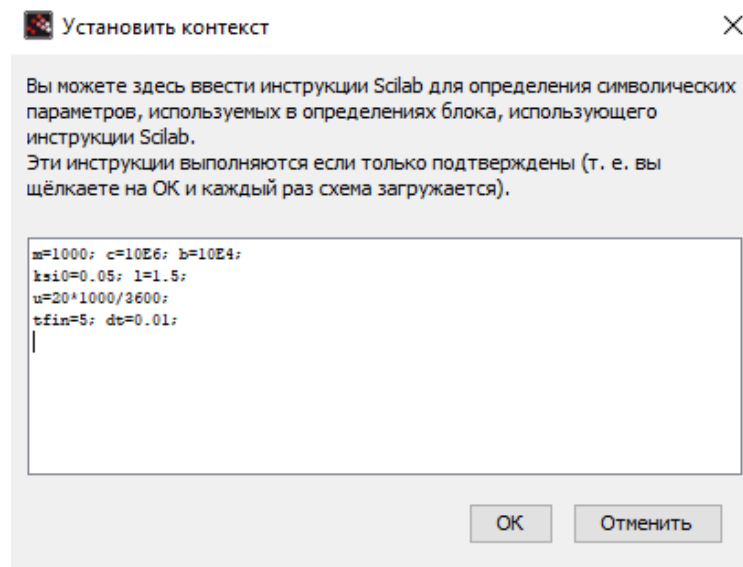


Рисунок 3.2 – Введення початкових даних до системи моделювання Xcos

Створюємо комп'ютерну модель вертикальних коливань. Додаємо блок з нашою передаточною функцією (3.5).

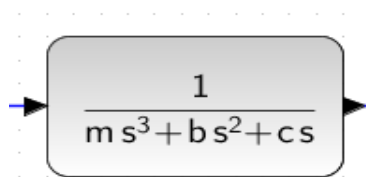


Рис. 3.3 – Блок передаточної функції

Додаємо до моделі константу  $U$  та інтеграл від  $U$ , щоб отримати  $y$ . Та пропускаємо наші значення через функцію диференційного рівняння (2.38). Додаємо блок CSCOPЕ для побудови графіку коливань колісної платформи

на ресорах та в результаті отримуємо комп'ютерну модель наступного виду (Рис. 3.4).

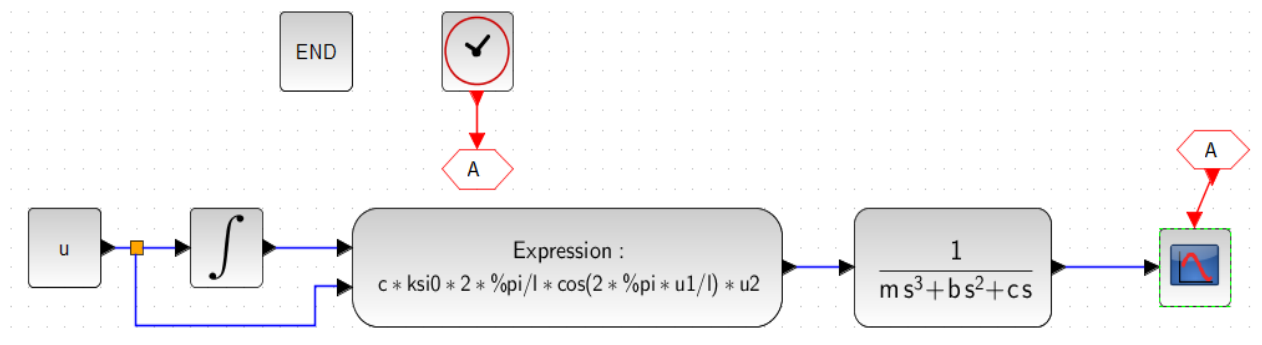


Рисунок 3.4 – Комп'ютерна модель вертикальних коливань колісної платформи на ресорах

При запуску комп'ютерної моделі отримуємо графік вертикальних коливань колісної платформи на ресорах з початковими даними (3.5).

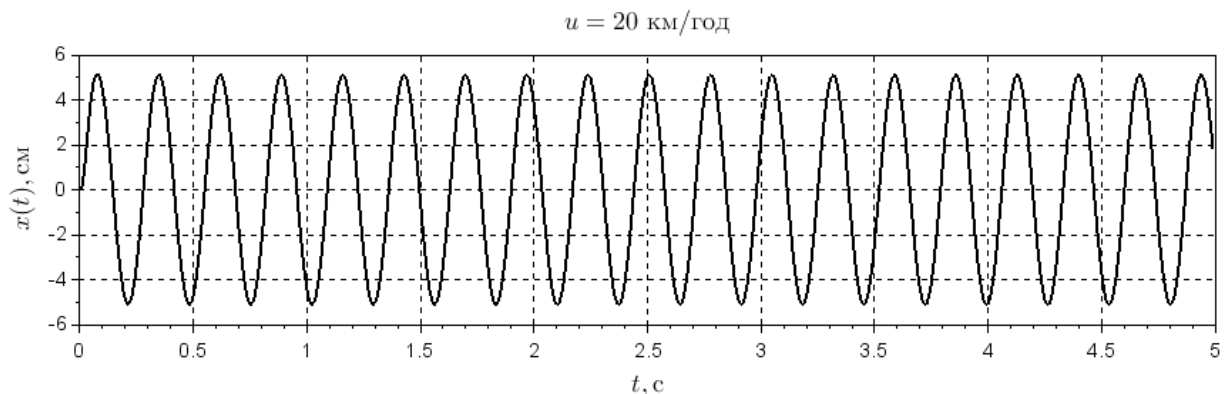


Рисунок 3.5 – Графік вертикальних коливань колісної платформи на ресорах

Для наступних дослідів залежності вертикальних коливань колісної платформи на ресорах від змінення параметрів ми повинні відкрити текстовий редактор SciNotes, який дозволяє виконувати команди та симулювати коливання колісної платформи на ресорах, щоб проводити дослід залежності вертикальних коливань від параметрів колісної платформи. Підключаємо нашу комп'ютерну модель (3.4) до SciNotes та функцію FormatCharts [17].

Функція FormatCharts автоматично форматує графіки. Також підключаємо наші первинні данні (рис. 3.2) наступним чином (рис. 3.6).

```
Task_1A.sce (C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Маг\SiLab\CompSilab\Task_1A.sce) - SciNotes
Task_1A.sce
1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Маг\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Маг\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce', -1)
```

Рисунок 3.6 – Підключення комп'ютерної моделі до SciNotes

Також нам треба замінити блок комп'ютерної моделі CSCOPE на блок To workspace, щоб передати значення моделі. Оновлена версія комп'ютерної моделі має наступний вигляд (рис. 3.7).

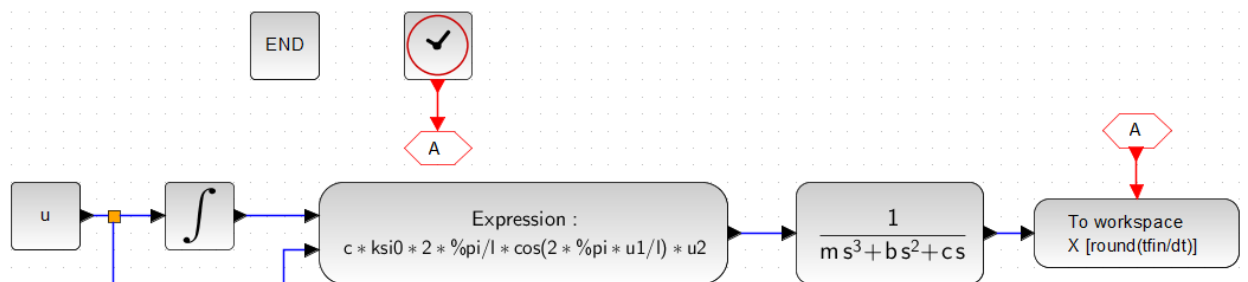


Рисунок 3.7 – Комп'ютерна модель вертикальних коливань колісної платформи підключена до SciNotes

Нам важливо знати які параметри впливають на коливання колісної платформи, щоб розуміти яким чином ми зможемо забезпечити плавність руху. Тому ми написали програму в SciNotes для побудови двох графіків залежності амплітуди вертикальних коливань від швидкості колісної платформи, щоб дізнатися вплив швидкості на частоту та амплітуду вертикальних коливань (рис. 3.8).

```

Task_1A.sce
1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом·Mar\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом·Mar\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.u=5/3.6;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{см}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.u=20/3.6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{см}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.8 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від швидкості у системі Xcos

Ми отримуємо два графіки (рис. 3.9) на яких можемо побачити, що амплітуда коливань колісної платформи майже не залежить від швидкості, але збільшується частота коливань.

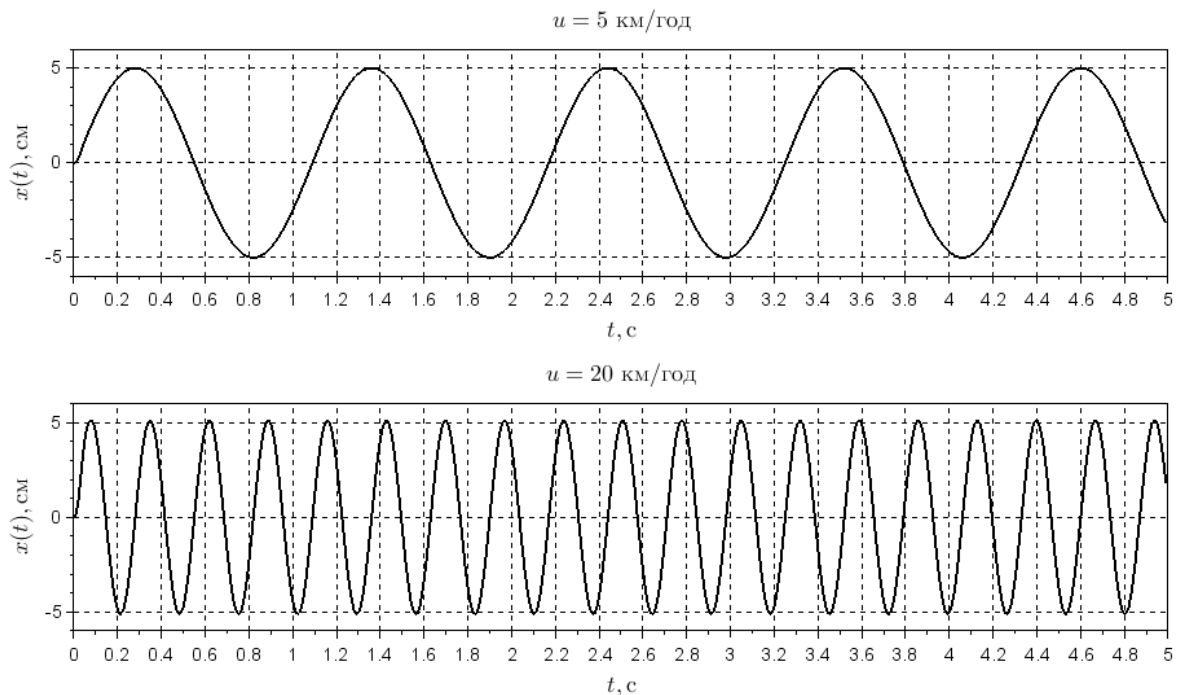


Рисунок 3.9 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від швидкості у системі Xcos

Згідно графікам (рис. 3.9) можемо зрозуміти, що ми можемо розвивати велику швидкість колісної платформи, бо цей параметр незначно впливає на амплітуду коливань.

Зараз ми розглянемо вплив зміни відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку на амплітуду коливань колісної платформи. Треба змінити код програми наступним чином (рис. 3.10).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом-Мар\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом-Мар\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.ksi0=0.05;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+"\mathrm{cm}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$x(t), \mathrm{cm}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.ksi0=0.1;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+"\mathrm{cm}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$x(t), \mathrm{cm}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.10 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку у системі Xcos

При побудові графіків (3.11) можна побачити, що амплітуда вертикальних коливань пропорційно залежить від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку. Таким чином ресора відтворює нерівності опорної поверхні. На відміну від швидкості, відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку впливає на амплітуду коливань набагато більша [18]. Не має впливу на частоту коливань колісної платформи.

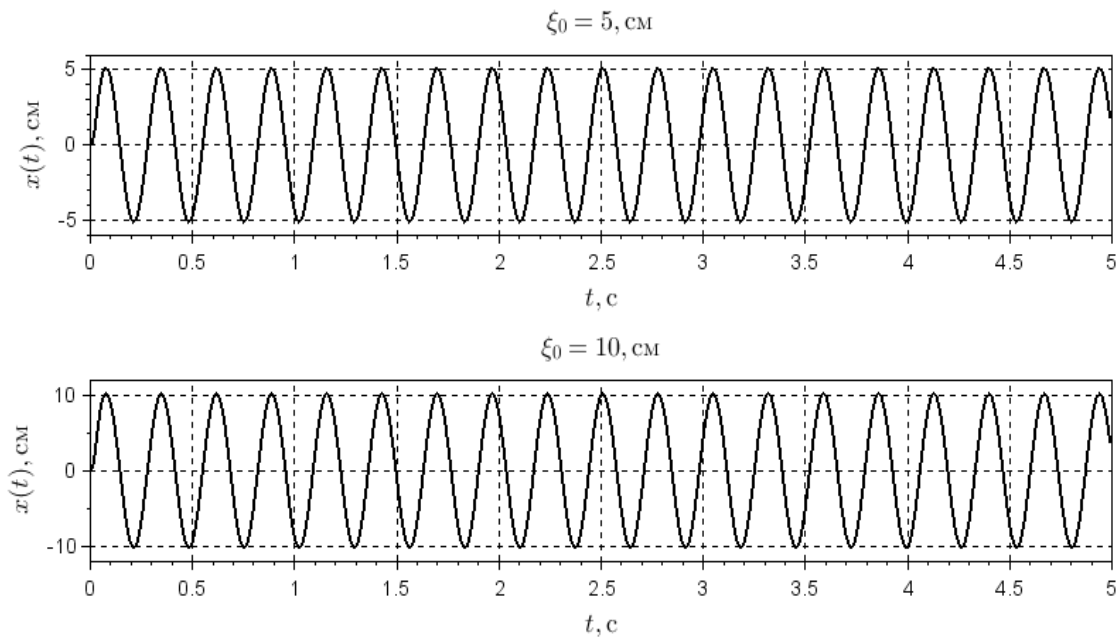


Рисунок 3.11 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку у системі Xcos

Далі проведемо дослідження залежності вертикальних коливань колісної платформи від довжини опорної поверхні. Для цього змінюємо код програми наступним чином (рис. 3.12).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.l=0.1;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$l="+string(Context.l)+"", \mathrm{m}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{cm}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.l=10;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$l="+string(Context.l)+"", \mathrm{m}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{cm}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.12 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від довжини опорної поверхні у системі Xcos

На графіках (3.13) ми бачимо, що довжина опорної поверхні має вплив на амплітуду та частоту вертикальних коливань колісної платформи на ресорах. Якщо ми зменшимо довжину опорної поверхні, амплітуда коливань теж зменшиться, але значно збільшиться частота вертикальних коливань. В даному випадку не так важлива амплітуда коливань, як їх частота. Збільшення частоти коливань негативно вплине на пасажирів або вантаж та значно прискорить знос ресор та колісної платформи в цілому, бо коливання впливають на всю колісну платформу [17]. В такому випадку більш плавний рух буде на другому графіку при довжині опорної поверхні  $l = 10$ , м.

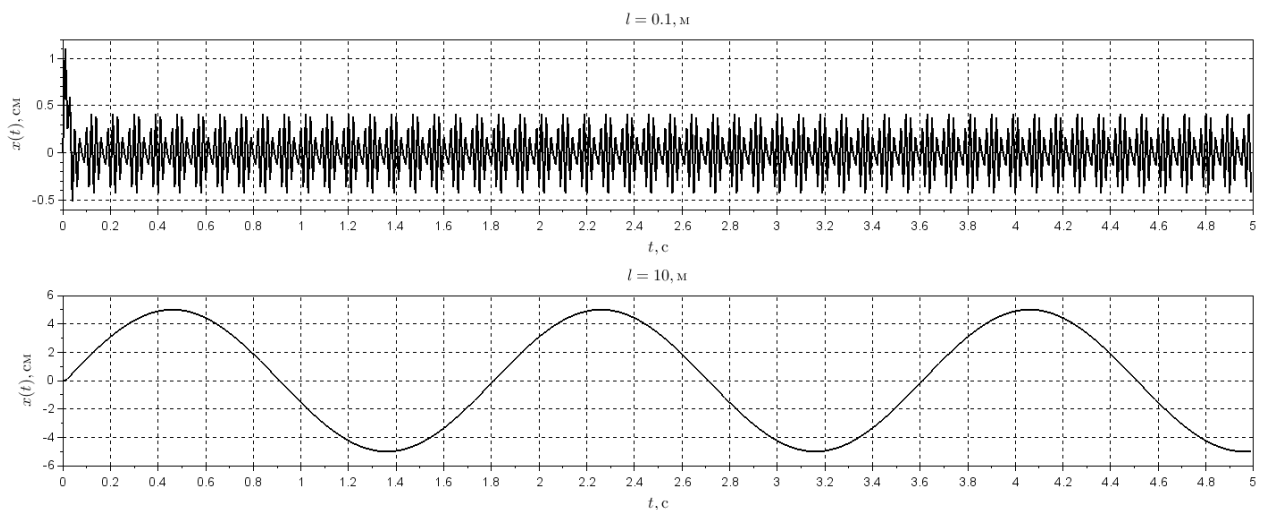


Рисунок 3.13 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від відхилення опорної поверхні від довжини опорної поверхні у системі Xcos

У наступному дослідженні ми визначимо залежність частоти та амплітуди вертикальних коливань колісної платформи на ресорах від маси колісної платформи [3]. Це важливий дослід, то це може показати яке навантаження можна давати на колісну платформу (Вага вантажів, кількість пасажирів, тощо), щоб вертикальні коливання незначно впливали на допустиму швидкість колісної платформи. Для цього ми змінюємо код програми наступним чином (рис. 3.14).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом·Мар\SiLab\CompSilab/Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом·Мар\SiLab\CompSilab/FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.m=1000;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$m="+string(Context.m)+"\·\mathrm{кг}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{см}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.m=5000;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$m="+string(Context.m)+"\·\mathrm{кг}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{см}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.14 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань на ресорах від маси колісної платформи у системі Xcos

За отриманими графіками (3.15) можна побачити, що маса колісної платформи на ресорах майже не впливає на амплітуду та зовсім не змінює частоту вертикальних коливань. Таким чином можливо зробити висновок, що зміна маси майже не буде впливати на оптимальну швидкість руху колісної платформи на ресорах. Обмеження маси колісної платформи залежить в цілому від жорсткості ресор та міцності матеріалів, щоб витримати навантаження. Маса не впливає на частоту вертикальних коливань.

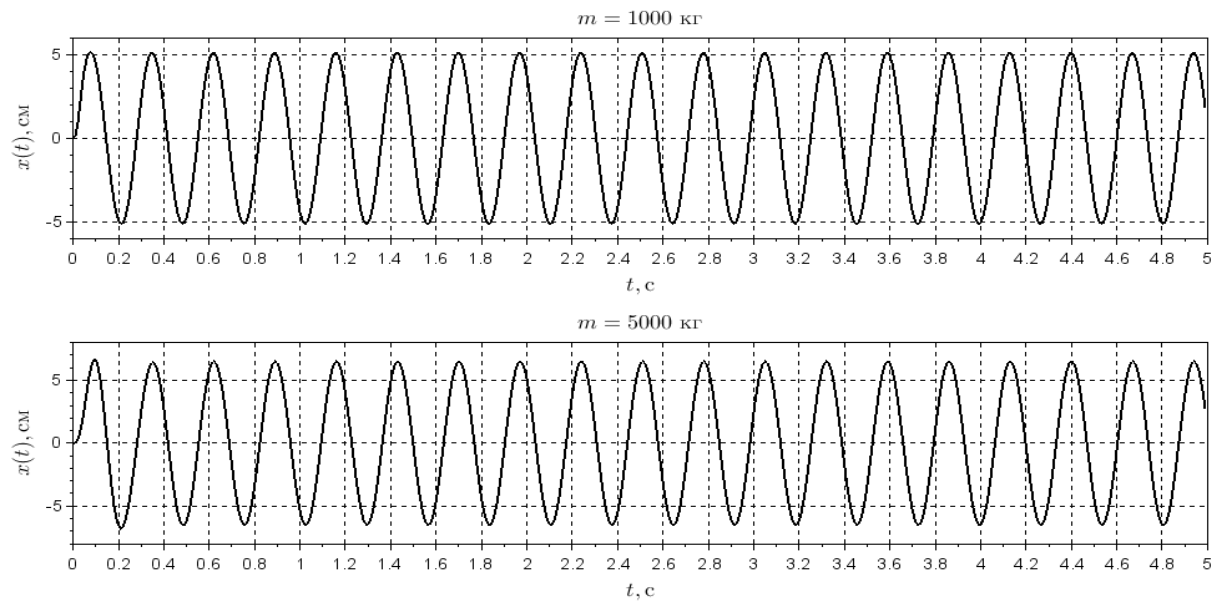


Рисунок 3.15 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань на ресорах від маси колісної платформи у системі Xcos

Далі роздивимось залежність амплітуди та частоти вертикальних коливань на ресорах від амортизатору. Порівняємо коливання колісної платформи з амортизатором та без нього. З цього виходить наступні зміни у коді програми (рис. 3.16).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.b=0;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$b="+string(Context.b)+"\ \mathrm{кг/с}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$x(t), \mathrm{см}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.b=10E4;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$b="+string(Context.b)+"\ \mathrm{кг/с}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$x(t), \mathrm{см}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.16 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від амортизатору у системі Xcos

Відсутність амортизатору досить цікаво впливає на амплітуду та частоту коливань колісної платформи на ресорах. При  $b = 0$  кг/с на графіку з'являються невеликі додаткові вертикальні коливання між основними, таким чином колісна платформа стає нестабільною. Окрім появи додаткових вертикальних коливань, збільшується амплітуда. З амортизатором рух стає більш плавним та комфортним.

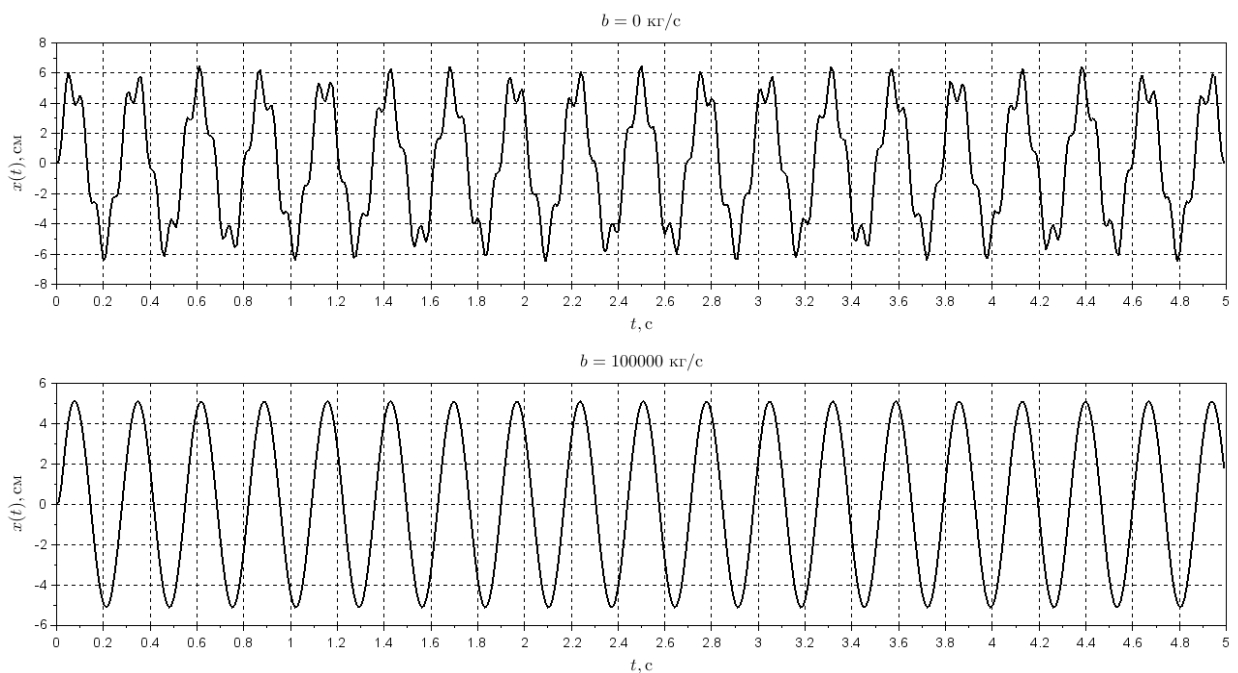


Рисунок 3.17 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань від амортизатору колісної платформи на ресорах у системі  $X\cos$

Наступним параметром, який ми розглянемо буде жорсткість ресори колісної платформи. Для розробки системи автоматизації колісної платформи на ресора потрібно знати та враховувати жорсткість ресори, бо це має великий вплив на амплітуду вертикальних коливань [14]. Для отримання графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи ми змінюємо код програми наступним чином (рис. 3.18).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\Task_1.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab\FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.c=10^5;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/м}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{cm}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.c=10E6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/м}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{cm}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.18 – Програма побудови графіків залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань колісної платформи від жорсткості ресори у системі  $Xcos$

У ході моделювання ми отримаємо наступні графіки (3.19).

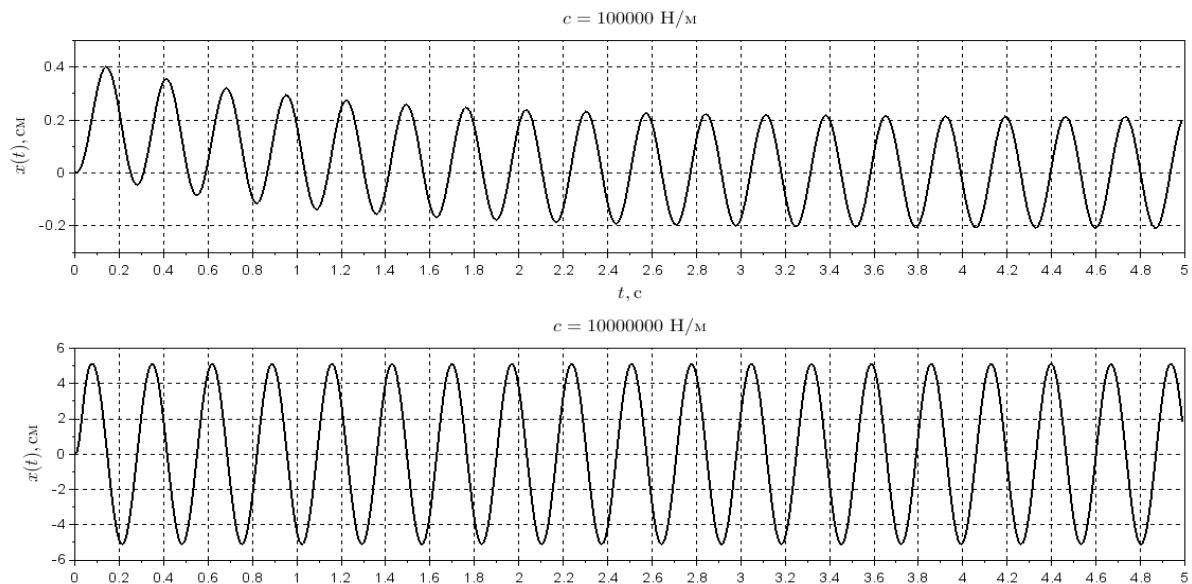


Рисунок 3.19 – Графіки залежності амплітуди та частоти вертикальних коливань від жорсткості ресори колісної платформи на ресорах у системі  $Xcos$

На графіках (3.19) ми можемо побачити, що жорсткість ресори має суттєвий вплив на амплітуду вертикальних коливань колісної платформи. З більш м'якою ресорою амплітуда коливань менша. Таким чином можемо сказати, що жорсткість ресори важливий параметр, який треба враховувати у процесі розробки системи автоматизації та при можливості підібрати ресору оптимальної жорсткості з врахуванням встановлених задач та параметрів колісної платформи.

Після проведених досліджень ми маємо важливу інформацію впливу параметрів колісної платформи на її амплітуду та частоту вертикальних коливань. Ми дізналися, що швидкість не впливає на амплітуду вертикальних коливань, але пропорційно збільшує частоту разом із швидкістю. На відміну від швидкості, відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку впливає на амплітуду коливань набагато більша. Не має впливу на частоту коливань колісної платформи.

Визначили, що довжина опорної поверхні має вплив на амплітуду та частоту вертикальних коливань колісної платформи на ресорах [16]. Якщо ми зменшимо довжину опорної поверхні, амплітуда коливань теж зменшиться, але значно збільшиться частота вертикальних коливань. На основі дослідів впливу маси на амплітуду та частоту вертикальних коливань ми визначили, що маса колісної платформи на ресорах майже не впливає на амплітуду та зовсім не змінює частоту вертикальних коливань. Таким чином можливо зробити висновок, що зміна маси майже не буде впливати на оптимальну швидкість руху колісної платформи на ресорах. При відсутності амортизатору ми побачили, що з'являються невеликі додаткові вертикальні коливання між основними, таким чином колісна платформа стає нестабільною [13]. Окрім появи додаткових вертикальних коливань, збільшується амплітуда. З цими даними ми зможемо точніше розробити систему автоматизованого управління швидкістю колісної платформи з врахуванням її вертикальних коливань на ресорах.

В математичній моделі (3.1) параметр  $x = x(t)$  характеризує переміщення корпусу мобільної платформи у вертикальному напрямку при його коливаннях на пружному підвішуванні (ресорах) [17]. З врахуванням цього, прискорення вертикальних коливань на ресорах буде представляти собою другу похідну координати  $x = x(t)$ :

$$a_x(t) = \frac{d^2 x}{dt^2}; \quad (3.7)$$

де  $a_x(t)$  – прискорення при вертикальних коливаннях мобільної платформи на ресорах.

Математична модель вертикальних коливань з врахуванням відношення (3.7) та (3.6) може бути представлена у вигляді динамічної ланки (рис. 3.20) з передатною функцією:

$$W_a(S) = \frac{S^2}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S}; \quad (3.8)$$

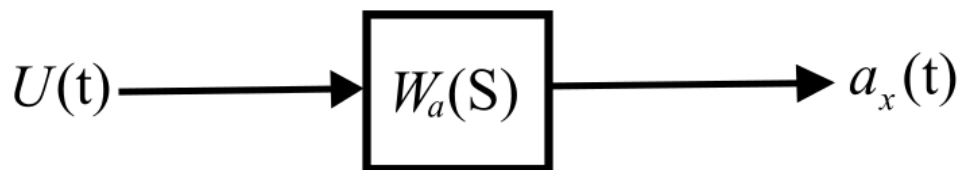


Рисунок 3.20 – Математична модель вертикальних коливань з прискоренням у якості вихідного параметру

Для застосування у моделюванні нової математичної моделі вертикальних коливань з прискоренням треба змінити значення чисельнику у

блоці передаточної функції. Змінюємо  $l$  на  $S^2$ , та отримуємо блок передаточної функції наступного вигляду (рис. 3.21).

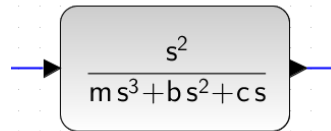


Рисунок 3.21 – Блок передаточної функції математичної моделі з прискоренням вертикальних коливань

Та отримуємо наступну комп'ютерну модель для подальшого застосування у дослідях відношення параметрів колісної платформи на прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$ .

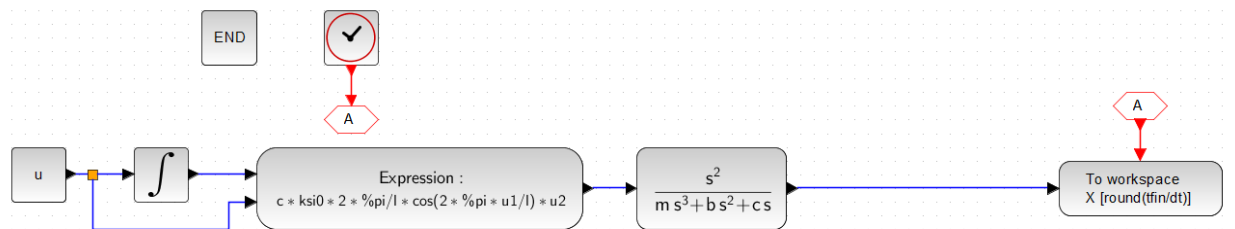


Рисунок 3.22 – Комп'ютерна модель вертикальних коливань з прискоренням вертикальних коливань колісної платформи

Та змінюємо код програми, щоб дослідити вплив параметрів колісної платформи на прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  (рис. 3.33).

```

1 clear;
2 loadXcosLibs(); loadScicos();
3 importXcosDiagram("C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab/Task_2.zcos");
4 typeof(scs_m);
5 scs_m.props.context;
6 exec('C:\Users\nikil\Desktop\Диплом Мар\SiLab\CompSilab/FormatCharts.sce',-1)
7
8 subplot(2,1,1);
9 Context.u=5/3.6;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{см}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.u=20/3.6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{см/с^2}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.33 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  від швидкості колісної платформи

На графіках (рис. 3.34) ми бачимо, що швидкість сильно впливає на прискорення вертикальних коливань колісної платформи, яка рухається опорною поверхнею. При швидкості п'ять кілометрів у годину прискорення вертикальних коливань колісної платформи значно нижче, ніж у другому випадку зі швидкістю двадцять кілометрів у годину.

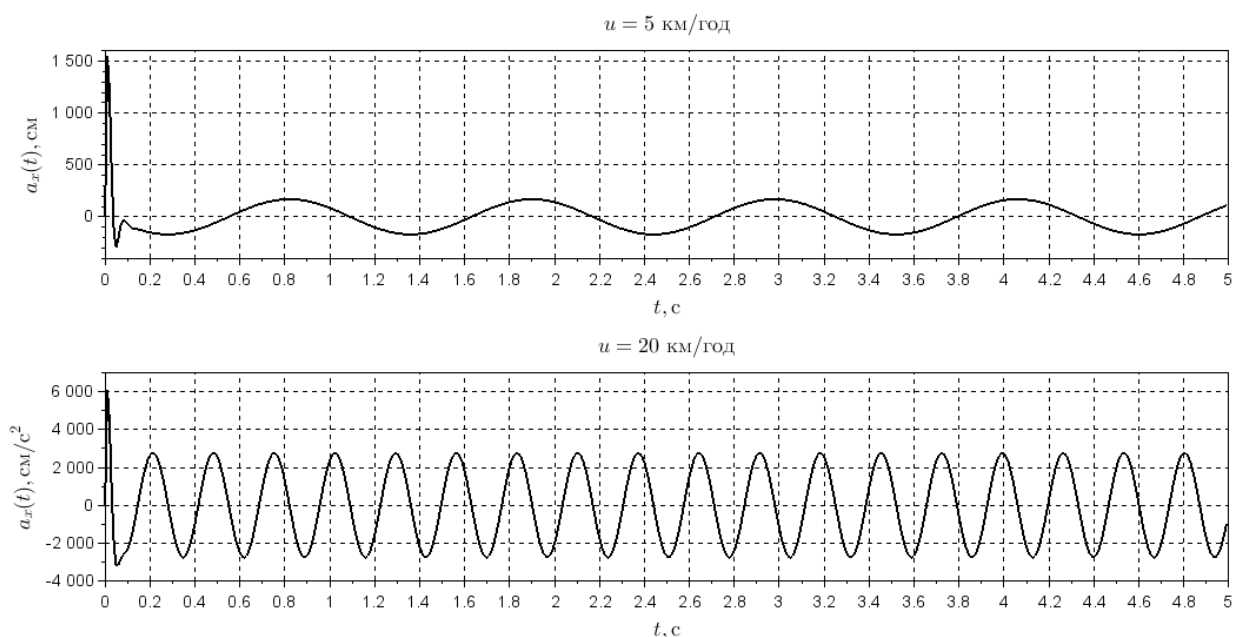


Рисунок 3.34 – Графіки залежності прискорення вертикальних коливань від швидкості колісної платформи на ресорах у системі Xcos

У наступному дослідженні ми змоделювали залежність прискорення вертикальних коливань від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку. Змінили код програми наступним чином, щоб отримати графіки впливу відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку на прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$ .

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.ksi0=0.05;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+"\cdot\mathrm{cm}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$a_x(t), \mathrm{cm}/\mathrm{c}^2$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.ksi0=0.1;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+"\cdot\mathrm{cm}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$a_x(t), \mathrm{cm}/\mathrm{c}^2$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.35 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку

Так само, як швидкість, відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку сильно впливає на прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$ . При збільшенні  $\xi_0$  у два рази, прискорення  $a_x(t)$  також пропорційно збільшується у два рази, що ми бачимо на графіках (рис. 3.36).

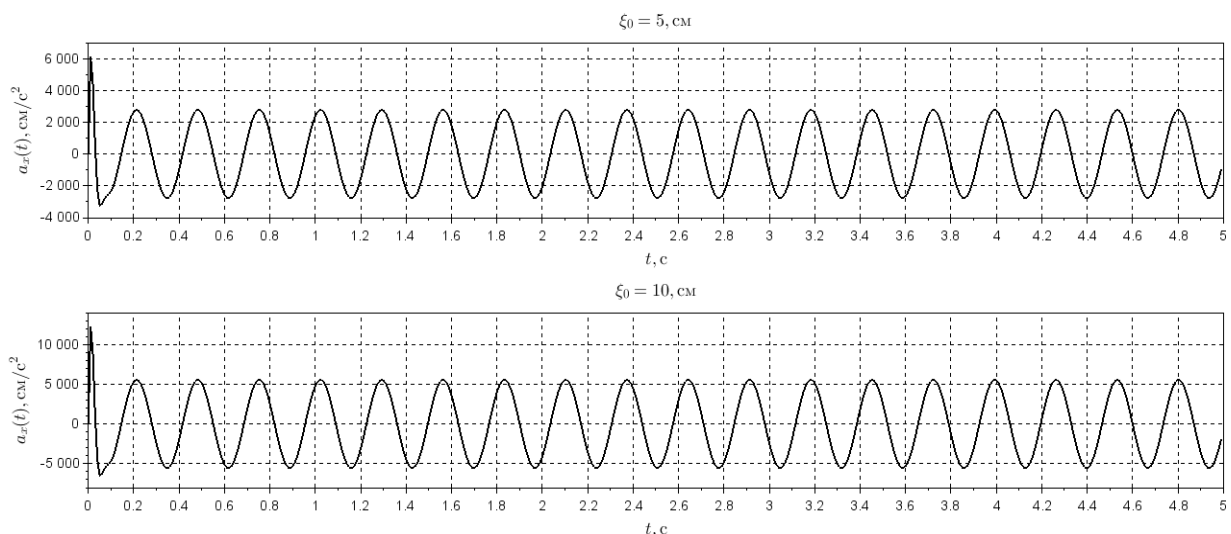


Рисунок 3.36 – Графіки залежності прискорення від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку у системі Xcos

Наступним параметром який ми використаємо буде довжина опорної поверхні. Та як залежить прискорення від зміни  $l$ . Змінюємо код програми наступним чином, щоб при моделюванні отримати графіки залежності прискорення від довжини опорної поверхні (рис. 3.37).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.l=0.1;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$l="+string(Context.l)+" , \mathrm{m}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.l=10;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$l="+string(Context.l)+" , \mathrm{m}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.37 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  колісної платформи на ресорах від відхилення опорної поверхні від довжини опорної поверхні.

На графіках (рис. 3.38) ми бачимо, що прискорення вертикальних коливань збільшилося до  $50000, \text{cm} / \text{c}^2$  при  $l = 0.1, \text{m}$ . Це має негативний вплив на плавність руху колісної платформи, тому чим більша довжина опорної поверхні, тим більш плавний рух можливо забезпечити. Якщо довжина опорної поверхні буде  $l = 10, \text{m}$ , то можемо побачити стабільність руху та такий рух є комфортнішим для пасажирів або вантажу.

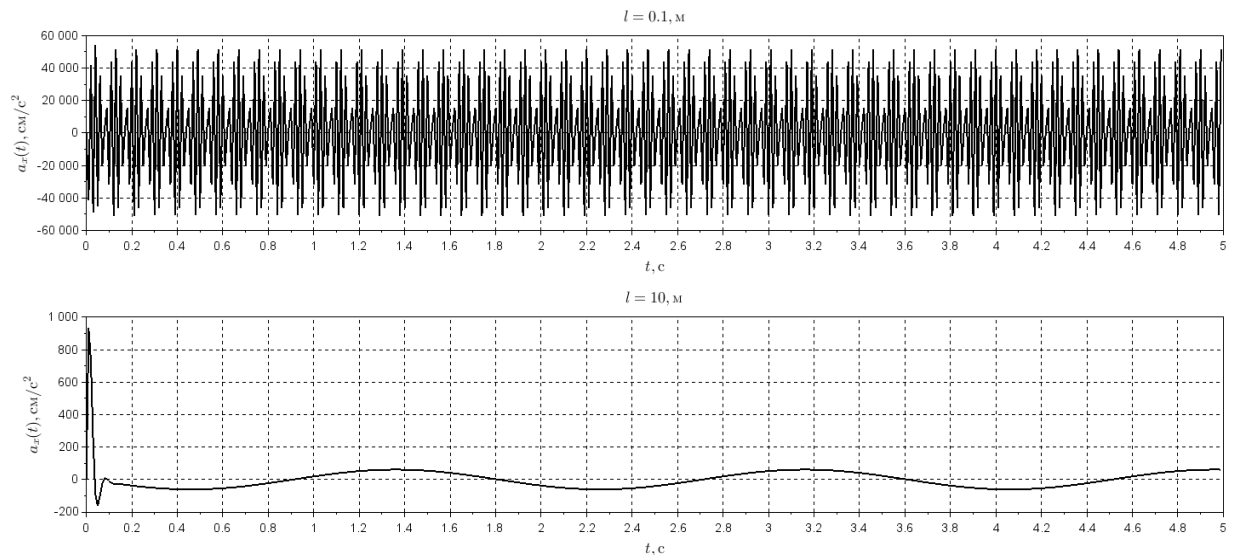


Рисунок 3.38 – Графіки залежності прискорення колісної платформи від довжини опорної поверхні у системі Xcos

Далі розглянемо вплив маси колісної платформи на прискорення вертикальних коливань колісної платформи. Для цього змінюємо код програми (рис. 3.39), щоб отримати графіки залежності прискорення від маси колісної платформи на ресорах (рис. 3.40).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.m=1000;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$m="+string(Context.m)+"\cdot\mathrm{кг}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.m=5000;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$m="+string(Context.m)+"\cdot\mathrm{кг}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.39 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  від маси колісної платформи.

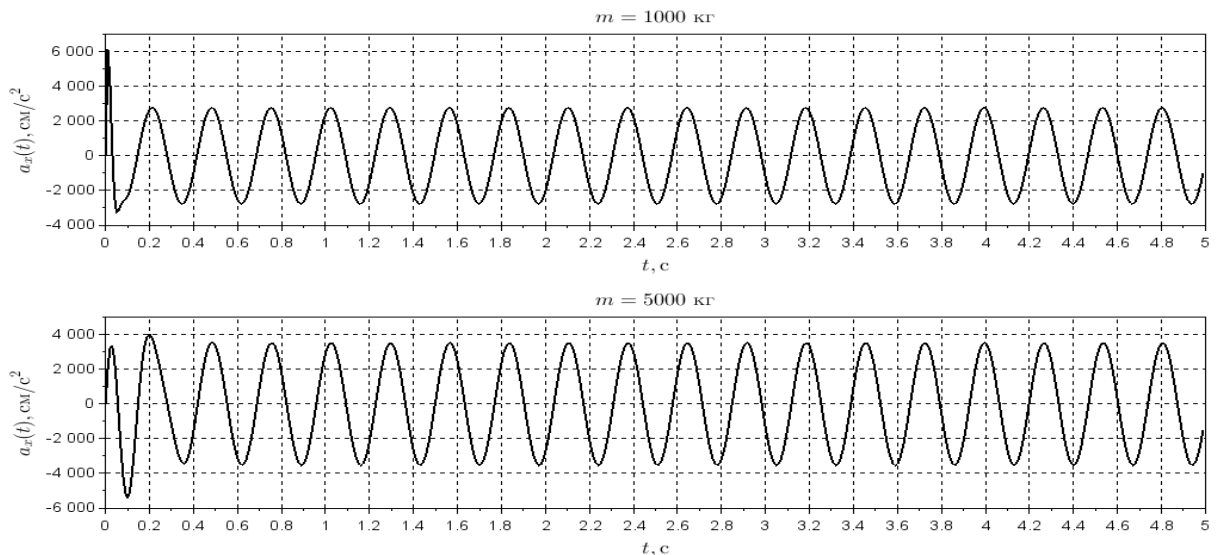


Рисунок 3.40 – Графіки залежності прискорення вертикальних коливань від маси колісної платформи на ресорах у системі  $X_{\cos}$

Збільшення маси колісної платформи негативно впливає на прискорення та зменшує плавність руху, бо чим більше прискорення, тим менша оптимальна швидкість колісної платформи при заданих умовах. Вже на цьому етапі можемо сказати, що не так важлива амплітуда, як прискорення вертикальних коливань колісної платформи. Бо всі параметри будуть мати вплив на прискорення вертикальних коливань та плавність руху.

Наступним параметром візьмемо амортизатор та дослідим, як наявність амортизатору впливає на прискорення вертикальних коливань колісної платформи. Для отримання потрібних графіків ми змінили код програми та отримали наступний вигляд (рис. 3.41).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.b=0;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$b="+string(Context.b)+"\ \mathrm{кг/с}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$", "$a_x(t), \mathrm{см/с^2}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.b=10E4;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$b="+string(Context.b)+"\ \mathrm{кг/с}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$", "$a_x(t), \mathrm{см/с^2}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.41 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  від амортизатору колісної платформи.

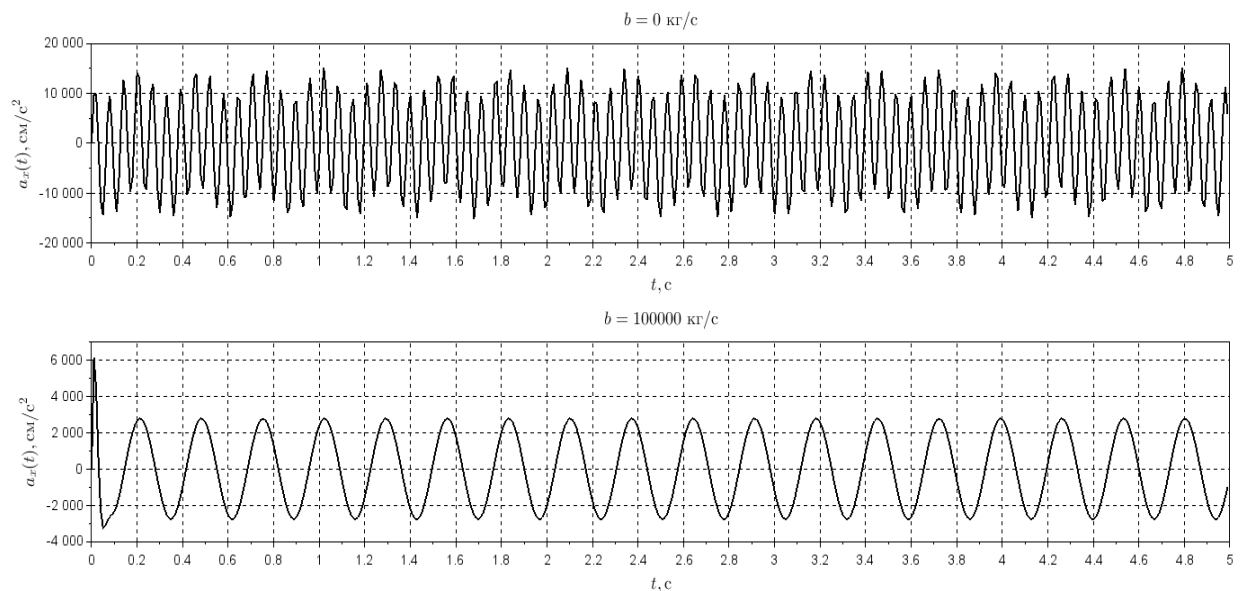


Рисунок 3.42 – Графіки залежності прискорення вертикальних коливань від амортизатору колісної платформи на ресорах у системі  $X\cos$

На графіках (рис. 3.42) ми бачимо, що наявність амортизатору сильно впливає на плавність руху колісної платформи та збільшує комфортабельність. Без амортизатору збільшується прискорення вертикальних коливань у декілька разів та сильно збільшується частота коливань, що зменшує ресурс довговічності колісної платформи на ресорах та негативно впливає на вантаж, або пасажирів.

Останній параметр, який ми розглянемо це жорсткість ресори колісної платформи та її вплив на прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$ . Цей параметр важливо враховувати при проектуванні системи автоматизації управління рухом колісної платформи на ресорах, бо жорсткість платформи сильно впливає на амплітуду та частоту коливань [16]. Зараз ми змоделюємо залежність прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  колісної платформи від жорсткості ресори та побудуємо графіки (рис. 3.44). Змінюємо код програми наступним чином (рис. 3.43).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.c=10^5;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/M}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.c=10E6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(X.time,100*X.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/M}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$a_x(t), \mathrm{cm/c^2}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.43 – Код програми для моделювання залежності прискорення вертикальних коливань  $a_x(t)$  від амортизатору колісної платформи.

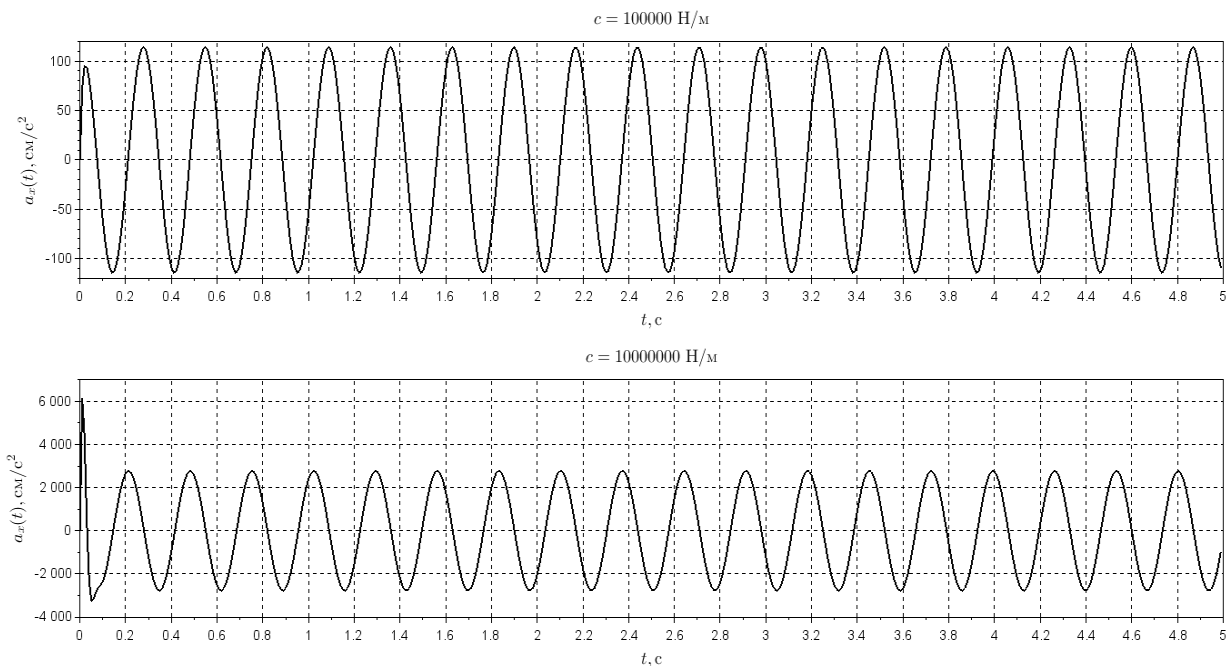


Рисунок 3.42 – Графіки залежності прискорення вертикальних коливань від амортизатору колісної платформи на ресорах у системі Xcos

Ми бачимо що жорсткість ресори впливає не тільки на вертикальну амплітуду коливань, а ще на прискорення колісної платформи. Вплив жорсткості ресори важливо враховувати, якщо ресора занадто жорстка, тоді це призводить до значного збільшення амплітуди вертикальних коливань та прискорення вертикальних коливань колісної платформи. В той же час це

впливає на оптимальну швидкість. З більш м'якою ресорою колісна платформа може рухатись швидше та плавніше.

Шляхом дослідів впливу параметрів колісної платформи на амплітуду, частоту вертикальних коливань та прискорення ми побачили властивості об'єкту автоматизації, що необхідно для розробки системи автоматизації. Ми дізналися, що прискорення колісної платформи більш чутливе до всіх її параметрів системи на відміну від координат вертикальних коливань. Тому ми вирішили, що управління рухом колісної платформи на ресорах буде здійснюватися за її прискоренням вертикальних коливань, бо амплітуда вертикальних коливань чутлива лише до відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку та жорсткості ресори. Інші параметри системи менше впливають на амплітуду коливань. Якщо розглядати вплив параметрів системи на прискорення колісної платформи, можна визначити, що прискорення чутливе до всіх параметрів системи [17]. Таким чином, для розробки системи автоматизації руху колісної платформи ми використовуємо управління швидкістю руху в залежності від прискорення вертикальних коливань.

### 3.3 Процеси вимірювання прискорення вертикальних коливань

Прискорення вертикальних коливань колісної платформи на ресорах неможна виміряти безпосередньо, а можливо виміряти тільки опосередковано за допомогою акселерометру (рис. 2.6). Вихідним сигналом акселерометру є напруга  $U_m$  обумовлена зміною опору чутливого елемента в наслідок зміщення інерційного елемента. Таким чином математична модель процесів вимірювання прискорення вертикальних коливань може бути у виді динамічної ланки, зображеної на (рис. 3.43), передаточна функція якої має вигляд (3.10). Параметри акселерометру приймемо наступними :

$$m_a = 0,001 \text{ кг}; b_a = 2 \text{ кг} / \text{с}; C_a = 50 \text{ Н} / \text{м}; l_a = 0,01 \text{ м}; U_a = 5 \text{ В}; \quad (3.9)$$

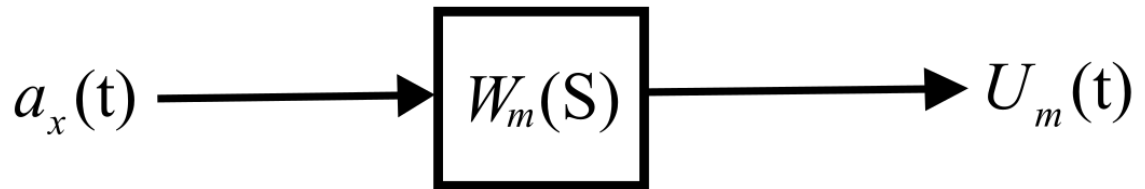


Рисунок 3.43 – Математична модель акселерометру

$$W_m(S) = \frac{U_a \frac{m_a}{l_a}}{m_a S^2 + b_a S + C_a}; \quad (3.10)$$

Зараз потрібно вказати параметри акселерометру у системі Xcos (рис. 3.44), щоб ми додали передаточну функцію акселерометру до нашої комп'ютерної моделі вертикальних коливань колісної платформи на ресорах. Це дозволить нам опосередковано виміряти прискорення вертикальних коливань колісної платформи, для керування швидкістю колісної платформи на основі показників акселерометру.

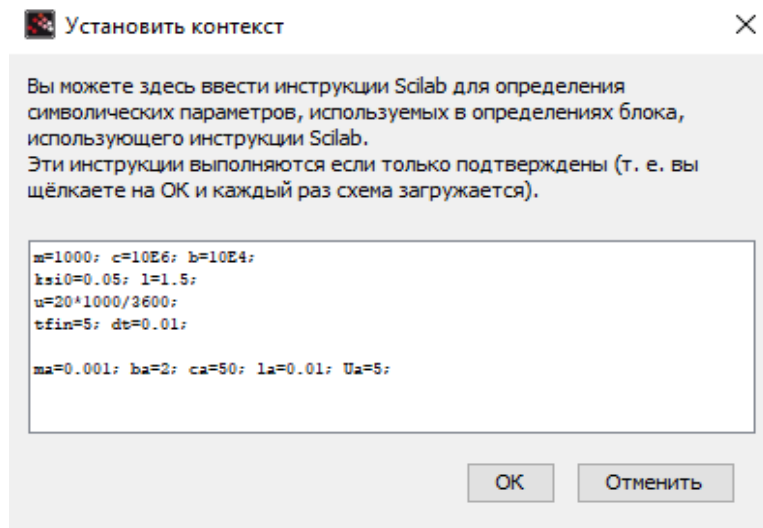


Рисунок 3.44 – Введення параметрів акселерометру у систему моделювання Xcos

Щоб змоделювати вертикальні коливання колісної платформи на ресорах з вимірюванням прискорення вертикальних коливань, потрібно

додати до комп'ютерної моделі блок передаточної функції акселерометру. Таким чином комп'ютерна модель набуває наступного вигляду (рис. 3.45).

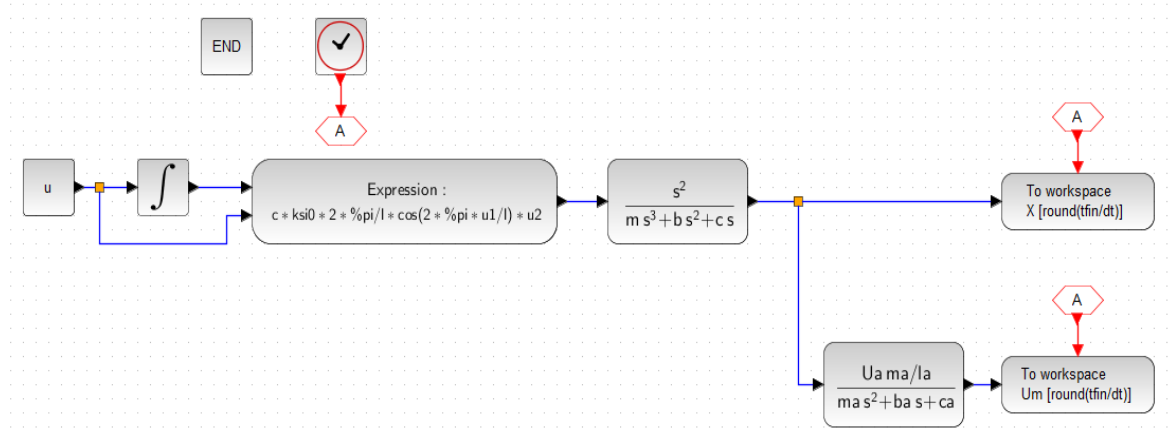


Рисунок 3.45 – Комп'ютерна модель вертикальних коливань колісної платформи з акселерометром

Нам потрібно дослідити залежність напруги акселерометру від параметрів системи у процесі руху колісної платформи, щоб дізнатися чутливість напруги акселерометру до кожного параметру системи. Таким чином ми дізнаємося чи є можливість управління швидкістю колісної платформи опираючись на показники напруги, яку видає акселерометр та корегувати швидкість відштовхуючись від цього параметру [8].

Проведемо дослідження впливу швидкості колісної платформи на напругу акселерометру. Щоб отримати графіки залежності напруги акселерометру від швидкості колісної платформи потрібно змінити код програми (рис. 3.46). Та при симуляції вертикальних коливань колісної платформи ми отримаємо графіки (рис. 3.47).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.u=5/3.6;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.u=20/3.6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.46 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від швидкості колісної платформи

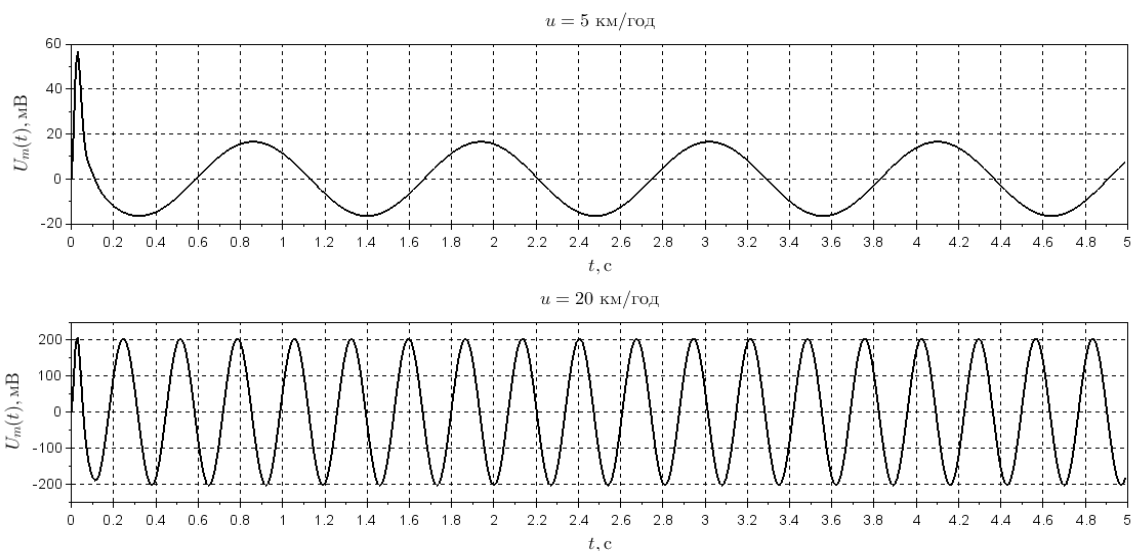


Рисунок 3.47 – Графіки залежності напруги акселерометру від швидкості колісної платформи на ресорах у системі Xcos

На графіках (3.47) ми бачимо, що напруга акселерометру чутлива до швидкості колісної платформи та ми маємо можливість регулювати швидкість за результатами вимірювань напруги акселерометру. Збільшення показників напруги акселерометру пропорційно збільшуються з ростом швидкості.

Далі проведемо вимірювання зміни напруги акселерометру, яка показує прискорення вертикальних коливань в залежності від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку, щоб дізнатися як

змінюється напруга з збільшенням нерівності опорної поверхні (дороги, ґрунту). Для цього змінюємо код програми (рис. 3.48). Та проаналізуємо отримані графіки (рис. 3.49) залежності напруги акселерометру від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку.

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.ksi0=0.05;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+" , \mathrm{cm}"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$U_m(t), \mathrm{mB}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.ksi0=0.1;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="\xi_0="+string(Context.ksi0*100)+" , \mathrm{cm}"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$U_m(t), \mathrm{mB}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.48 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку колісної платформи

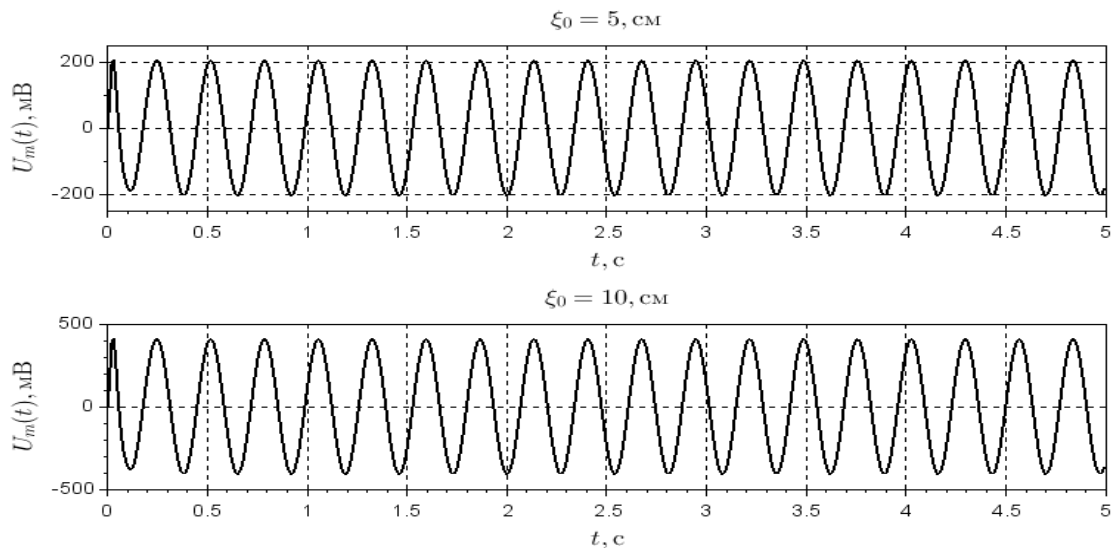


Рисунок 3.49 – Графіки залежності напруги акселерометру від відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку колісної платформи на ресорах у системі Xcos

На графіках (рис. 3.49) ми бачимо, що відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку впливає на напругу акселерометру. Чим більше відхилення опорної поверхні, тим меншу швидкість колісної платформи потрібно установити. Якщо регулювати швидкість по показникам напруги акселерометру, то при збільшенні нерівності опорної поверхні, швидкість потрібно зменшувати пропорційно збільшенню відхилення опорної поверхні. Напруга акселерометру чутлива до змінення  $\xi_0$ .

Наступне, що ми повинні проаналізувати, це вплив довжини опорної поверхні на напругу акселерометру. З минулих досліджень ми знаємо, що прискорення вертикальних коливань дуже чутливе до змін довжини опорної поверхні, та при малої довжині плавність руху суттєво знижується. Зараз ми змоделюємо коливання колісної платформи та побудуємо графіки (рис. 3.51) залежності напруги від довжини опорної поверхні [8]. Для симуляції потрібно змінити код програми, змінити параметр  $\xi_0$  на параметр  $l$  (рис. 3.50).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.l=0.1;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$l="+string(Context.l)+" , \mathrm{m}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$U_m(t), \mathrm{mB}$", titlec, []);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.l=10;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$l="+string(Context.l)+" , \mathrm{m}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$U_m(t), \mathrm{mB}$", titlec, []);

```

Рисунок 3.50 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від довжини опорної поверхні колісної платформи

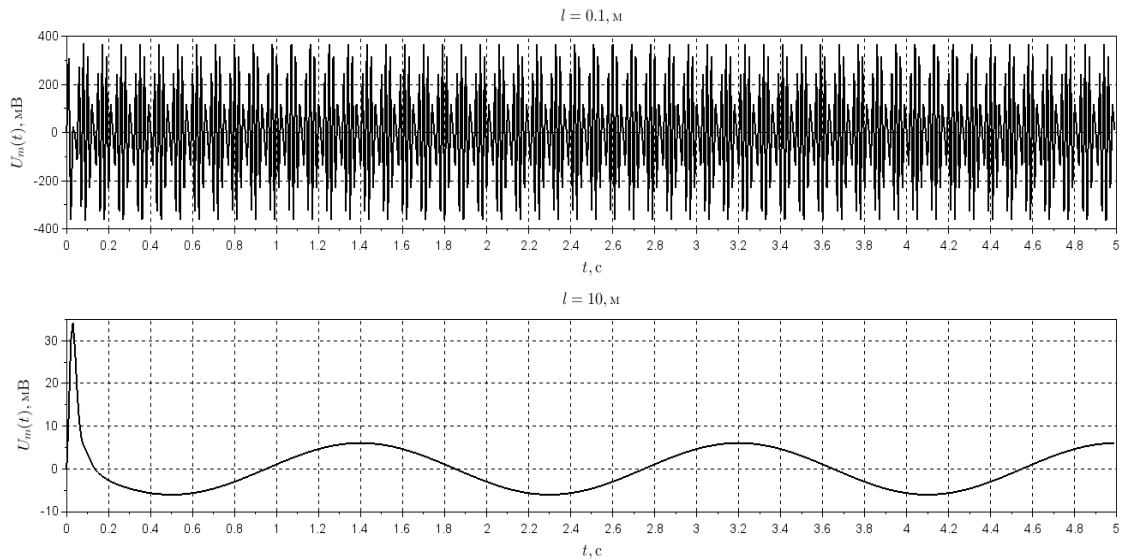


Рисунок 3.51 – Графіки залежності напруги акселерометру від довжини опорної поверхні у системі Xcos

Таким чином при однаковій швидкості колісної платформи бачимо велику різницю у нарузі акселерометру. При збільшенні довжини опорної поверхні у сто разів, напруга акселерометру по такій поверхні зменшилася у вісімдесят разів. Це означає, що рух колісної платформи по довгій поверхні є більш плавним та стабільним, чим у випадку з короткою опорної поверхнею. Та якщо ми регулюємо швидкість опираючись на показники акселерометру, у випадку з короткою поверхнею оптимальна швидкість буде у десятки разів менше, ніж по довгій опорній поверхні.

Далі ми розглянемо реакцію показників напруги акселерометру на масу колісної платформи. Треба враховувати, що маса колісної платформи може змінюватися. Маса колісної платформи визначає не тільки корпус платформи та її деталі, але великий вплив на параметр маси може здійснювати вантаж, який пересувається на колісній платформі, або пасажери [7]. Тому важливо враховувати параметр маси та його вплив на властивості об'єкту та систему автоматизації. Побудуємо графіки (рис. 3.53) залежності напруги акселерометру від маси колісної платформи, щоб дізнатися силу впливу маси на властивості системи автоматизації. Змінюємо код програми для побудови необхідних графіків (рис. 3.52).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.m=1000;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$m="+string(Context.m)+"\cdot\mathrm{кг}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.m=5000;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$m="+string(Context.m)+"\cdot\mathrm{кг}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.52 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від маси колісної платформи

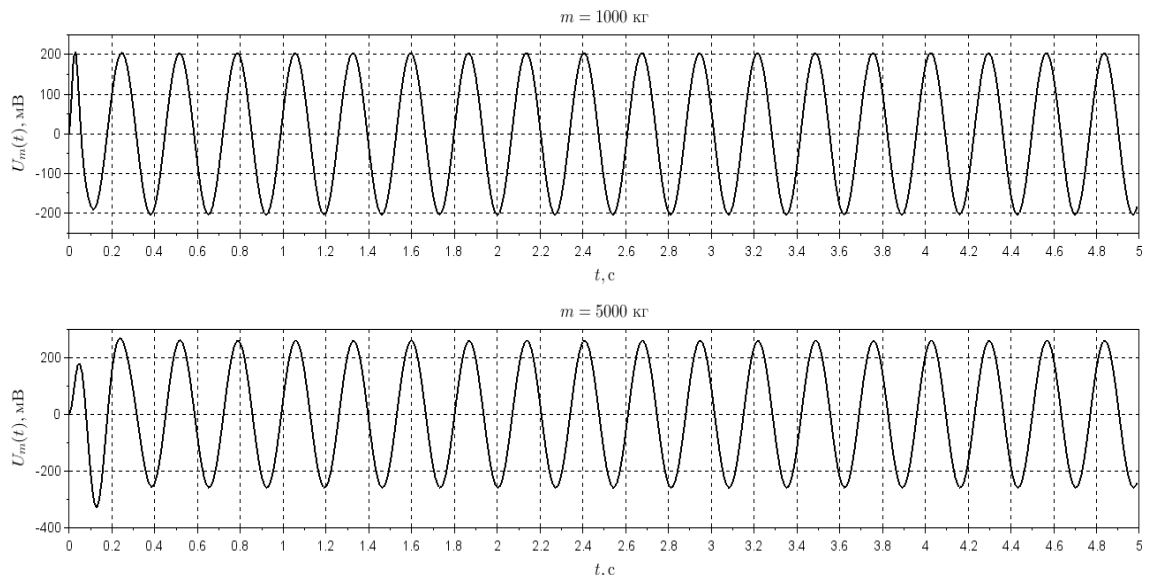


Рисунок 3.53 – Графіки залежності напруги акселерометру від маси колісної платформи у системі Xcos

Якщо проаналізувати графіки залежності напруги акселерометру від маси колісної платформи, можна визначити, що показники напруги акселерометру малочутливі до зміни маси колісної платформи, таким чином можемо сказати, що прискорення вертикальних коливань майже не змінюватиметься від змінення маси колісної платформи. При збільшенні маси колісної платформи оптимальна швидкість руху буде незначно нижче.

Розглянемо вплив амортизатору на напругу акселерометру при процесі руху колісної платформи на ресорах. Для побудови графіків (рис. 3.55) потрібно змінити параметри моделювання, щоб отримати графік залежності напруги акселерометру від амортизатору (рис. 3.54). Проаналізуємо показники напруги акселерометру з амортизатором та без нього.

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.b=0;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$b="+string(Context.b)+"\cdot\mathrm{кг/с}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.b=10E4;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$b="+string(Context.b)+"\cdot\mathrm{кг/с}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{с}$","$U_m(t), \mathrm{мВ}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.54 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від амортизатору колісної платформи

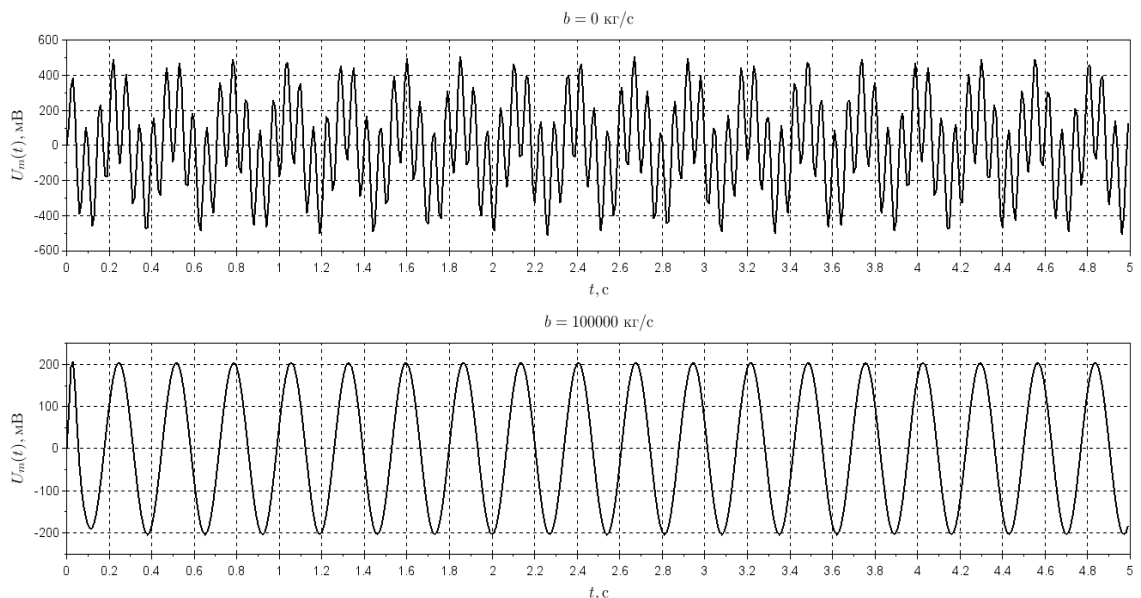


Рисунок 3.55 – Графіки залежності напруги акселерометру від амортизатору колісної платформи у системі Xcos

На графіках (рис. 3.55) ми бачимо, що напруга акселерометру чутлива до амортизації колісної платформи. Без амортизатору напруга акселерометру в 2,5 рази більша при однаковій швидкості. З цього ми можемо зробити висновок, що при даних початкових значеннях параметрів, оптимальна швидкість колісної платформи без амортизатору буде зменшена у 2,5 рази. Навіть враховуючі зменшення швидкості на колісну платформу на ресорах будуть впливати додаткові вертикальні коливання, які амортизатор прибирає. З амортизатором колісна платформа зможе рухатись швидше та підтримувати плавний рух, чим без амортизатору, якщо використовувати однакові значення інших параметрів системи.

Останнім параметром, який ми повинні розглянути є жорсткість ресори. Ми проаналізуємо чутливість показників напруги акселерометру до жорсткості ресори та визначимо, як жорсткість ресори буде впливати на оптимальну швидкість колісної платформи при однакових значеннях інших параметрів системи. Для цього ми побудували графіки (рис. 3.57) залежності напруги акселерометру від жорсткості ресори колісної платформи. Таким чином потрібно змінити код програми та параметр амортизатору на жорсткість ресори (рис. 3.56).

```

8 subplot(2,1,1);
9 Context.c=10^5;
10 scicos_simulate(scs_m,Context);
11 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
12 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/M}$"
13 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$U_m(t), \mathrm{mB}$",titlec,[]);
14 subplot(2,1,2);
15 Context.c=10E6;
16 scicos_simulate(scs_m,Context);
17 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-","linewidth",2);
18 titlec="$c="+string(Context.c)+"\ \mathrm{H/M}$"
19 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$","$U_m(t), \mathrm{mB}$",titlec,[]);

```

Рисунок 3.56 – Код програми для моделювання залежності напруги акселерометру від жорсткості ресори колісної платформи

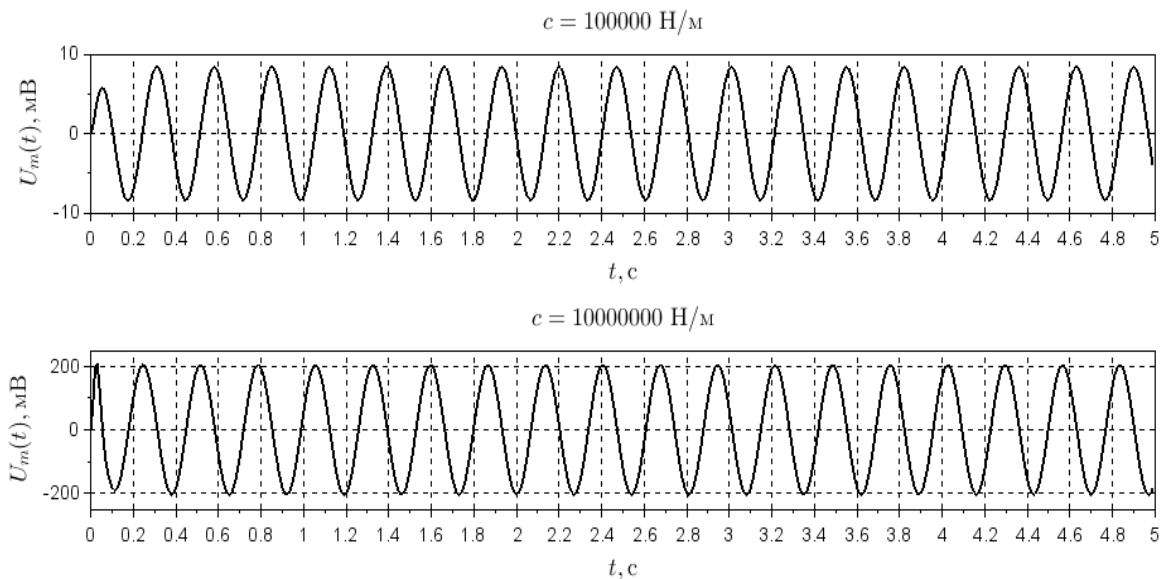


Рисунок 3.57 – Графіки залежності напруги акселерометру від жорсткості ресори колісної платформи у системі Xcos

Згідно з графіками (рис. 3.57) залежності напруги акселерометру від жорсткості ресори колісної платформи ми визначили, що більш жорстка ресора буде сильніше обмежувати оптимальну швидкість колісної платформи. Таким чином ми можемо сказати, що зменшення жорсткості ресори, якщо це технічно можливо, дозволяє збільшувати оптимальну швидкість колісної платформи при однакових значеннях інших параметрів системи. Напруга акселерометру чутлива до змінення жорсткості ресори.

Ми дослідили властивості об'єкту автоматизації та вплив значення параметрів на напругу акселерометру. Тепер ми можемо змодельовати автоматизоване управління швидкістю руху колісної платформи, опираючись на показники напруги акселерометру в залежності від значень показників параметрів колісної платформи та опорної поверхні та регулювати швидкість в залежності від встановленого значення напруги акселерометру [6]. Якщо напруга акселерометру буде вища від встановленої, тоді система автоматизації буде зменшувати швидкість, поки напруга акселерометру не досягне встановленого значення. Кожен параметр системи є важливим та змінення

якого буде впливати на оптимальну швидкість колісної платформи при встановлених значеннях параметрів.

### 3.4 Автоматизоване управління швидкістю

Для визначення параметрів автоматичного ПД-регулятора швидкості використовуємо умови (2.57) у яких врахуємо співвідношення (2.45):

$$\begin{aligned}
 & m m_a > 0; \quad m b_a + b m_a > 0; \\
 & a_4(a_3 + b_2 a_{II}) - a_5(a_2 + b_2 a_{II}) > 0; \quad (a_3 + b_2 a_{II}) > \frac{a_5}{a_4}(a_2 + b_2 a_{II}); \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

Таким чином ми отримали умови параметрів ПД-регулятора. Додаємо фільтр сигналу акселерометру до комп'ютерної моделі акселерометру. Щоб додати фільтр сигналу акселерометру до комп'ютерної моделі вертикальних коливань колісної платформи треба встановити блок ABS та провести сигнал акселерометру через блок передаточної функції (3.12) (рис. 3.58) та підберемо параметри для передаточної функції (рис. 3.59), щоб побудувати графіки з максимально допустимою напругою акселерометру під час руху.

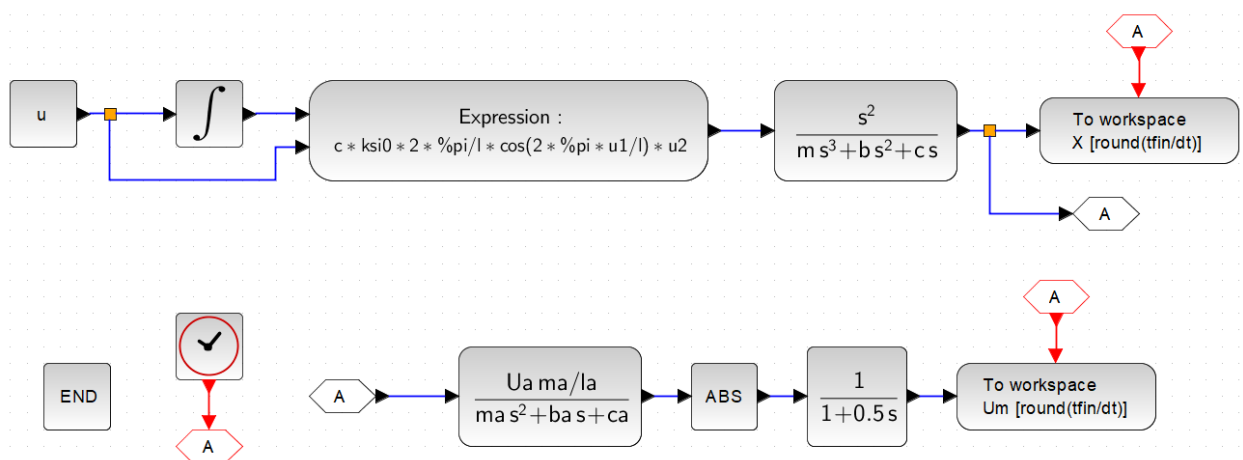


Рисунок 3.58 – Комп'ютерна модель вертикальних коливань колісної платформи та акселерометру з фільтром

$$\frac{1}{1 + 0,5s}; \quad (3.12)$$

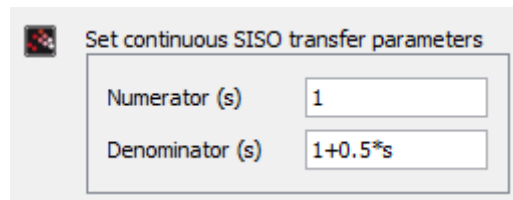


Рисунок 3.59 – параметри для передаточної функції (фільтру) сигналу акселерометру

Зараз ми перевіримо, наскільки підібраний фільтр та його параметри підходять для виконання поставлених задач. Для цього треба написати програму побудови графіків залежності прискорення вертикальних коливань  $x(t)$  та відфільтрованого сигналу акселерометру  $U_m(t)$  (рис. 3.60), за допомогою якого ми побачимо прискорення вертикальних коливань та максимальну напругу акселератору під час руху колісної платформи на ресорах з врахуванням параметрів системи.

```

8 Context.u=5/3.6;
9 scicos_simulate(scs_m,Context);
10 leg=["$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"]
11 subplot(2,1,1);
12 plot(X.time,100*X.values,"k-", "linewidth",2);
13 subplot(2,1,2);
14 plot(Um.time,1000*Um.values,"k-", "linewidth",2);
15 |
16 Context.u=20/3.6;
17 scicos_simulate(scs_m,Context);
18 leg=[leg,"$u="+string(Context.u*3.6)+"\ \mathrm{км/год}$"]
19 subplot(2,1,1);
20 plot(X.time,100*X.values,"k--", "linewidth",2);
21 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$x(t), \mathrm{см/с^2}$", "", leg);
22 subplot(2,1,2);
23 plot(Um.time,1000*Um.values,"k--", "linewidth",2);
24 FormatCharts("$t, \mathrm{c}$", "$U_m(t), \mathrm{мВ}$", "", leg);

```

Рисунок 3.60 – Програма побудови графіків залежності прискорення вертикальних коливань  $x(t)$  та відфільтрованого сигналу акселерометру

$$U_m(t)$$

У результаті побудові графіків (рис. 3.61) залежності прискорення вертикальних коливань  $x(t)$  та відфільтрованого сигналу акселерометру  $U_m(t)$  ми бачимо, що фільтр та параметри фільтру сигналу акселерометру нам підходить. З допомогою фільтрації сигналу акселерометру ми отримали графік значення максимальної напруги акселерометру під час руху колісної платформи з швидкістю 5, км/год та 20, км/год та визначили, що параметри фільтру сигналу задовольняють потреби системи автоматизації.

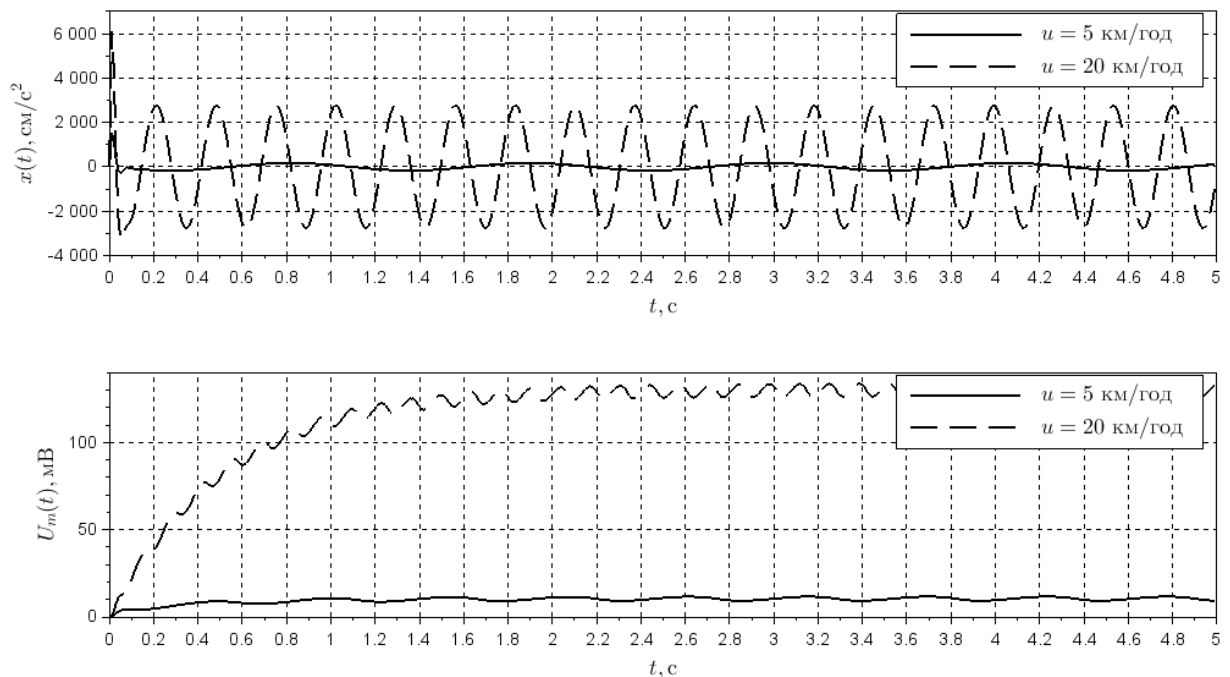


Рисунок 3.61 – Графіки залежності прискорення вертикальних коливань  $x(t)$  та відфільтрованого сигналу акселерометру  $U_m(t)$  від швидкості колісної платформи

Таким чином ми бачимо, щоб забезпечити плавний рух колісної платформи по опорній поверхні з довжиною  $l = 0,1 \text{ м}$ , потрібно встановити обмеження напруги акселерометру  $U_m(t) = 20 \text{ мВ}$ . При збільшенні показника напруги  $U_m(t)$  більше встановленого значення система зменшить швидкість, доки напруга не зменшиться до встановленого.

Наступним кроком буде підключення ПД-регулятора до комп'ютерної моделі вертикальних коливань колісної платформи для автоматизованого управління швидкістю колісної платформи в залежності від напруги акселерометру, який визначає прискорення вертикальних коливань. Для цього спочатку ми повинні встановити константу  $U_m(t)$ , яка визначатиме обмеження напруги акселерометру. До комп'ютерної моделі додаємо блок константи  $U_m(t)$  (рис. 3.62).



Рисунок 3.62 – Блок константи  $U_m(t)$  напруги акселерометру

Далі ми додаємо фільтрований сигнал та вираховуємо різницю між отриманою напругою акселерометру та заданим значенням напруги за допомогою блоку «SUMMATION» (рис. 3.63).

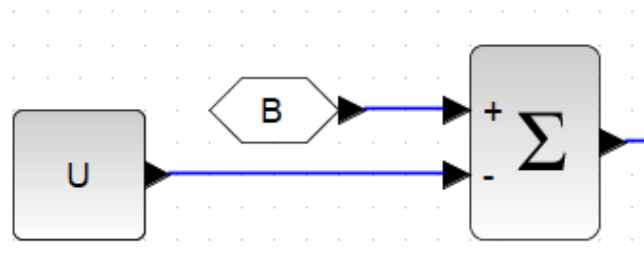


Рисунок 3.63 – Різниця сигналу отриманої напругою акселерометру та заданим значенням напруги за допомогою блоку «SUMMATION»

Потім встановлюємо ПД-регулятор та віднімаємо його сигнал від швидкості колісної платформи  $U$ . Отриманий сигнал  $S$  направляємо у початок комп'ютерної моделі вертикальних коливань колісної платформи на ресорах та підключаємо вихідний сигнал  $S$  до SciNotes за допомогою блоку «To workspace». У результаті отримуємо фінальний вид комп'ютерної моделі

системи автоматизованого управління швидкістю колісної платформи залежної від вихідного сигналу напруги акселерометру, який вимірює прискорення вертикальних коливань колісної платформи. (рис. 3.64).

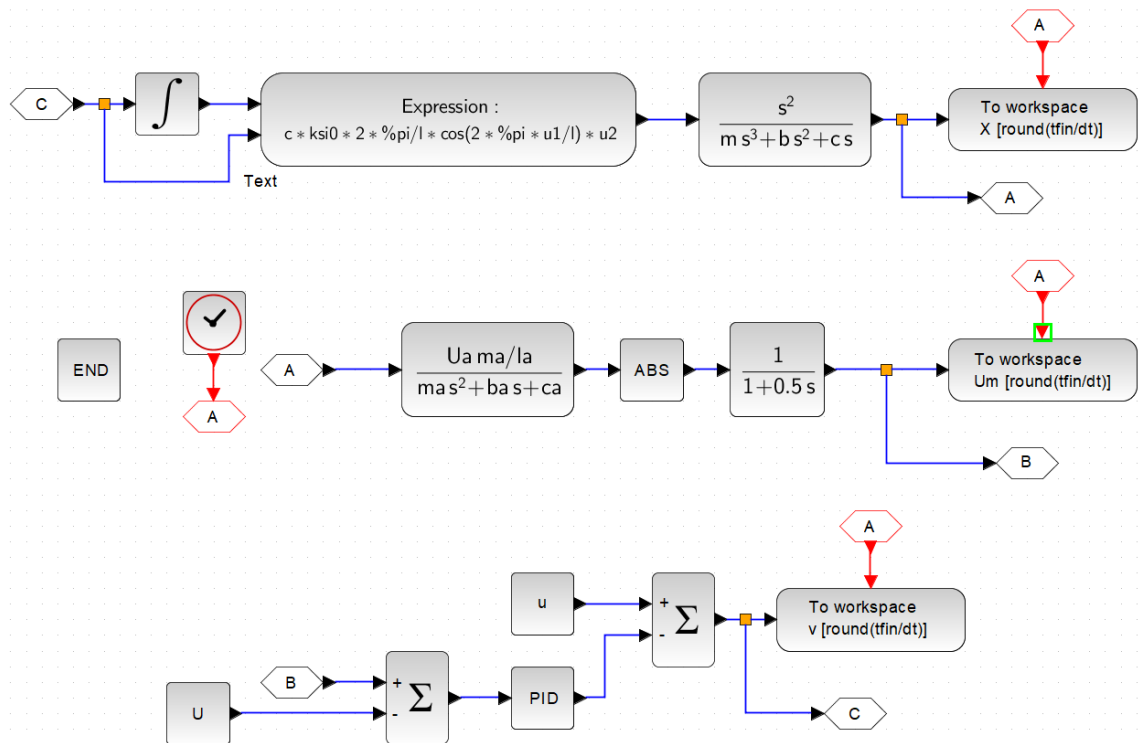


Рисунок 3.64 – Комп'ютерна модель системи автоматизованого управління швидкістю колісної платформи

Параметри ПІД-регулятора встановимо наступні (рис. 3.65) з врахуванням вимірювання напруги  $U_m(t)$  в мВ. Було прийнято рішення шляхом підбору встановити пропорційний параметр 250, інтегральний параметр 1000 та диференційний параметр 10.

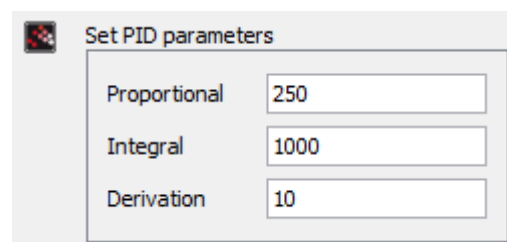


Рисунок 3.65 – Параметри ПІД-регулятора

Перевіряємо роботу ПД-регулятора з встановленими параметрами, побудуємо графіки (рис. 3.66) прискорення вертикальних коливань, напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху відрегульовану системою.

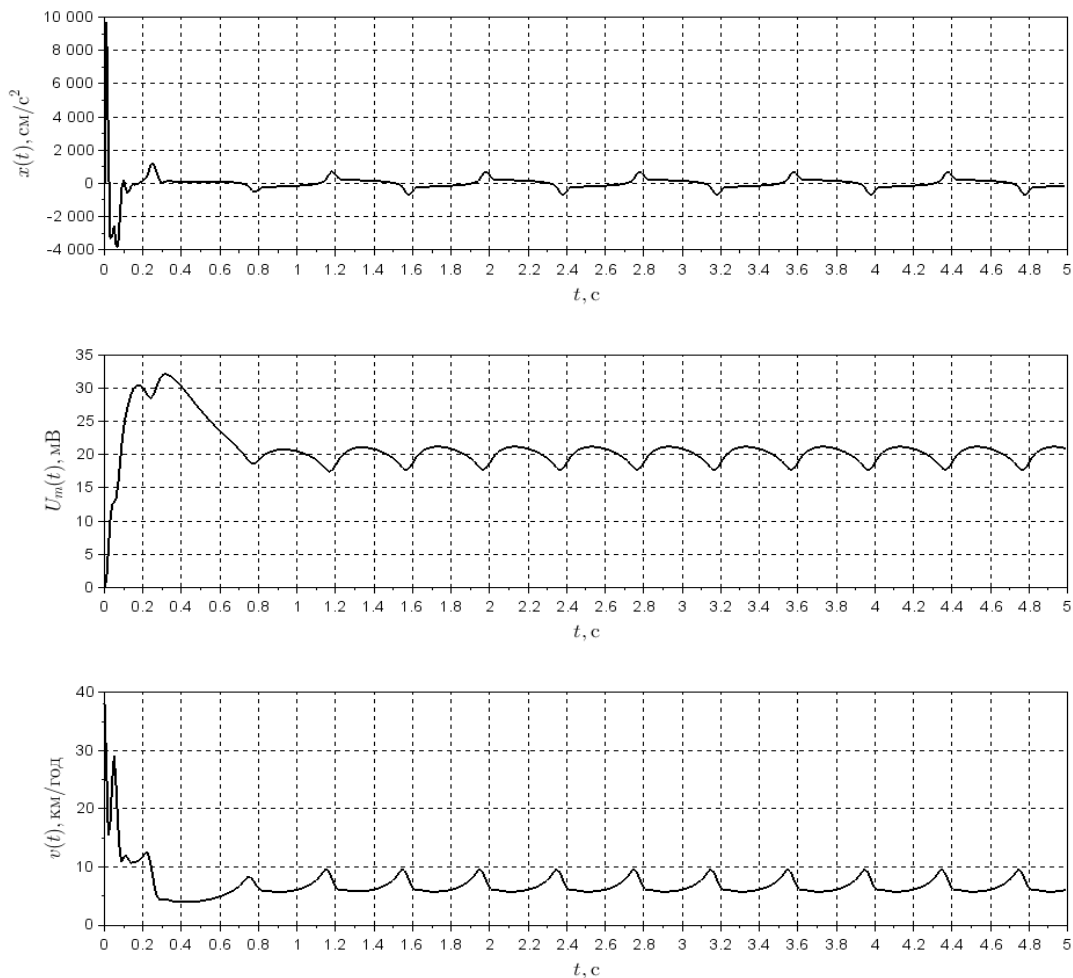


Рисунок 3.66 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи

У результаті аналізу графіків (рис. 3.66) ми визначили, що система автоматизованого управління швидкістю колісної платформи з встановленими параметрами ПД-регулятора працює стабільно. Система забезпечує плавність руху колісної платформи на ресорах та дотримується заданої напруги акселерометру шляхом зміни швидкості. Таким чином колісна платформа рухається з оптимальною швидкістю при заданих параметрів ПД-регулятора

та напруги акселерометру. При встановленій напрузі акселерометру  $U_m(t) = 20$  мВ, колісна платформа рухається зі швидкістю  $u(t) = 10$  км/год.

Зараз ми зробимо перевірку роботи системи автоматизованого управління швидкістю колісної платформи, як буде регулюватись швидкість платформи від параметру  $l$ . Побудуємо три варіанта графіків (рис. 3.67), (рис. 3.68), (рис. 3.69), щоб проаналізувати роботу системи автоматичного управління швидкістю. Для моделювання вертикальних коливань колісної платформи візьмемо наступні значення параметру довжини періоду зміни відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку:

$$l_1 = 10 \text{ м}; l_2 = 25 \text{ м}; l_3 = 50 \text{ м}; \quad (3.12)$$

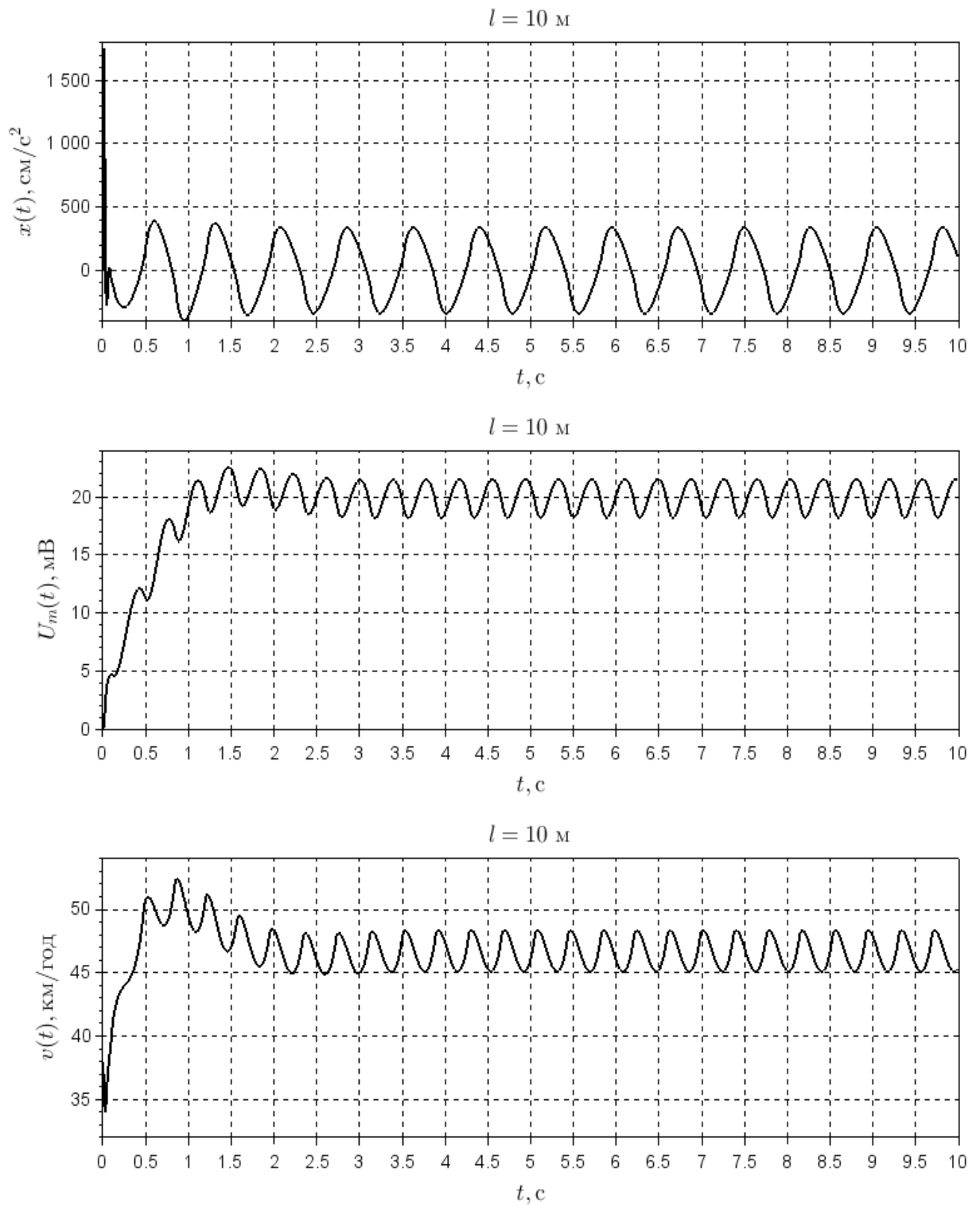


Рисунок 3.67 – Графіки прискорення вертикальних коливань,  
вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної  
платформи для  $l = 10 \text{ м}$

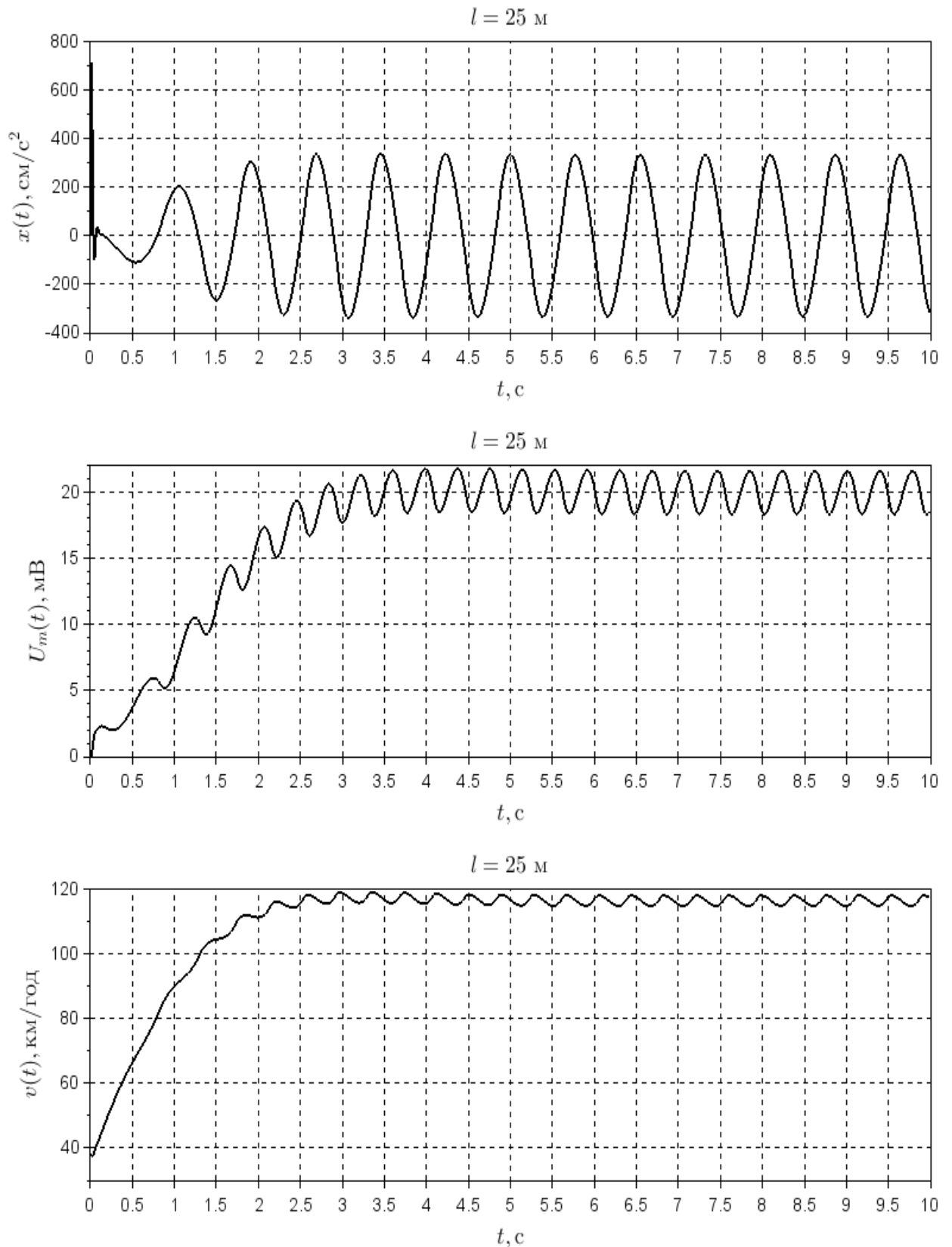


Рисунок 3.68 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $l = 25 \text{ м}$

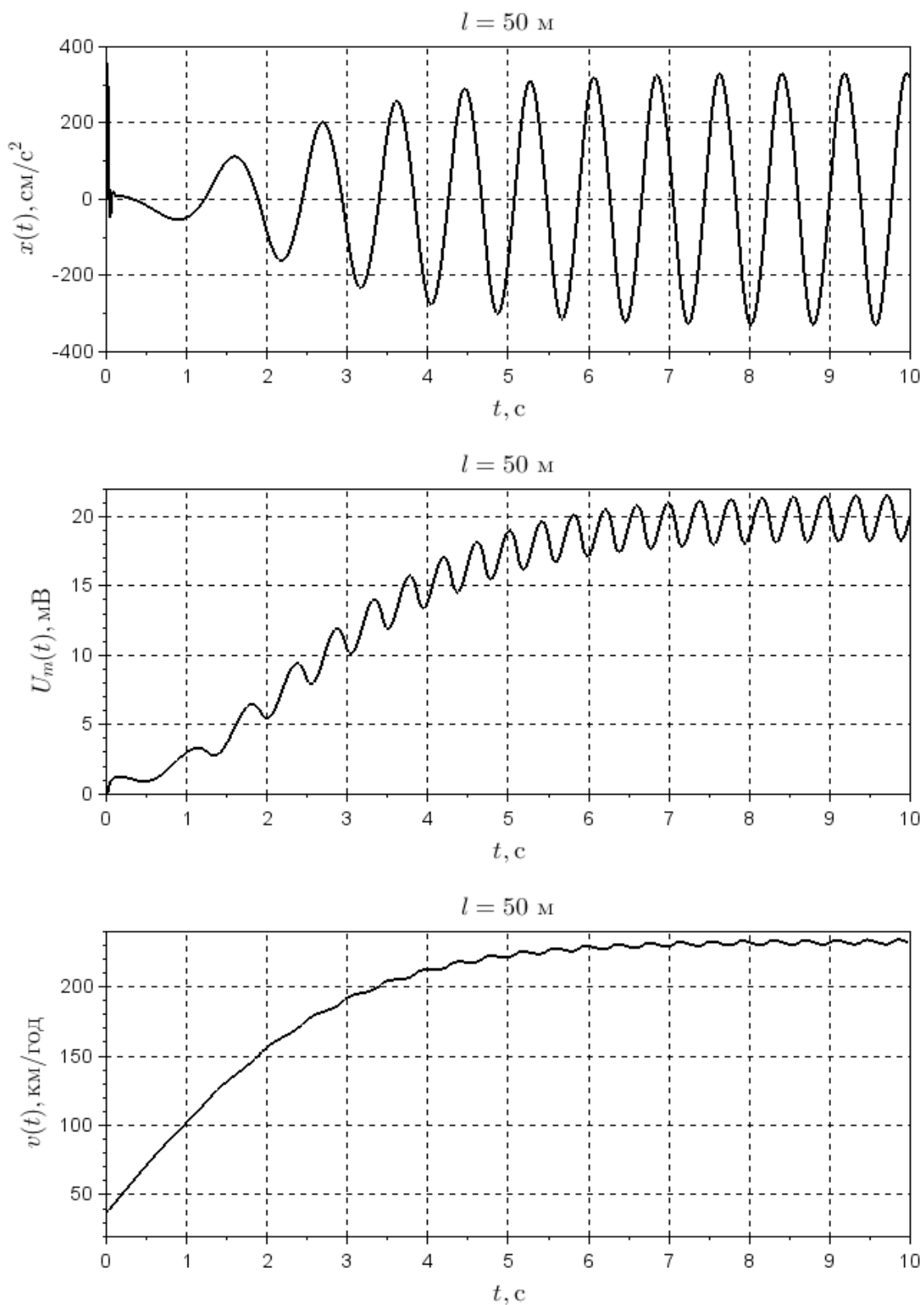


Рисунок 3.69 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $l = 50 \text{ м}$

У результаті ми визначили, що при збільшені параметру  $l$  система автоматичного керування рухом колісної платформи збільшує оптимальну швидкість. При  $U_m(t) = 20$  мВ та  $l=10$  м швидкість колісної платформи найменша з трьох варіантів параметру  $l$  і досягає 48 км/год. Чим більше довжина зміни відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку, тим більшу швидкість може розвивати колісна платформа при встановленому обмеженні напруги акселерометру. У другому випадку швидкість колісної платформи досягає 120 км/год. При  $l=50$  м колісна платформа може підтримувати плавний рух з швидкістю 220 км/год. Ми бачимо, що система автоматизованого управління швидкістю руху колісної платформи правильно регулює швидкість в залежності від довжини зміни відхилення опорної поверхні.

Переходимо до перевірки роботи системи автоматизованого управління швидкістю руху колісної платформи від значення параметру зміни відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку. Побудуємо три варіанти графіків (рис. 3.70), (рис. 3.71) та (рис. 3.72) прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $\xi_0 = 1$  см,  $\xi_0 = 2,5$  см та  $\xi_0 = 5$  см.

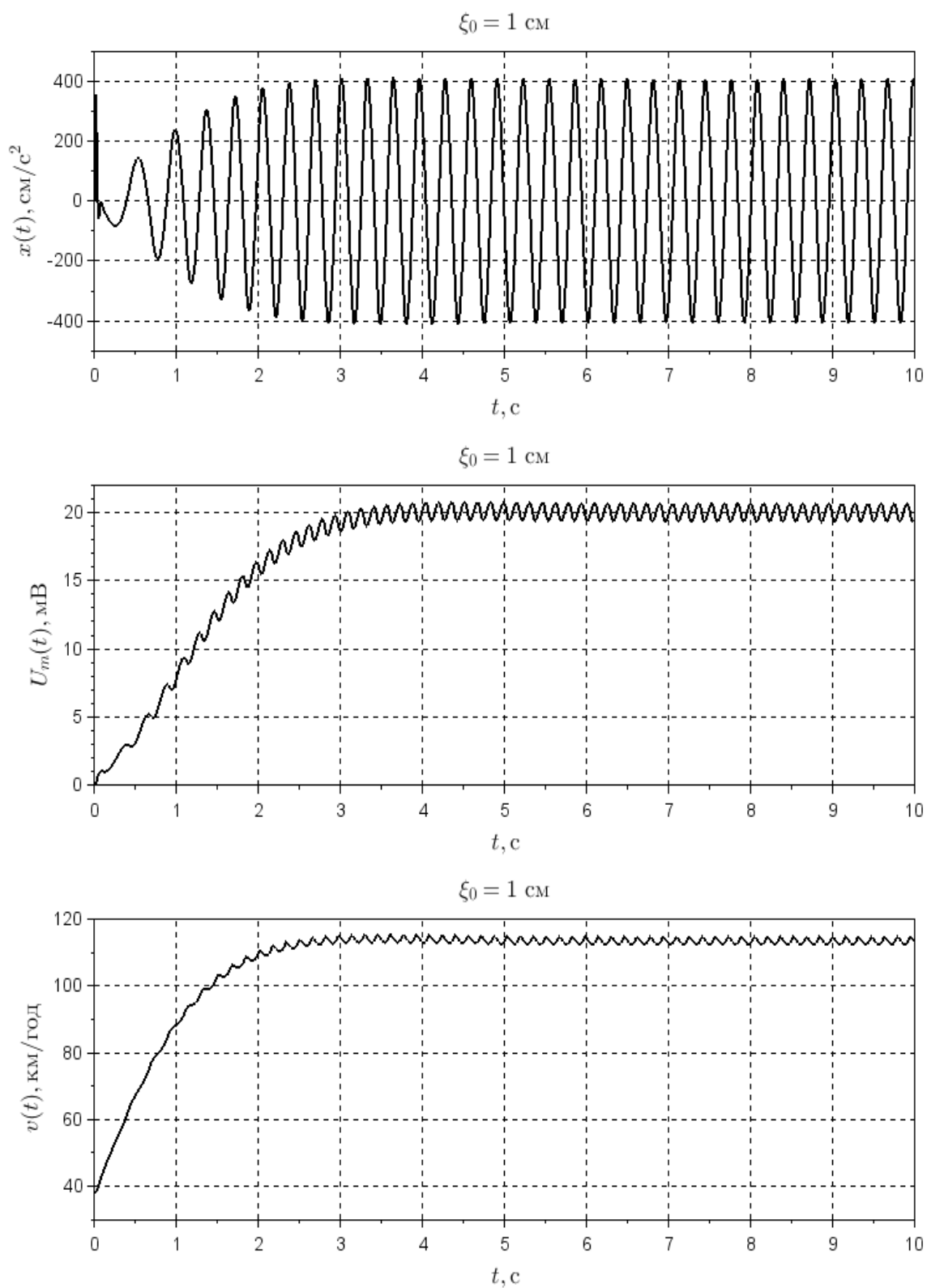


Рисунок 3.70 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $\xi_0 = 1 \text{ см}$

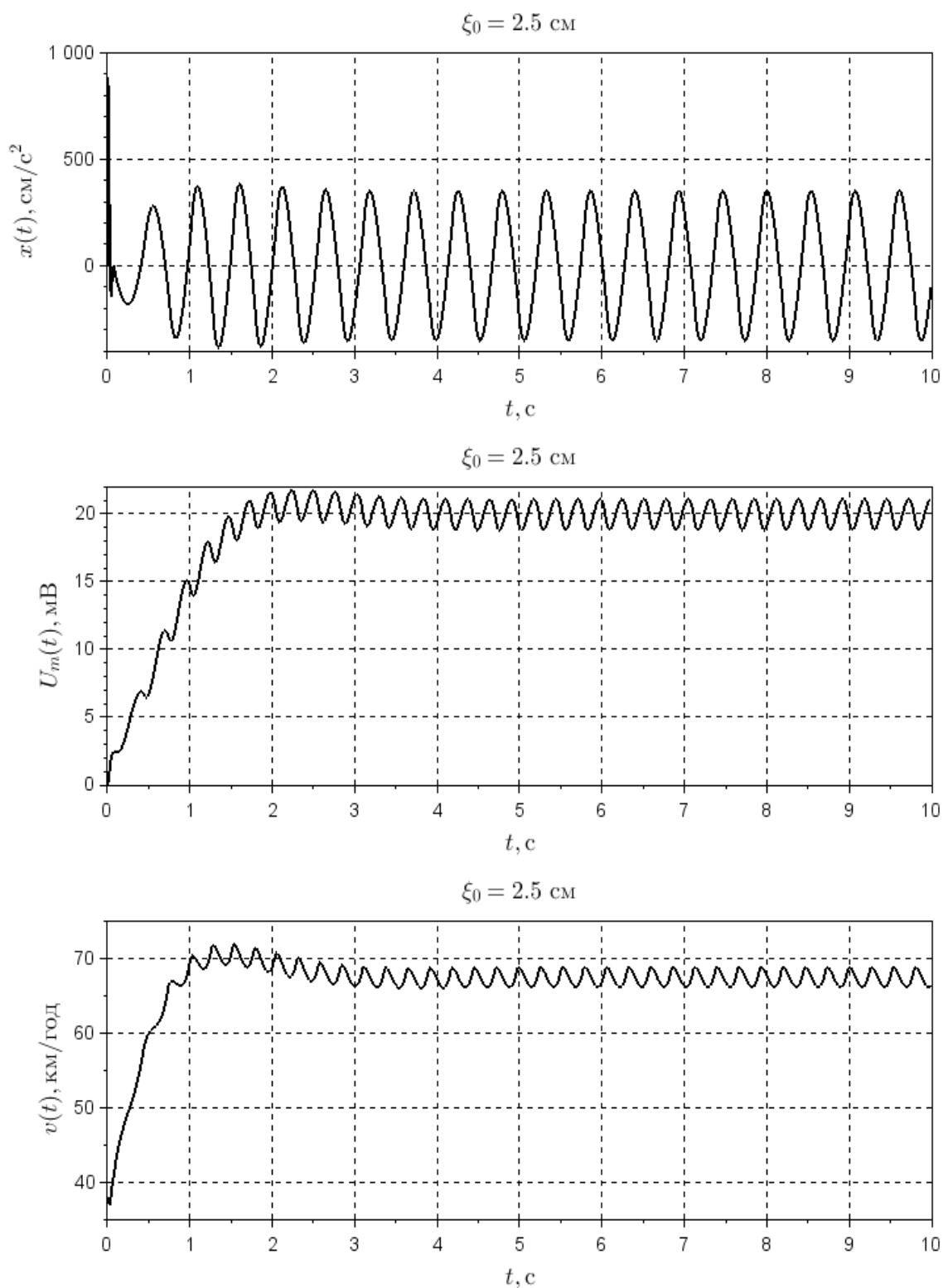


Рисунок 3.71 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $\xi_0 = 2,5 \text{ cm}$

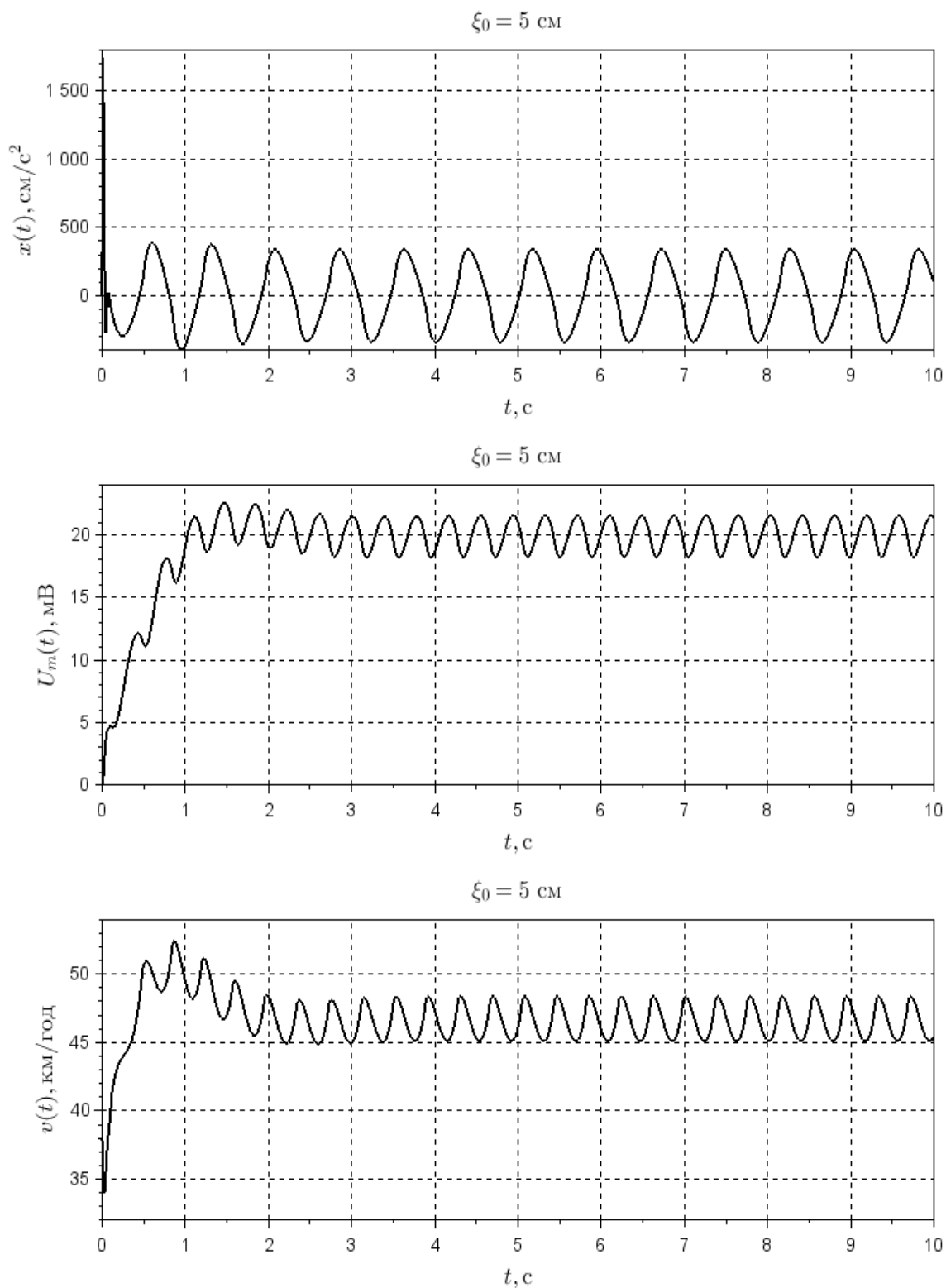


Рисунок 3.72 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $\xi_0 = 5 \text{ см}$

У результаті аналізу роботи системи автоматизованого керування швидкістю колісної платформи в залежності від зміни значення параметру  $\xi_0$  ми бачимо, що чим менше зміна відхилення опорної поверхні від горизонтальної в вертикальному напрямку, тим більшу швидкість колісна платформа може розвивати без втрати плавності руху. Система регулює швидкість правильно, при  $\xi_0 = 1$  см,  $\xi_0 = 2,5$  см та  $\xi_0 = 5$  см оптимальна швидкість з заданими параметрами становить 115 км/год, 70 км/год та 47 км/год відповідно.

В останній перевірці ми будемо встановлювати максимально допустиме значення напруги акселерометру  $U_m(t)$  та подивимось, як система автоматизованого керування швидкістю буде регулювати швидкість руху колісної платформи. Треба враховувати, що зі збільшенням максимально допустимої напруги  $U_m(t)$  відповідно збільшиться значення прискорення вертикальних коливань  $x(t)$ . Таким чином, якщо треба перевезти вантаж обережно, тоді система керування зменшить швидкість в залежності від встановленого значення  $U_m(t)$  навіть у випадку, якщо встановлена початкова швидкість руху колісної платформи буде вищою, чим оптимальна. Побудуємо графіки (рис. 3.73), (рис. 3.74) та (рис. 3.75) залежності швидкості колісної платформи від встановленого значення максимально допустимої напруги акселерометру  $U_m(t)$  при значеннях  $U_m(t) = 20$  мВ,  $U_m(t) = 5$  мВ та  $U_m(t) = 1$  мВ.

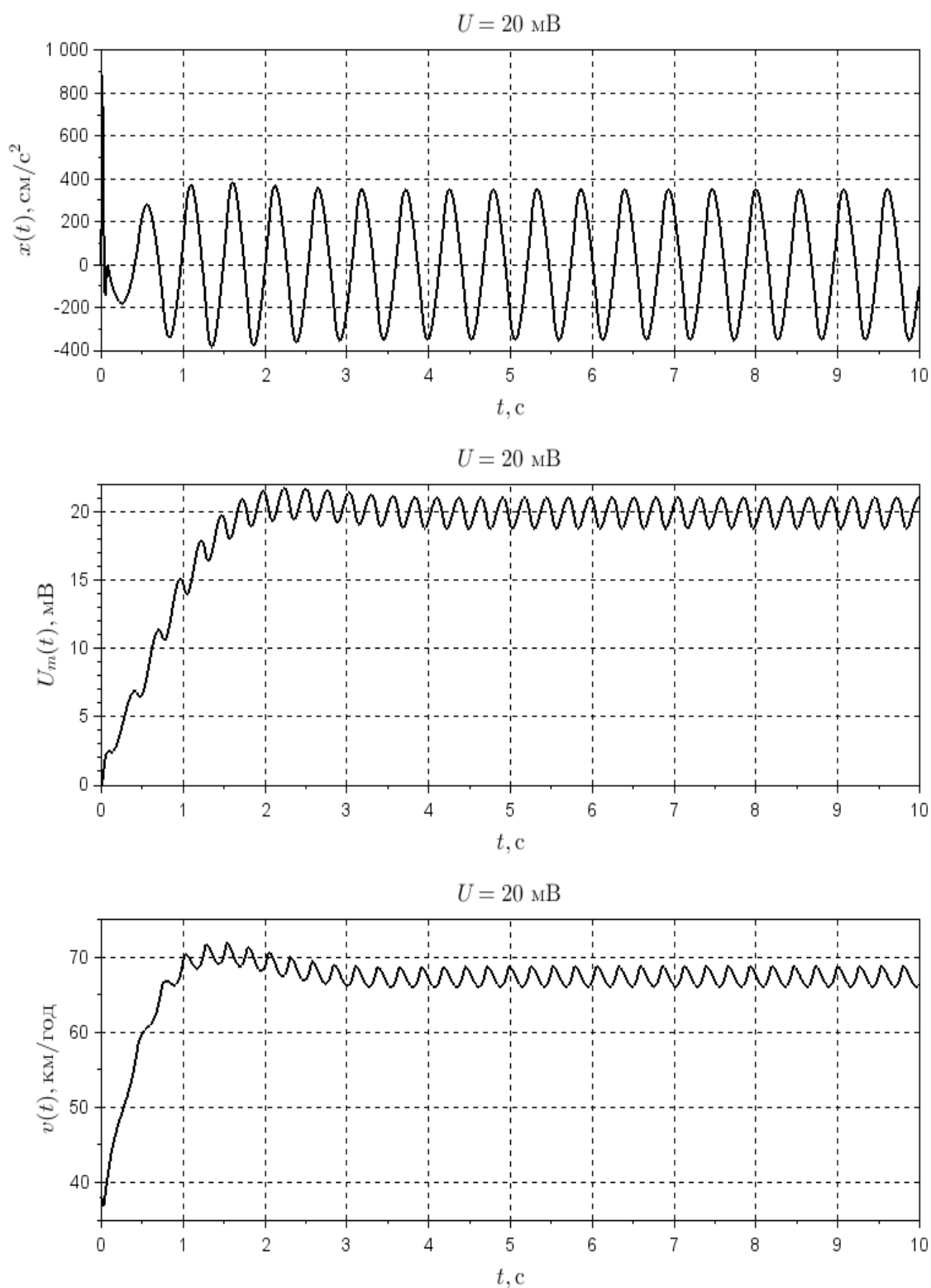


Рисунок 3.73 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $U_m(t) = 20 \text{ мВ}$

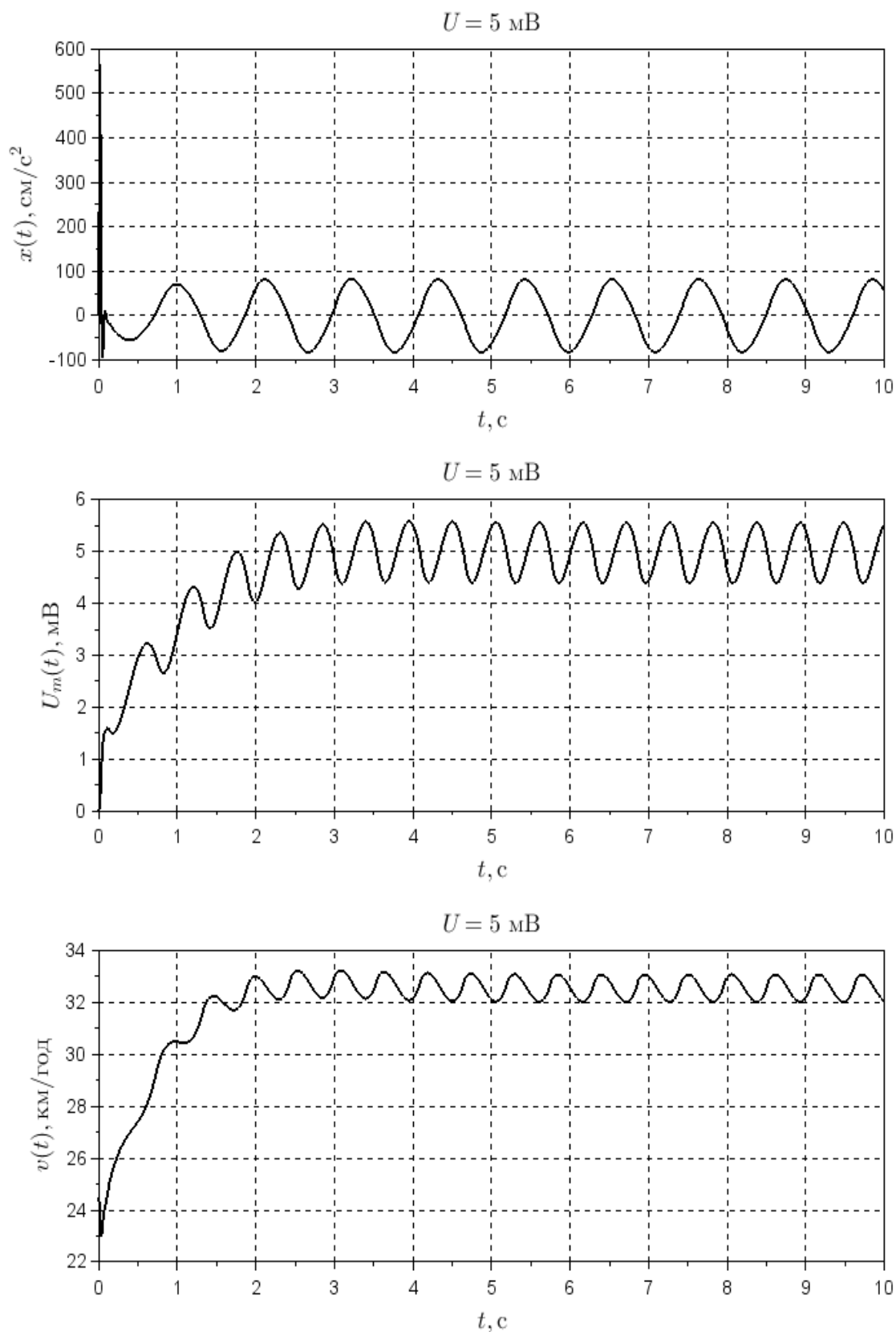


Рисунок 3.74 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $U_m(t) = 5 \text{ мВ}$

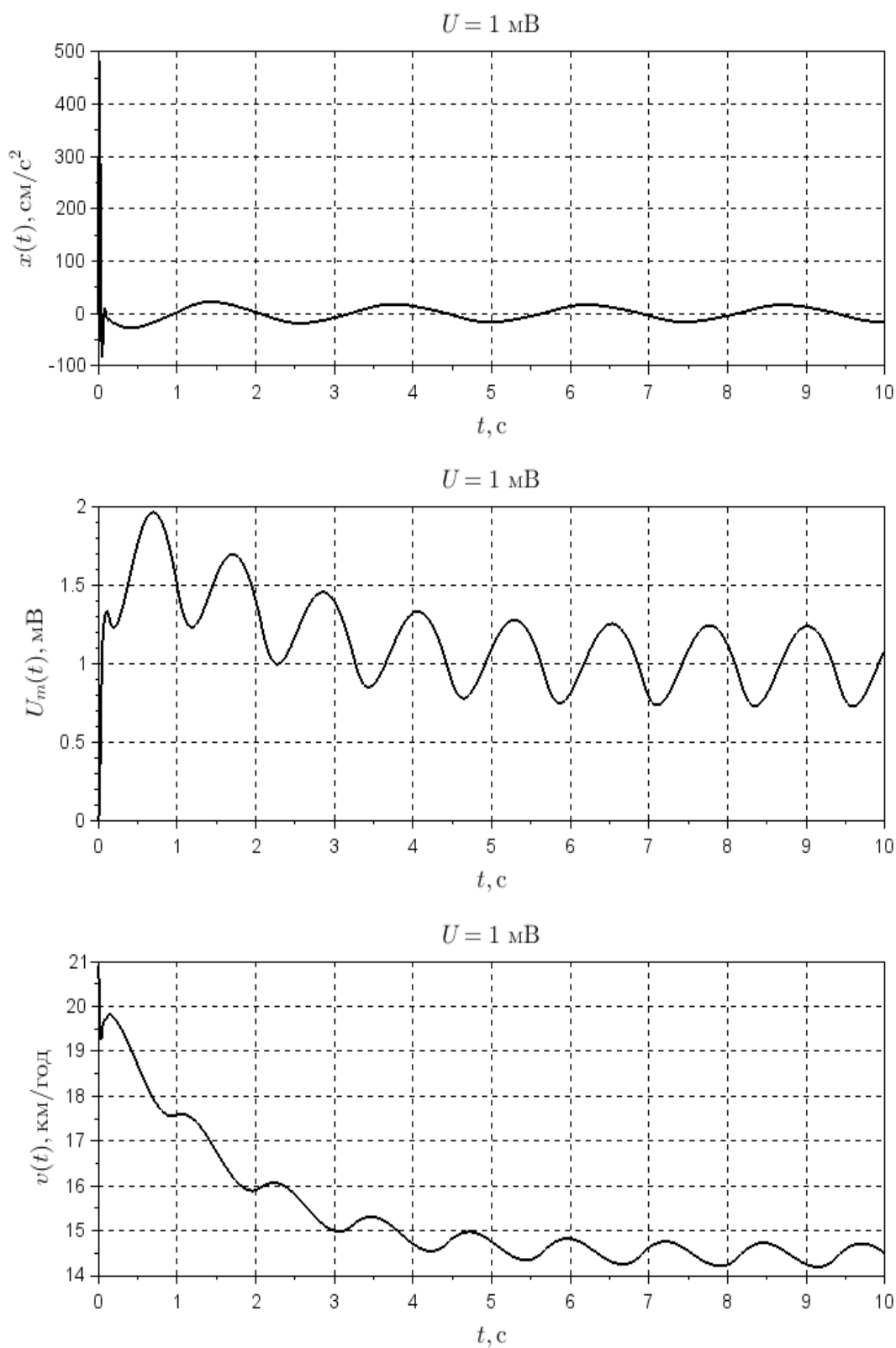


Рисунок 3.75 – Графіки прискорення вертикальних коливань, вимірюваної напруги акселерометру та оптимальної швидкості руху колісної платформи для  $U_m(t) = 1 \text{ мВ}$

З аналізу графіків (рис. 3.73), (рис. 3.74) та (рис. 3.75) ми визначили, що система автоматизованого керування колісною платформою правильно регулює швидкість від значення напруги акселерометру  $U_m(t)$ .

Таким чином збільшенням напруги акселерометру ми можемо збільшити максимально допустиму швидкість колісної платформи на основі прискорення вертикальних коливань. Система керування швидкістю руху працює стабільно та може регулюватися одночасно всіма параметрами колісної платформи на ресорах та опорної поверхні.

### 3.5 Висновки за розділом

Одержані результати досліджень щодо моделювання автоматизованого управління швидкістю руху колісної платформи з врахуванням її коливань на ресорах дозволяють зробити наступні висновки.

Важливо враховувати всі параметри колісної платформи та опорної поверхні при розробці системи автоматизованого управління рухом колісної платформи, бо кожен параметр впливає на оптимальну швидкість з якою може рухатись колісна платформа в залежності від встановлених параметрів. Граничну напругу можна встановлювати на основі властивостей вантажу, опорної поверхні та самої колісної платформи, щоб забезпечити плавність руху. Значення задовільної напруги акселерометру повинно визначатись із обчислення прискорення вертикальних коливань колісної платформи, яке буде задовільне для всіх елементів та параметрів колісної платформи. Бо якщо встановити напругу, яка перевищує потрібну, то колісна платформа буде рухатись з швидкістю руху, яка перевищує оптимальну та може бути небезпечна для вантажу або пасажирів.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці в лабораторії

Модуль автоматизованого прогнозування показників довговічності елементів конструкцій розроблявся в лабораторії розмірами: довжина 5,2 м., ширина 7 м., висота 3,2 м., площа вікон 2 м<sup>2</sup>. В приміщенні працює 2 людей. Площа приміщення становить 36,4 м<sup>2</sup>, об'єм – 116,48 м<sup>3</sup>. На одне робоче місце приходиться 18,2 м<sup>2</sup> и 58,24 м<sup>3</sup>, що відповідає нормативному документу НПАОП 0.00-1.28-10.

Схематичне представлення системи «Л–М–С» дозволяє проаналізувати дію шкідливих чинників на організм людини. Елементи системи можна розділити на такі функціональні частини:

«Людина» – робітник виробництва:

– Л1 – людина, яка управляє “машиною” для виконання основної задачі системи – виробництва продукту праці;

– Л2 – людина, як біологічний об'єкт, який безпосередньо впливає на виробниче середовище (вживання кисню, тепло- та вологовиділення);

– Л3 – людина, яка розглядається з точки зору її психофізіологічного стану.

«Машина» – прилади в приміщенні:

– М1 – машина, що виконує основну технологічну функцію;

– М2 – машина, що виконує функції аварійного захисту – (прилади, які попереджають виникнення небезпечних факторів);

– М3 – машина, яка впливає на стан виробничого середовища та людину – (вплив, обумовлений шкідливими виробничими факторами).

«Середовище» – виробниче середовище.

ПП – предмет праці.

На рисунку 4.1 приведена узагальнена структурна схема системи «Л–М–С». При аналізі конкретної системи «Л–М–С» необхідно «наповнювати» реальним змістом елементи цієї системи і зв'язки між ними [9].

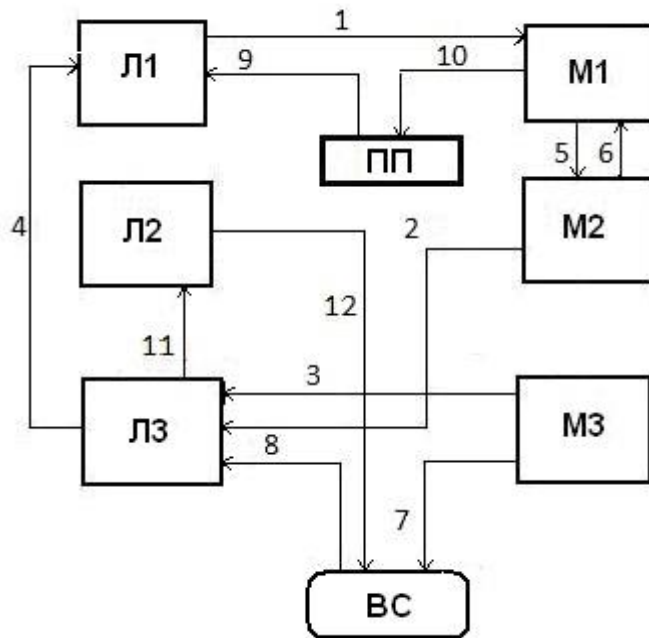


Рисунок 4.1 – Узагальнена структурна схема системи «Л–М–С»

– Л1 – М1. Вплив людини на технологічне устаткування. Працівник виконує роботу, використовує комп'ютер для написання і налагодження програми, проводить наукові дослідження, програмування тощо.

– М2 – Л3. Вплив аварійного захисту на психофізіологічний стан людини. За відсутності відповідного устаткування (система заземлення TN–С–S) працівник може бути підданий дії електричного струму. Через це працівник може отримати фобію, внутрішнє хвилювання при роботі з устаткуванням, або травму від ураження електричним струмом. Якщо ж устаткування, що виконує ці функції справно, проводиться періодичний і постійний контроль його роботи, то людина буде упевнена в своїй безпеці в процесі праці.

– М3 – Л3. Вплив устаткування на психофізіологічний стан людини (на фізичний і психічний стан). В процесі роботи підвищений рівень шуму від

устаткування викликає перенапруження слухових аналізаторів, нервові перенапруження. Перенапруження слухових аналізаторів може викликати туговухість [9]. При розвитку різних захворювань у людини пропадає інтерес до процесу праці, з'являється дратівливість, зниження імунітету.

– ЛЗ – Л1. Вплив психофізіологічного стану людини на працездатність. При розвитку різних захворювань людина не в змозі повноцінно трудитися, знижується працездатність, аж до її повної втрати. Коли людина знаходиться в роздратованому стані або коли спостерігається перенапруження аналізаторів або центральної нервової системи, працездатність падає.

– М1 – М2. Вплив технологічного устаткування на функції аварійного захисту. Механічне або електричне пошкодження.

– М2 – М1. Вплив функцій аварійного захисту на технологічне устаткування. При спрацьовуванні функції аварійного захисту технологічне устаткування вимикається.

– М3 – С. Вплив технологічного устаткування на виробниче середовище. При технологічному процесі можуть змінюватися параметри мікроклімату (підвищується температура повітря, може надходити пил в повітря робочої зони що опосередковано впливає на здоров'я працівника).

– С – ЛЗ. Вплив середовища на психофізіологічний стан людини. Робота в приміщенні з несприятливими умовами викликає роздратування, нервові розлади, що негативно впливає на працездатність.

– ПП – Л1. Вплив предмету праці на працівника. Якщо ПП не виходить, то працездатність людини може збільшитися, або навпаки – знизитися в результаті погіршення емоційного стану.

– М1 – ПП. Вплив технологічного устаткування на предмет праці.

– ЛЗ – Л2. Вплив психофізіологічного стану людини на зміну інтенсивності протікання обмінних процесів в організмі. Перенапруження аналізаторів може викликати підвищення потовиділення, споживання кисню.

– Л2 – ВС. Вплив людини як біологічного об'єкта на виробниче середовище. Підвищення потовиділення, споживання кисню може змінити параметри мікроклімату в приміщенні.

Згідно ГОСТ 12.0. 003–74 в даній системі "Л–М–С" мають місце фізичні та психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, хімічні та біологічні фактори відсутні.

Фізичні небезпечні і шкідливі фактори: підвищене значення напруги в електричній мережі, замикання якої може відбутися через тіло людини; підвищений рівень шуму; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена або знижена температура в приміщенні; підвищена або знижена відносна вологість; недолік або відсутність природного освітлення; недостатнє освітлення робочого місця.

До психофізіологічних факторів належать: нервові та емоційні перевантаження; перенапруження зорових і слухових аналізаторів; монотонність праці; розумові перенапруження [9].

Відповідно до проведеного аналізу умов праці був визначений домінуючий шкідливий виробничий фактор – недолік або відсутність природного освітлення.

#### 4.2 Промислова безпека в лабораторії

За ступенем небезпеки ураження електричним струмом згідно з ПУЕ – 2011 приміщення належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Умови, які створюють підвищену і особливу небезпеку (підвищена вологість, струмопровідний пил, струмопровідні підлоги, можливість одночасного дотику до заземлених металоконструкцій будівлі і металевих поверхонь електроприладів), відсутні.

З метою зниження небезпеки ураження людини електричним струмом проектом передбачається використання таких технічних засобів захисту:

– необхідно проводити контроль ізоляції відповідно до вимог ПУЕ – 2011. Контроль проводити між нульовим і фазним провідниками і між фазами. Опір ізоляції не менше 500 кОм на фазу. Контроль проводити не рідше 1 разу на рік при відключеному електроживленні;

– в приміщенні використовується система живлючих провідників, трифазна, чотирипровідна з глухо заземленою нейтраллю напругою до 1000 В, тому, згідно з НПАОП 40.1–1.32–01, використовується система заземлення TN–C–S типу. Всі корпуси ПЕОМ з'єднані з глухо заземленою нейтраллю джерела живлення за допомогою нульового захисного провідника. Автомат захисту вибирається за струмом короткого замикання, час відключення 0,2 с. Додатково застосовується повторне заземлення нульового проводу з метою зниження потенціалу корпусів і напруги дотику у випадках обриву нульового проводу.

#### 4.3 Пожежна профілактика в лабораторії

У приміщенні лабораторії знаходяться тверді горючі матеріали, тому за вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення слід віднести до категорії В, згідно НАПБ Б.03.002-2007. Приміщення належить до класу П – Па згідно ПУЕ–2011.

Лабораторія розташована в будівлі II ступеня вогнестійкості за ДБН В 1.1.7–2002 .

У приміщенні знаходяться ПЕОМ, які представляють собою пожежну небезпеку, тому що при підвищенні температури окремих вузлів можливо оплавлення ізоляції сполучних проводів, яке веде до замикання, що супроводжується в свою чергу іскрінням .

Причиною пожежі в лабораторії можуть бути несправність електрообладнання, руйнування ізоляції провідників, порушення правил пожежної безпеки.

Пожежна безпека в лабораторії забезпечується відповідно до ГОСТ 12.1.004 – 91, системою запобігання пожежі, протипожежного захисту та організаційно-технічними заходами.

Згідно ДБНВ.2.5.56–2010 в приміщенні встановлено точковий димовий пожежний сповіщувач ДІП-1, який контролює площу до 86 м<sup>2</sup>.

Згідно НАПБ Б03.001-2004 в приміщенні розміщені первинні засоби пожежогасіння – вуглекислотний вогнегасник ВВК–1,4 з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 1 на приміщення.

Організаційні заходи: проводиться інструктаж персоналу з пожежної безпеки; розроблено заходи щодо дій адміністрації на випадок виникнення пожежі; на видному місці розміщений план евакуації при пожежі.

#### 4.4 Висновки за розділом

Проведений аналіз умов праці в лабораторії. Досліджена промислова безпека в лабораторії та пожежна профілактика в лабораторії. Відповідно до проведеного аналізу умов праці був визначений домінуючий шкідливий виробничий фактор – недолік або відсутність природного освітлення.

Автомат захисту вибирається за струмом короткого замикання, час відключення 0,2 с. Додатково застосовується повторне заземлення нульового проводу з метою зниження потенціалу корпусів і напруги дотику у випадках обриву нульового проводу.

Організаційні заходи: проводиться інструктаж персоналу з пожежної безпеки; розроблено заходи щодо дій адміністрації на випадок виникнення пожежі; на видному місці розміщений план евакуації при пожежі.

## ВИСНОВКИ

Одержані результати досліджень щодо моделювання автоматизованого управління швидкістю руху колісної платформи з врахуванням її коливань на ресорах дозволяють зробити наступні висновки.

Важливо враховувати всі параметри колісної платформи та опорної поверхні при розробці системи автоматизованого управління рухом колісної платформи, бо кожен параметр впливає на оптимальну швидкість з якою може рухатись колісна платформа в залежності від встановлених параметрів. Граничну напругу можна встановлювати на основі властивостей вантажу, опорної поверхні та самої колісної платформи, щоб забезпечити плавність руху. Значення задовільної напруги акселерометру повинно визначатись із обчислення прискорення вертикальних коливань колісної платформи, яке буде задовільне для всіх елементів та параметрів колісної платформи. Бо якщо встановити напругу, яка перевищує потрібну, то колісна платформа буде рухатись з швидкістю руху, яка перевищує оптимальну та може бути небезпечна для вантажу або пасажирів.

Важливо визначити, що не так важлива амплітуда вертикальних коливань, як прискорення вертикальних коливань колісної платформи, бо амплітуда вертикальних коливань чутлива не до всіх параметрів колісної платформи та опорної поверхні. Вибір умов (2.55) або (2.56) визначається у процесі рішення задач з врахуванням її сенсу та умов безперечливості результатів їх сенсу. Процеси вертикальних коливань та процесів автоматизованого управління рухом колісних платформ досить складні, тому треба використовувати саме комп'ютерні технології моделювання вертикальних коливань колісної платформи. Насамперед треба визначити математичну модель вертикальних коливань колісної платформи та математичну модель акселерометру, щоб моделювання руху колісної платформи було коректним.

Керування швидкістю колісної платформи може бути зведено до визначення потрібної напруги акселерометру, яка передає прискорення вертикальних коливань колісної платформи та використання напруги акселерометру як параметру від максимально допустимого значення якого буде регулюватися швидкість колісної платформи, бо саме прискорення вертикальних коливань чутливе до всіх параметрів руху колісної платформи на ресорах.

Показано, що автоматизація управління швидкості руху колісної платформи на ресорах може регулюватися від значення прискорення вертикальних коливань, але лише за умови ретельного підбору значення напруги від якого система керуванням швидкістю руху буде підбирати оптимальну швидкість колісної платформи. Зрозумілі складності щодо узгодження вибору значень напруги акселерометру, що залежить від прискорення вертикальних коливань, яке обмежує можливості системи автоматизованого управління швидкістю руху колісної платформи, тому рекомендується ретельний підбір та аналіз всіх параметрів колісної платформи та опорної поверхні, які можуть впливати на параметр прискорення вертикальних коливань та планується розглянути у подальшому.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипченко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
2. ДСТУ 3008-15. Документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
3. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Мехатронні пристрої роботизованих систем» для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, що навчаються за освітніми програмами «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та «Системна інженерія» / Упоряд.: В.А. Андрусевич, Р. Ю. Аллахверанов, І.Ш. Невлюдов, Ш.А. Омаров, Ю.В. Ромашов. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 60 с.
4. Освітньо – професійна програма «Автоматизоване управління технологічними процесами» другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування» (Вчена рада ХНУРЕ протокол № 1 від 28.01.2021 р.) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2021/03/opp\\_autp\\_2021\\_compressed.pdf](https://tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2021/03/opp_autp_2021_compressed.pdf)
5. Невлюдов І.Ш. Основи наукових досліджень: навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, Ю. М. Олександров, А. О. Андрусевич, О. О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.

6. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації [Текст]: підручник для студентів вищих навчальних закладів / І. Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017. – 444 с.
7. Невлюдов І. Ш. Технічні засоби автоматизації: підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. І. Филипченко, Н. П. Демська, С. П. Новоселов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.
8. Невлюдов І. Ш. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень: підручник / І. Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 448 с.
9. Дзюндзюк Б. В. Охорона праці. Збірник задач: навч. посібник / Б. В. Дзюндзюк. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 236 с.
10. Sheng-li Zhang, Chang-kai Wen, Wen Ren, Bin Xie. A joint control method considering travel speed and slip for reducing energy consumption of rear wheel independent drive electric tractor in ploughing. / Sheng-li Zhang, Chang-kai Wen, Wen Ren // Energy. – 2023. – 7 с.
11. Aishe Toledo Fuentes, Martin Kipfmuller, Catherina Burghard. Stable operation of arm type robots on mobil platforms / Roberto Teti, Doriana D`Addona // Manufacturing Engineering. – 2021. – 9 с.
12. S. V. Kondakov, E. A. Gorely. Mathematic Modeling of Self-Propelled Unmanned Tracked Platform with Hydrostatic Transmission / A. A. Radionov // Procedia Engineering. – 2018. – 8 с.
13. Aswin Ramasubramanian, Robins Mathew, Inder Preet, Nikolaos Papakostas. Review and application of Edge AI solutions for mobile collaborative robotic platforms / Emanuele Carpanzano, Claudio Boër, Anna Valente // Procedia CIRP. – 2022. – 6 с.
14. Florian Pucher, Hubert Gattringer, Andreas Muller. Dynamic Parameter Identification of a Novel Motion-Mode-Changing Quasi-Omnidirectional Mobile Platform. / Rolf Findeisen, Sandra Hirche // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – 6 с.

15. W. Houtman, C. A. Lopez, S. Wang. Dynamic control of steerable wheeled mobile platforms applied to an eight-wheeled. / W. Houtman, C. A. Lopez // *Mechatronics*. – 2021. – 12 с.
16. Pinnaduwa Kulatilake, Suzanne Lacasse. Probabilistic equivalent linear soil spring stiffness analysis for gravity platforms / Pinnaduwa Kulatilake // *Computers and Geotechnics*. – 2019. – 19 с.
17. Zhihua Chen, Shoukun Wang, Kang Xu. Attitude stability Control for Multi-Agent Six Wheel-Legged Robot. / Zhihua Chen, Shoukun Wang, Kang Xu // *IFAC-PapersOnLine*. – 2020. – 6 с.
18. D. Kamesh, R. Pandiyan, Ashitava Ghosal. Passive vibration isolation of reaction wheel disturbances using a low frequency flexible space platform. / D. Kamesh, R. Pandiyan // *Sound and Vibration*. – 2019. – 11 с.
19. Офіційний сайт Wiki Scilab [Електронний ресурс]. – Електрон. текстові данні. – Режим доступу : <https://wiki.scilab.org/Documentation>. – 2022.
20. Охорона праці: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / За ред. Геврика Є.О. – Львів, 2015. – 280 с.
21. Безпека життєдіяльності людини: Навчальний посібник. – 5-те видання, стереотип. – Л.: Львів. банк. ін-т, 2018. – 216 с.