

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Дослідження робочих процесів та параметрів буферних
пристроїв мостових кранів**

Виконав: студент VI курсу,
групи 602-ММв
спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Камчатний О.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник Криворот А.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2024 року

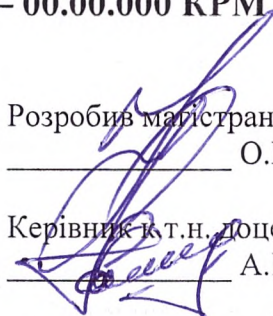
Дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів

Кваліфікаційна робота магістра

Лист затвердження

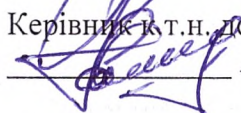
ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000 КРМ - ЛУ

Розробив магістрант групи 602-ММв

 О.М. Камчатний

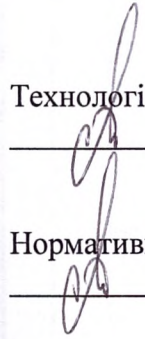
„16” 08 2024р.

Керівник к.т.н. доцент

 А.І. Криворот

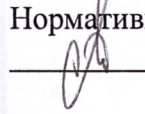
„16” 08 2024р.

Технологічний контроль к.т.н. доцент

 О.С. Васильєв

„22” 08 2024р.

Нормативний контроль к.т.н. доцент

 О.С. Васильєв

„22” 08 2024р.

Гарант освітньо-професійної програми

к.т.н., доц.

 Микола НЕСТЕРЕНКО

„16” 08 2024 р.

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри галузевого
машинобудування та мехатроніки
к.т.н. доцент



О.В. Орисенко

№ строки	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. листів	№ екз.	Примітки
1						
2			Документація загальна			
3						
4			Вперше розроблена			
5						
6	A4	ГММ.602-ММВ.009-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	-	
7	A4	ГММ.602-ММВ.009-00.00.000А	Анотація	4	-	
8	A4	ГММ.602-ММВ.009-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка	84	-	
9						
10			Документація наукова			
11						
12			Вперше розроблена			
13						
14	A4	ГММ.602-ММВ.009-00.00.000Н1	Дослідження робочих			
15			процесів та параметрів			
16			буферних пристроїв			
17			мостових кранів			
18			Презентаційні матеріали	19	-	
19						
20						
21						
22						
23						
24						

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Разр.	Камчатний			16.08
Перев.	Криворот			16.08
Н.контр.	Васильєв			22.08
Затв.	Орисенко			26.08

ГММ.602-ММВ.009-00.00.000 ВР

Дослідження робочих процесів
та параметрів буферних
пристроїв мостових кранів
Відомість кваліфікаційної роботи магістра

Літ.	Лист	Листів
Н	1	1
НУПІ, ННІІТН, 2024 р.		

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра, циклова комісія Галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри галузевого
машинобудування та мехатроніки, к.т.н., доцент
Олександр ОРИСЕНКО
«20» 03 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Камчатному Олександр Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів

керівник магістерської роботи Криворот Анатолій Ігорович, к.т.н. доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18.03.2024 р. № 309-ф.а.

2. Строк подання студентом роботи «20» серпня 2024 року.

3. Вихідні дані до магістерської роботи Технічні характеристики буферів мостових кранів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів. 2 Моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв. 3 Результати досліджень пневмогідравлічних буферів. 4 Висновки.

**5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів. – Презентаційні матеріали.**

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 18.03.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	23.05.2024 р.	
2	Обґрунтування вибраної теми	10.07.2024 р.	
3	Наукові дослідження за вказаною темою, розробка наукових плакатів	05.08.2024 р.	
4	Представлення готової роботи на кафедрі	20.08.2024 р.	

Магістрант

(підпис)

Олександр КАМЧАТНИЙ

(ім'я та прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Анатолій КРИВОРОТ

(ім'я та прізвище)

Гарант освітньої програми

(підпис)

Микола НЕСТЕРЕНКО

(ім'я та прізвище)

Анотація

О.М. Камчатний. Дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів. – Рукопис.

Магістерська робота на здобуття ступеня вищої освіти „магістр” за спеціальністю 133 – „Галузеве машинобудування”. – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024.

Розвиток сучасного промислового виробництва потребує високої ефективності та надійності вантажопідйомного обладнання, яке є невід’ємною частиною багатьох галузей, включаючи металургію, машинобудування, будівництво та транспортну логістику. Серед різноманітних типів вантажопідйомних механізмів особливе місце займають мостові крани, що використовуються для переміщення великогабаритних і важких вантажів у горизонтальній та вертикальній площинах. Ефективна робота мостових кранів наряду залежить від якості робочих процесів і конструктивних елементів, зокрема буферних пристроїв. Виконано аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів. Досліджено типи і характеристик буферних пристроїв. Проведений аналіз наукових праць, показав, що для запобігання руху маси крана в протилежному напрямку необхідно будувати буферні пристрої зі змінною жорсткістю. Це забезпечує максимальний коефіцієнт поглинання кінетичної енергії при наїзді мостового крана на буферний пристрій і значно знижує динамічні навантаження на металоконструкцію крана, підвищуючи тим самим надійність і довговічність. Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери, і при спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини, яку можна замінити на пневмоелемент із змінною жорсткістю. На основі аналізу теоретичних досліджень кранових буферних пристосувань встановлено, що гідро-пневмобуфери мають значні переваги майже за всіма робочими параметрами. Підібрано, уточнено й описано обладнання та програмне

				ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000А			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Анотація		
Розроб.	Камчатний			18.08			
Перев.	Криворот			16.08			
Н. контр.	Васильєв			22.08			
Затв.	Орисенко			26.08	Лім. Лист Листів 1 4 НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТР, 2024 р.		

забезпечення для експериментального дослідження робочих процесів пружинного та пневматичних елементів буферів. Виконано та оброблено комплекс експериментальних дослідження робочих процесів пружинного і пневматичних елементів, які показали, що процес затухання коливань у пневматичному пружному елементі при всіх досліджуваних тиска відбувається майже втричі швидше ніж у металевому пружному елементі.

Об'єм магістерської роботи складає 84 листів пояснювальної записки формату А-4 і 19 листів презентаційних матеріалів формату А4.

Ключові слова: буферні пристрої, мостовий кран, вібрація, динамічні навантаження, експериментальні дослідження.

					ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000А	Лист
						2
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Oleksandr Kamchatnyi. The bridge cranes buffer devices working and parameters processes study. - Manuscript.

Master's thesis for educational qualification level "master" in the specialty 133 – Industrial mechanical engineering – NATIONAL UNIVERSITY “YURI KONDRATYUK POLTAVA POLYTECHNIC”, Poltava, 2024.

The development of modern industrial production requires high efficiency and reliability of lifting equipment, which is an integral part of many industries, including metallurgy, engineering, construction and transport logistics. Among various types of lifting mechanisms, bridge cranes, used for moving large and heavy loads in horizontal and vertical planes, occupy a special place. The effective operation of bridge cranes directly depends on the quality of work processes and structural elements, in particular, buffer devices. An analysis of the current state and scientific and technical achievements in the field of buffer devices of bridge cranes was performed. The types and characteristics of buffer devices were studied. The analysis of scientific works showed that to prevent the movement of the crane mass in the opposite direction, it is necessary to build buffer devices with variable stiffness. This ensures the maximum coefficient of absorption of kinetic energy when the bridge crane hits the buffer device and significantly reduces the dynamic loads on the metal structure of the crane, thereby increasing reliability and durability. The most effective are the spring-hydraulic buffers, and when a spring-loaded hydraulic buffer is activated, the hydraulic braking is activated first, followed by the resistance of the spring, which can be replaced by a pneumatic element with variable stiffness. Based on the analysis of theoretical studies of crane buffer devices, it was established that hydro-pneumobuffers have significant advantages in almost all operating parameters. Equipment and software for experimental investigation of working processes of spring and pneumatic elements of buffers are selected, specified and described. A complex of experimental studies of working processes of spring and pneumatic elements was performed and processed, which showed that the process of damping of oscillations in a pneumatic elastic element at all investigated pressures occurs almost three times faster than in a metal elastic element.

					ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000А	Лист
						3
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

The volume of the master's work is 84 pages of explanatory note A-4 format, and 19 pages of the research presentation in A-4 format.

Keywords: buffer devices, bridge crane, vibration, dynamic loads, experimental studies.

					ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		4

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження робочих процесів та параметрів буферних
пристроїв мостових кранів**

Пояснювальна записка

До кваліфікаційної роботи магістра

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000 ПЗ

Полтава – 2024 року

Зміст

Вступ.....	4
1 Аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів.....	6
1.1 Конструкція систем безпеки мостових кранів.....	6
1.2 Дослідження типів і характеристик буферних пристроїв.....	8
1.3 Висновок до розділу 1.....	20
2 Моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв.....	23
2.1 Аналіз процесів при наїзді мостового крана на буфери.....	23
2.2 Масова математична модель для мостового крана при наїзді на буферні пристрої.....	26
2.2.1 Розрахункова динамічна схема (чотиримасова).....	26
2.2.2 Розрахункова динамічна схема (двомасова).....	31
2.3 Висновок до розділу 2.....	35
3 Результати досліджень пневмогідравлічних буферів.....	36
3.1 Визначення параметрів та характеристик досліджуваного пневмогідравлічного буферного пристрою.....	36
3.2 Експериментальне дослідження робочих процесів пружинного та пневматичного пружних елементів.....	43
3.2.1 Програмне забезпечення для Accelerometer Meter.....	43
3.2.2 Допоміжне обладнання для проведення експериментальних досліджень.....	50
3.2.3 Дослідження швидкості затухання коливань (вібропоглинання).....	51
3.3 Висновки до розділу 3.....	63
Висновки.....	64
Список літератури.....	65

ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Зміст		
Розроб.	Камчатний			16.08			
Перев.	Криворот			16.08			
Н. контр.	Васильєв			22.08			
Затв.	Орисенко			26.08			
					Лім.	Лист	Листів
					Н	2	2
					НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТР, 2024 р.		

Додаток А..... 67

Додаток Б..... 72

					ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		3

Вступ

Розвиток сучасного промислового виробництва потребує високої ефективності та надійності вантажопідйомного обладнання, яке є невід'ємною частиною багатьох галузей, включаючи металургію, машинобудування, будівництво та транспортну логістику. Серед різноманітних типів вантажопідйомних механізмів особливе місце займають мостові крани, що використовуються для переміщення великогабаритних і важких вантажів у горизонтальній та вертикальній площинах. Ефективна робота мостових кранів наряду залежить від якості робочих процесів і конструктивних елементів, зокрема буферних пристроїв.

Однак з практики експлуатації кранів відомо, що навіть за наявності буферних пристроїв крани під час наїзду на упор зазнають великих динамічних навантажень [1, 2]. Це призводить до пошкодження конструкції та виникнення аварійних ситуацій. При цьому через високі динамічні навантаження при зіткненні кранів і тупиків матеріальні та економічні втрати можуть бути значними через пошкодження металоконструкцій, механізмів і підкранових рейок.

Буферні пристрої мостових кранів відіграють важливу роль у забезпеченні безпечної експлуатації кранів, амортизації ударних навантажень та зменшенні динамічних впливів на конструкції кранів. Від їхніх параметрів і конструкції залежить стійкість до навантажень, безпека роботи кранів, а також зменшення зношування компонентів механізмів.

Безумовно, одним з найважливіших завдань при розробці нових і вдосконаленні існуючих вантажопідіймальних кранів, чи окремих їх конструкцій,

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.	Камчатний			16.08			
Перев.	Криворот			16.08			
Н. контр.	Васильєв			22.08			
Затв.	Орисенко			26.08			
Вступ					Лім.	Лист	Листів
					4	4	2
					НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТМ, 2024 р.		

є підвищення рівня їх безпечної експлуатації [3]. Актуальність дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв обумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки мостових кранів, що працюють у різних умовах. Незважаючи на значний прогрес у технологіях виробництва буферних пристроїв, залишаються питання, що потребують подальшого дослідження. Це, зокрема, стосується оптимізації конструктивних параметрів, вибору матеріалів, що забезпечують кращу амортизацію та довговічність пристроїв.

Метою магістерської роботи полягає в дослідженні робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів для оптимізації їхньої роботи і підвищення ефективності. У роботі будуть розглянуті різні типи буферних пристроїв, проаналізовано їхні характеристики, а також запропоновано шляхи покращення їхньої конструкції.

Для досягнення поставленої мети завдання сформульовані наступним чином:

- аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів;
- дослідження типів і характеристик буферних пристроїв;
- моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв;
- визначення параметрів та характеристик досліджуваного пневмогідравлічного буферного пристрою;
- експериментальне дослідження робочих процесів пружинного та пневматичного пружних елементів.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

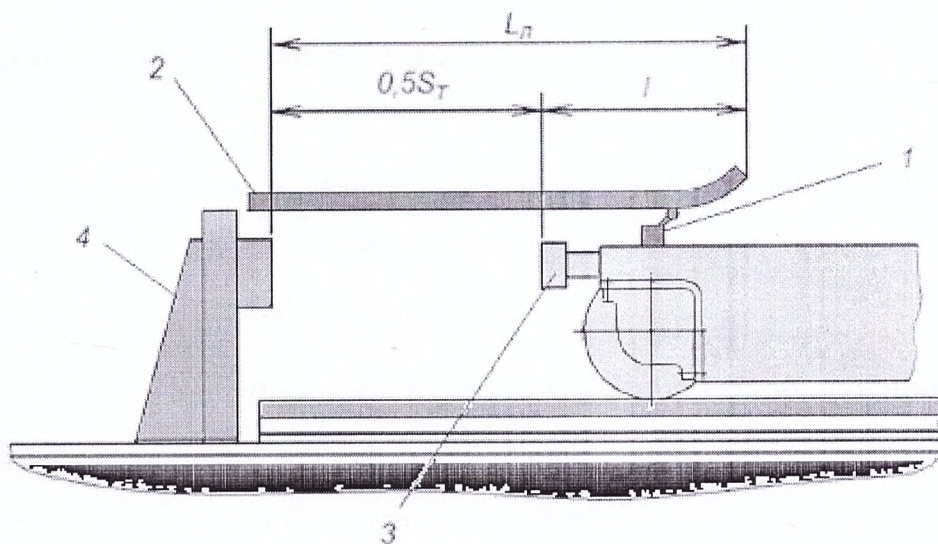
5

1 Аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів

1.1 Конструкція систем безпеки мостових кранів

Для безпечної експлуатації мостових кранів під час руху необхідно виконувати вимоги [3]: «Кінцеві вимикачі механізмів пересування кранів, візків або талів повинні бути встановлені таким чином, щоб гальмо вмикалося до положення зупинки на відстані, що дорівнює щонайменше половині гальмівного шляху механізму, а в механізмах пересування башт, козлових кранів і кранів-балок та в механізмах пересування козлових кранів і навантажувачів - таким чином, щоб гальмо вмикалося щонайменше на повну довжину гальмівного шляху.

Для реалізації сказаного іноді застосовують схему показану на рисунку 1.1.



1 – кінцевий вимикач, 2 – комутаційна лінійка, 3 – буферний пристрій,
4 – тупиковий упор [4].

Рисунок 1.1 – Система безпеки для мостових кранів

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ					Лім. Лист Листів Н 6 17		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.		Камчатний		16.08	Аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів		
Перев.		Криворот		16.08			
Н. контр.		Васильєв		22.08			
Затв.		Орисенко		26.08			
					НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТМ, 2024 р.		

Ця система захисту працює так [5]. Коли кран наближається до кінця смуги (колії), кінцевий вимикач вдаряється об лінійку, зупиняючи кран, кінцевий вимикач вдаряється об лінійку, двигун механізму пересування знеструмлюється і зупиняється. Одночасно гальмо механізму пересування замикається, і кран гальмує. У міру наближення крана до тупика його швидкість зменшується, а кінетична енергія маси крана зменшується. Коли кран контактує з тупиком, залишок кінетичної енергії крана вичерпується.

Це так повинно бути. У цьому випадку гальма мостового крана повинні бути застосовані на певній відстані від положення зупинки, не менше половини гальмівного шляху [3]. У реальних механічних системах з зазорами в з'єднаннях гальма не спрацьовують відразу після вимкнення двигуна. Процес гальмування відбувається впродовж до однієї секунди [6]. За цей час кран без гальмування переміщується на відстань

$$S = V \cdot t_{cp} \quad (1.1)$$

де t_{cp} - середній час гальмування.

В результаті мостовий кран входить в тупик (в'їзд в упор) з досить великою швидкістю.

Тому за [7] можна визначити необхідну довжину лінії L_L (рис. 1.1).

$$L \geq 0,5 \cdot S_T + l \quad (1.2)$$

де S_T – шлях крана під час гальмування, м;

l – довжина визначається розміром буфера і відстанню, яку проходить кран, коли гальма застосовані, м.

Наступним важливим елементом системи безпеки мостового крана є буферний пристрій. Буферний пристрій забезпечує нормальну роботу крана (зупинку) в разі відмови гальма або кінцевого вимикача.

Буферний пристрій складається з пружного елемента, який поглинає кінетичну енергію маси крана при контакті з упором. Поглинання енергії відбувається поступово, так що елементи і вузли конструкції крана не піддаються сильному навантаженню.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

7

Основні вимоги [8] до характеристик буферних систем:

- 1) Для забезпечення безпечної роботи крана в разі відмови інших елементів системи захисту буфер повинен поглинати всю кінетичну енергію крана;
- 2) Значна частина кінетичної енергії, що поглинається буфером, повинна бути поглинута і перетворена в іншу форму енергії, щоб при відскоку не виникали ударні явища, які також згубно впливають на конструкцію крана;
- 3) Буфер повинна мати простий, компактний дизайн і бути недорогою;
- 4) Буфер повинен бути здатним надійно працювати протягом тривалого періоду часу за будь-яких умов, включаючи мінусові температури;
- 5) Експлуатація буферу та моніторинг його стану повинні бути простими та зручними.

Залежно від способу встановлення та місця розташування, вони можуть бути мобільними (встановлюються на кран), стаціонарними (встановлюються на тупиковому упорі) або комбінованими (встановлюються і там, і там).

Залежно від типу пружного елемента буферні системи можна поділити на дерев'яні, гумові, пружинні, пружинно-фрикційні, фрикційні, гідравлічні та пружинно-гідравлічні [8].

Останньою ланкою системи безпеки в кінці колії мостових кранів є тупиковий упор. Тупикові упори встановлюються в кінці кранової рейки для запобігання сходженню крана з рейок згідно з [3]. Отже, основне призначення тупикового упору - гасити залишкову швидкість крана і запобігати сходженню з кінця кранової колії в разі виникнення аварійної ситуації [9].

1.2 Дослідження типів і характеристик буферних пристроїв

Призначення буферних матеріалів у кранах - зменшити вплив динамічних елементів після контакту металоконструкції крана з упором. Властивості

буферних матеріалів оцінюються їх енергоємністю, тобто кількістю енергії, яку буферний матеріал може накопичити або поглинути і розсіяти внаслідок пружної деформації, і коефіцієнтом поглинання, який є відношенням поглиненої енергії до енергоємності. Буферні матеріали з низьким коефіцієнтом поглинання характеризуються високим відскоком, оскільки більша частина енергії удару повертається в кінетичну енергію маси крана після стиснення буферного матеріалу [10].

У розділі 1.1 було показано принцип роботи кінцевих вимикачів. Протягом часу пересування S (швидкість руху крана) зменшується до наступних значень

$$V = \sqrt{V_n^2 - 2 \cdot a \cdot S} = 0,707V_n \quad (1.3)$$

де V_n – кранова номінальна швидкість пересування, м/с;

a – уповільнення крана, в процесі гальмування, м/с².

Буфери з твердих порід дерева (набори дубових, букових і кленових стрижнів) можуть поглинати лише невелику кількість кінетичної енергії. Вони використовуються на ручних кранах з низькою вантажопідйомністю, коли швидкість пересування невелика. Дерев'яні буфери (тупикові упори, рис. 1.2) майже завжди використовуються в поєднанні з іншими, більш ефективними типами буферів, встановлених на крані.

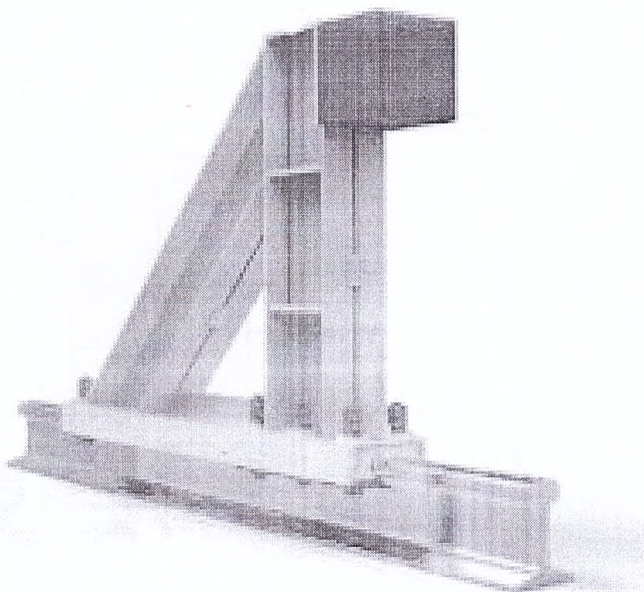


Рисунок 1.2 – Ударний буферний пристрій з дерев'яним брусом

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

9

Гумові буфери (бампери якщо встановлені на крані) (рис. 1.3) є найпоширенішими завдяки простоті конструкції, компактності та зручності використання.

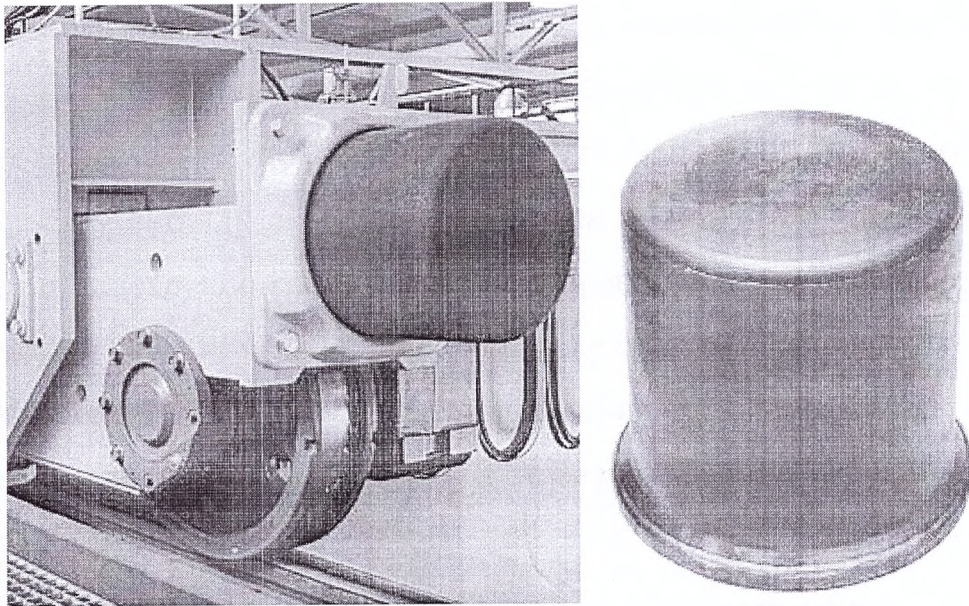


Рисунок 1.3 – Гумовий бампер (буфер)

Більша частина кінетичної енергії рухомої маси (30-50%) поглинається гумовим амортизаційним матеріалом за рахунок внутрішнього тертя. В результаті досягається низький рівень відскоку. Гумові подушки використовуються також у вигляді наборів окремих пластин (рис. 1.4). Це збільшує енергоспоживання пристрою і зменшує відскок.

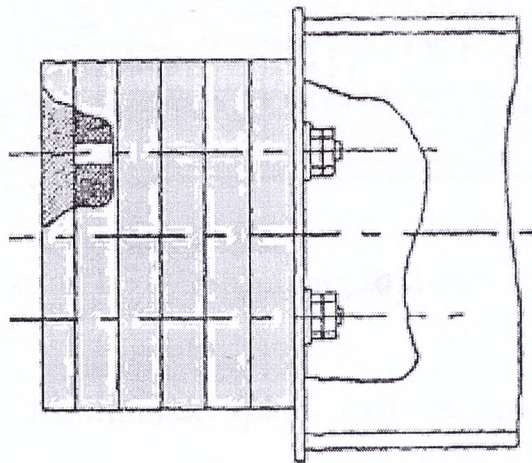
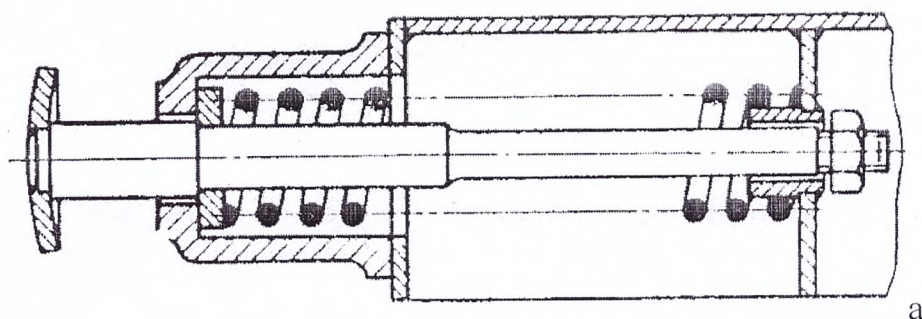


Рисунок 1.4 – Гумовий буфер з набірних пластин

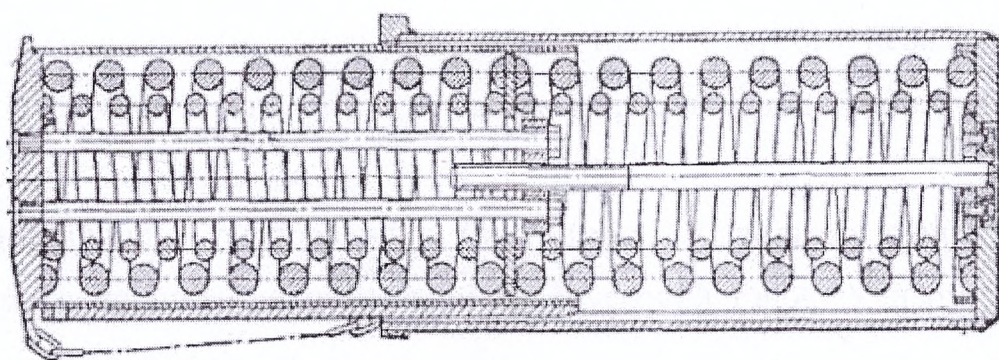
Обмеженням використання гумових амортизаторів є висока швидкість пересування крана, розмір крана, вантажопідйомність і проліт.

Пружинні буфери (рис. 1.5 а) широко застосовуються в кранобудуванні завдяки своїй (переважно) простій конструкції. Робота буферів пружинного типу придатна в будь-яких кліматичних (температурних) умовах. Недоліком пружинних буферів є те, що позиційна енергія зберігається стиснутою пружиною і повертається у вигляді сильного відскоку після зняття зусилля. Це спричиняє пошкодження конструкції крана, особливо вібрацію вантажу на талевому канаті.

Пружинні буфери мають відносно низьке енергоспоживання і у той же час, буфери, розраховані на великі навантаження, збираються з декількох пружин, що працюють паралельно (рис. 1.5 б), що призводить до збільшення габаритів і власної ваги буфера.



а



б

Рисунок 1.5 – Буфери пружинного типу

Пружинні фрикційні відбійники (рис. 1.6) мають високий коефіцієнт поглинання (0,6-0,7). Як наслідок, відскік відбувається плавно і без поштовхів.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

11

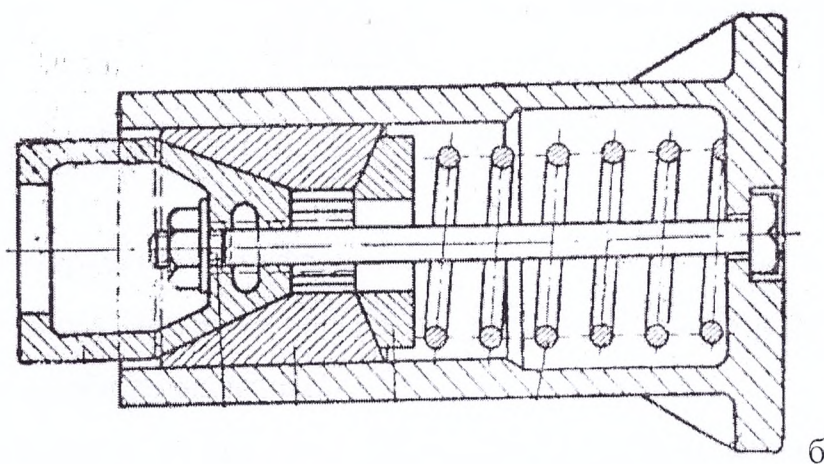
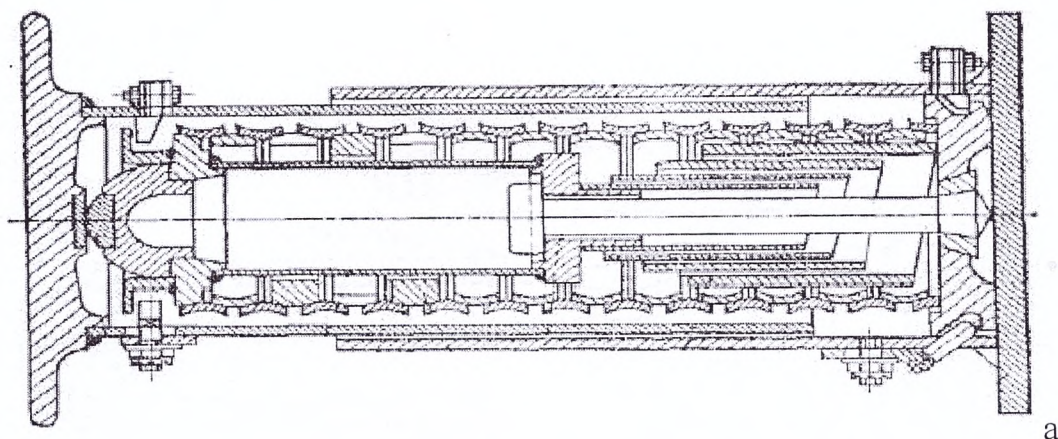


Рисунок 1.6 – Буфери пружинно-фрикційного типу

Недоліком є дороговизна, складність проектування та виготовлення компонентів. Це призводить до підвищення вартості. Крім того, невизначеність у визначенні сил тертя в конструкції ускладнює проектування і розрахунок таких буферів.

Найефективнішим є гідравлічний буфер (рис. 1.7), в якому рідина протікає через отвори в поршні при натисканні на спусковий гачок. У цьому випадку кінетична енергія витрачається на роботу потоку рідини і майже повністю перетворюється на тепло.

Тому гідравлічний буфер працює без люфту, що є його основною перевагою. Вони також мають високу енергоємність при обмежених розмірах і коефіцієнт всмоктування, близький до 1.

Гідравлічні буфери також дуже корисні тим, що величину опору руху

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

12

поршня можна регулювати.

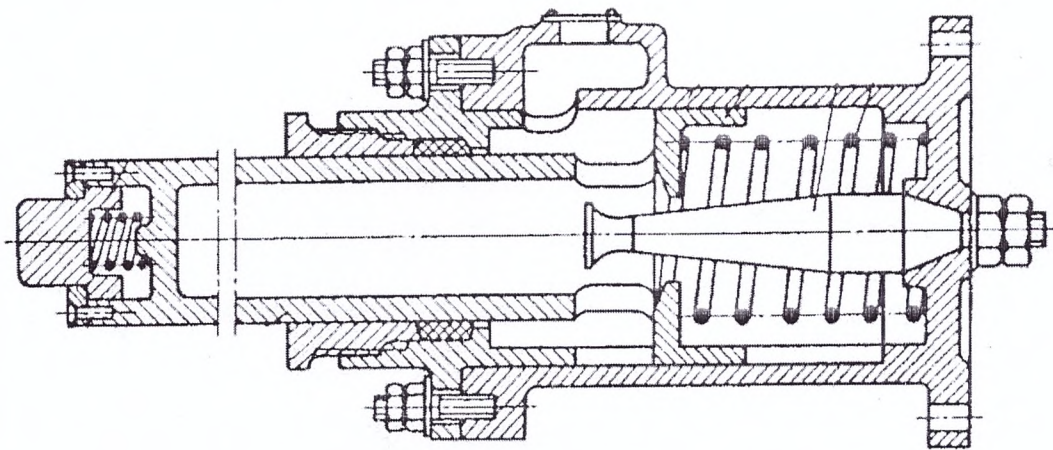


Рисунок 1.7 – Буфер гідравлічного типу

До недоліків гідравлічних буферів можна віднести складність конструкції, можливі втрати через витік гідравлічної рідини і необхідність особливо ретельного огляду та обслуговування.

Фрикційні буфери з роликівими (кульковими) тілами кочення (рис. 1.8) здатні поглинати велику кількість енергії і працювати без люфту і без віддачі.

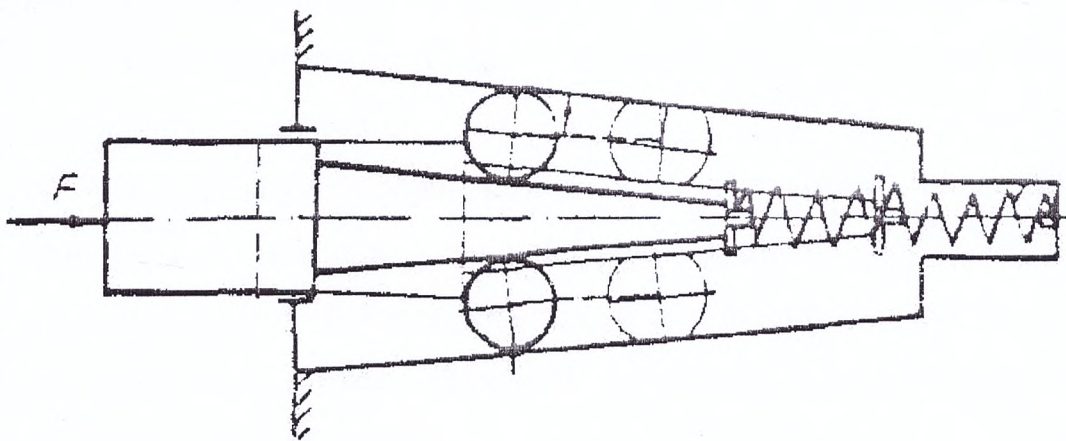


Рисунок 1.8 – Буфер фрикційний з тілами кочення

Однак фрикційні буфери складні в конструкції, дорогі і схильні до відмов, таких як самоіндукція, особливо в рухомих частинах.

Ефективною конструкцією композитних (комбінованих) буферів є також

пневматичні або пневмогідравлічні буфери, основними компонентами яких є гідроциліндр і пневматичний акумулятор (рис. 1.9).

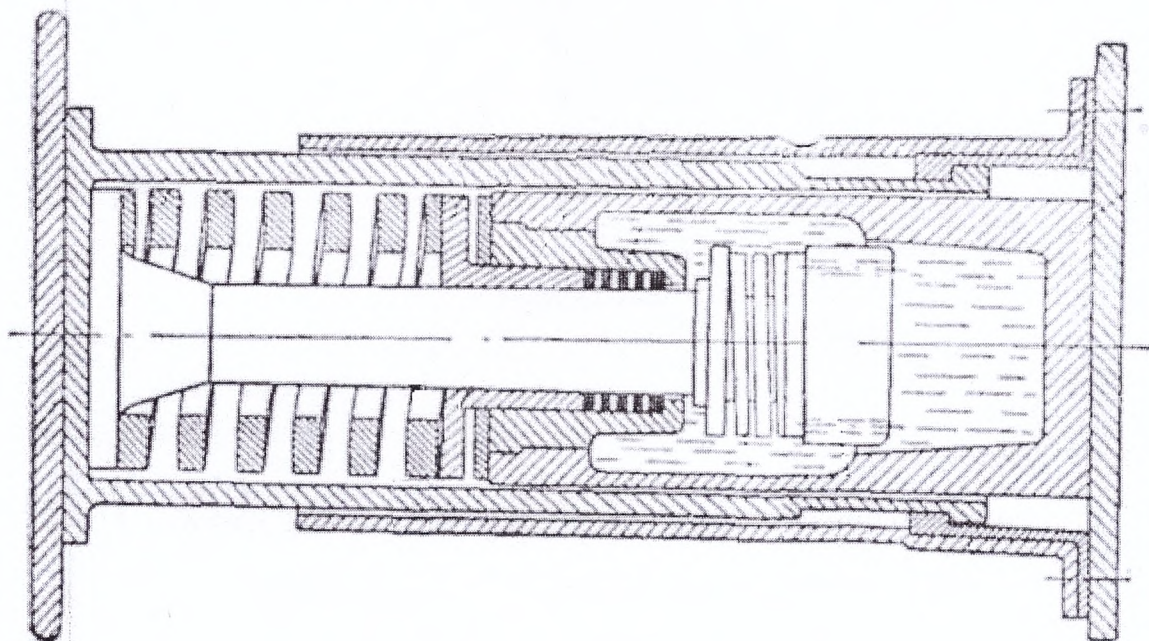


Рисунок 1.9 – Буфер пневмогідравлічного типу

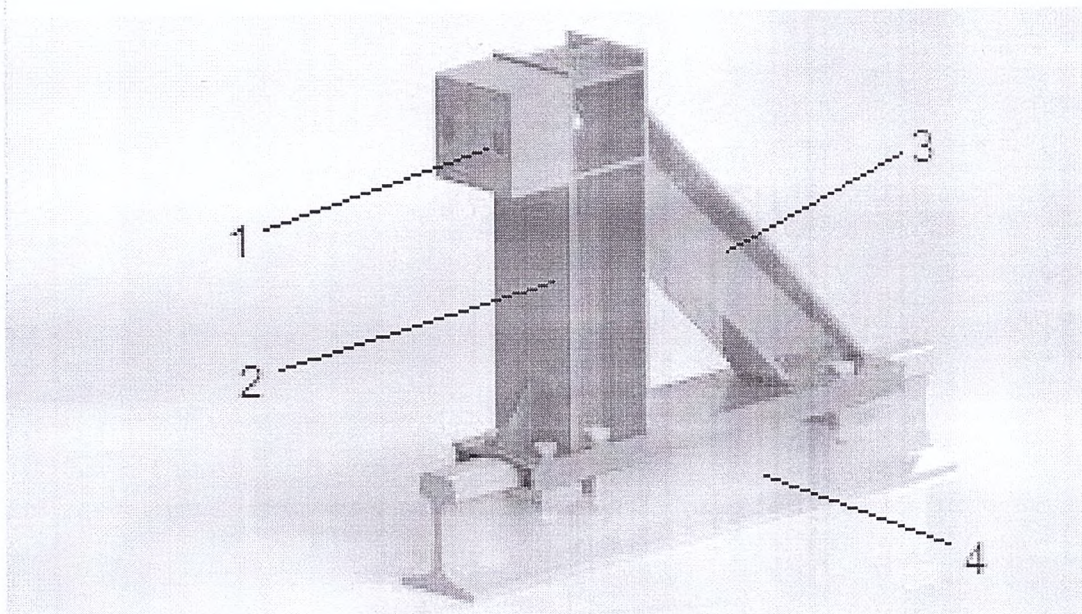
Такі буфери характеризуються плавним спрацьовуванням і відсутністю різкої віддачі. Недоліками пневматичних відбійників є складність їхньої конструкції та висока вартість матеріалів, необхідних для забезпечення їхньої працездатності під час експлуатації.

До цього були розглянуті буферні механізми з їх перевагами та недоліками, а ще велику роль у безпеці мостових кранів відіграють тупикові упори.

Отже, у кранобудуванні застосовують три типи тупикових упорів [9]:

- ударні (дерев'яні, гумові, пружинні, пружинно-фрикційні, пружинно-фрикційні, гідравлічні та композитні);
- безударні (гравітаційні та фрикційно-гравітаційні);
- тупикові упори.

Тупикові упори (ударного типу) показаного на рисунку 1.10.



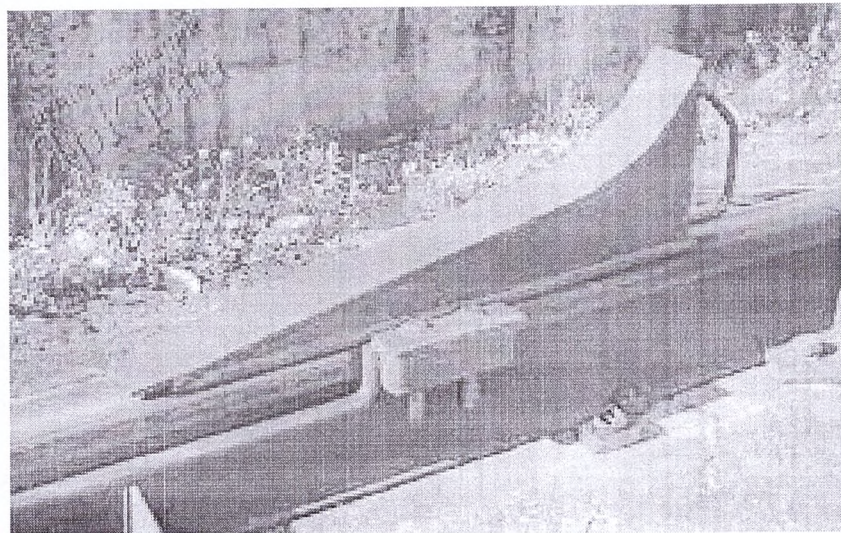
1 – буфер, 2 – стійка, 3 – косинець, 4 – рельс або опорна плита

Рисунок 1.10 – Тупиковий упор ударного типу

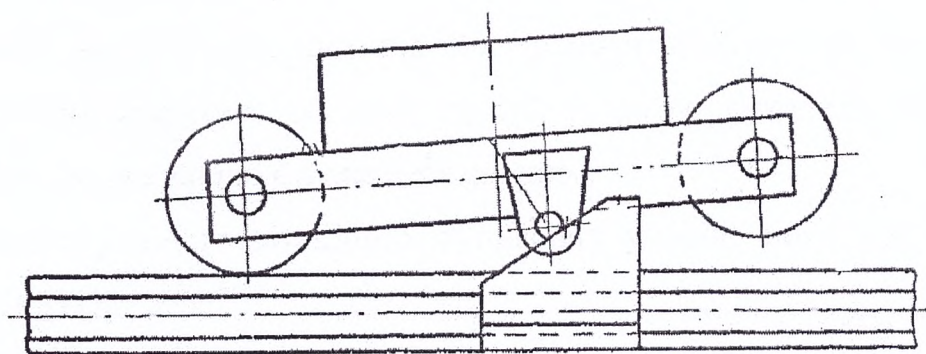
Основний недолік ударних упорів полягає в тому, що кран значно сповільнюється при зіткненні з упором. За відсутності буферного пристрою, в разі його несправності або виходу з ладу, уповільнення кінцевої балки мостових кранів може становити від 10 до 30 м/с², що значно перевищує нормативне значення в 4 м/с². Якщо швидкість крана в момент зіткнення з зупинним пристроєм досить висока, то динамічні навантаження, що виникають в результаті удару, негативно впливають на всю металоконструкцію крана і опорну конструкцію крана.

Безударні тупикові упори (рис. 1.11) характеризуються тим, що при наїзді крана на упор не відбувається ніякого удару.

Це означає, що кінетична енергія крана перетворюється не в ударну пружну деформацію буферного матеріалу, а в іншу форму енергії, наприклад, в потенційну. Безударні тупикові упори поділяються на гравітаційні (а на рис. 1.11) і фрикційно-гравітаційні (б на рис. 1.11) [9].



а



б

Рисунок 1.11 Тупикові упори безударного типу

Процес уповільнення крана при наїзді на гравітаційний уповільнювач безударного типу розписано нижче, а схема цього процесу наведена на рисунку 1.12.

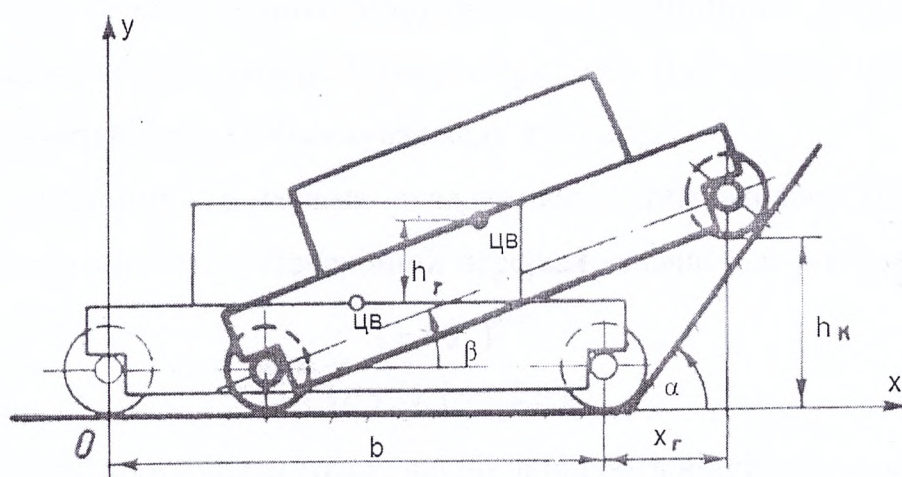


Рисунок 1.12 – До розрахунку гравітаційного гальмування

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

16

Цей процес ґрунтується на тому, що коли кран зупиняється на мертвій точці, кінетична енергія рухомого крана перетворюється на потенційну, оскільки центр мас піднімається на певну висоту, яку можна виразити наступним рівнянням.

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = m \cdot g \cdot h_K \quad (1.4)$$

де V – швидкість крана, що рухається, м/с,

m – маса, т,

h_K – висота підйому крана при наїзді на упор, м,

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Слід також враховувати, що під час роботи електродвигун механізму пересування може вдарятися об упор крана, а також виходити за габарити упорного пристрою крана, що є дуже небезпечним.

Відома конструкція гравітаційних тупикових упорів, які є продовженням кранових рейок [11].

У першій частині профіль такого упору описується кубічною параболою

$$y = 0,22 \cdot x^3, \quad (1.5)$$

що змінюється по колу радіусом 1250 мм. При цьому для мостового крана вантажопідйомністю 300000 Н висота такого упору становить 800 мм, а його довжина (горизонтальна проекція) 1440 мм. На рисунку 1.11а, показана така конструкція упору.

Використання гравітаційного упору замість традиційного ударного усуває необхідність встановлення буфера крана, зберігаючи при цьому інші елементи традиційної системи безпеки (обмежувач ходу, гальмо).

Профіль гравітаційного гальма складається з тимчасового (перехідного) перерізу та робочого перерізу. Перехідний переріз визначається рівнянням.

$$y_1 = \frac{(x + x_0)^{n+2}}{(n+1) \cdot (n+2) \cdot a}, \quad (1.6)$$

де x – поточні координати точок, які відповідають відрізкам профілю, м;

x_0 – абсциса початкової точки перехідного відрізка, м;

n – показник ступеня перехідної кривої профілю;

a – параметр перехідної кривої профілю;

Для визначення довжини робочої ділянки, на якій досягається мінімальний гальмівний шлях крана використовують

$$y_2 = x \cdot \operatorname{tg} \alpha_0 \left(1 + \frac{x}{2b \cdot \cos^2 \alpha_0} \right) \quad (1.7)$$

де b – база крана, м.

α_0 – найбільш допустимий кут нахилу до горизонту крана, град.

Дослідження і досвід експлуатації показали, що при низьких швидкостях пересування крана (макс. до 60 м/хв) достатньо використовувати лише перехідну частину профілю гравітаційного тупикового упору.

Недоліками гравітаційних тупикових упорів є

- великий лінійний розмір обмежувача значно зменшує площу обслуговування в кінці шляху крана;

- неконтрольоване повернення крана на значну відстань після спрацювання упору (до 10... 12 м) викликає незручності в роботі;

- при використанні гравітаційних упорів необхідно змінити конструкцію ходового механізму крана, щоб він міг проходити через профіль гравітаційного упору.

При використанні фрикційних гравітаційних гальм ці недоліки усуваються [12]. В цьому випадку розміри тупикового упору значно менші, а шлях реверсу – до 0,5 м. Таке зменшення габаритів упору і шляху реверсу крана стало можливим завдяки використанню методів фрикційного гальмування, де частина кінетичної енергії витрачається на подолання тертя в опорі і опору при наїзді на профільований упор. Зняття крана з ведучих коліс і, таким чином, розрив контакту ведучих коліс з рейками також сприяє мініатюризації. У цьому випадку кран ставиться на профільний упор з додатковою опорою. На рисунку 1.11, б показана така конструкція упору.

На рисунку 1.13 показано схему, яка описує процес гальмування фрикційно-гравітаційного типу.

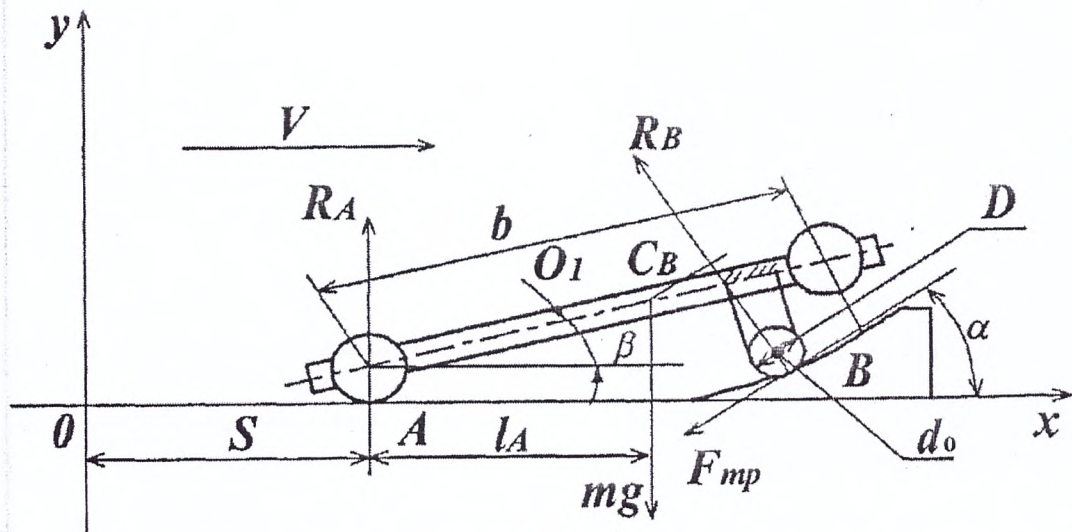


Рисунок 1.13 – Схема опису процесу гальмування фрикційно-гравітаційного типу.

Рівняння для визначення параметрів фрикційно-гравітаційної упору.

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = m \cdot g \cdot h_{\text{цм}} + m \cdot g \cdot \left(\frac{f \cdot d_0 + 2 \cdot k}{D} \right) \cdot l, \quad (1.8)$$

де h – висота підйому центра мас, м;

l – шлях тертя, м;

f – коефіцієнт тертя в опорі між роликом і віссю;

k – коефіцієнт тертя ролика;

d_0 – діаметр осі, м;

D – діаметр ролика, м.

Ліва частина рівняння (1.8) представляє кінетичну енергію крана, що рухається вільно (без впливу приводу), тоді як права частина враховує потенційну енергію і роботу, необхідну для подолання тертя.

У той же час, велике значення відношення $\frac{d_0}{D}$, що досягає 0,8 і малий коефіцієнт тертя k , важливим є другий член цього рівняння.

Конструкція комбінованих тупикових упорів давно відома (рис. 1.14) і

відповідно вже довгий час експлуатується

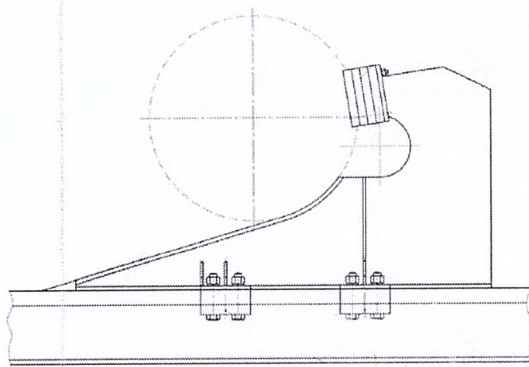


Рисунок 1.14 – Комбінований упор тупикового типу

1.3 Висновок до розділу 1

Довгий час експлуатації мостових кранів показав, що обов'язковість встановлення захистів, пов'язана з виникненням аварійних ситуацій, і система безпеки крана на кінці лінії відіграє важливу роль у забезпеченні безпечної роботи крана. Дуже важливим елементом конструкції мостового крана є буферні кранові пристрої, функція яких полягає в поглинанні кінетичної енергії крана і забезпеченні його безпечної та надійної роботи навіть при відмові інших елементів системи захисту. Це також показали експериментальні дослідження виконані на лабораторному обладнанні мостового крана лабораторії мехатроніки при використанні вібрографа GM63A. Фото дослідів наведено на рисунках 1.15-1.17.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

20

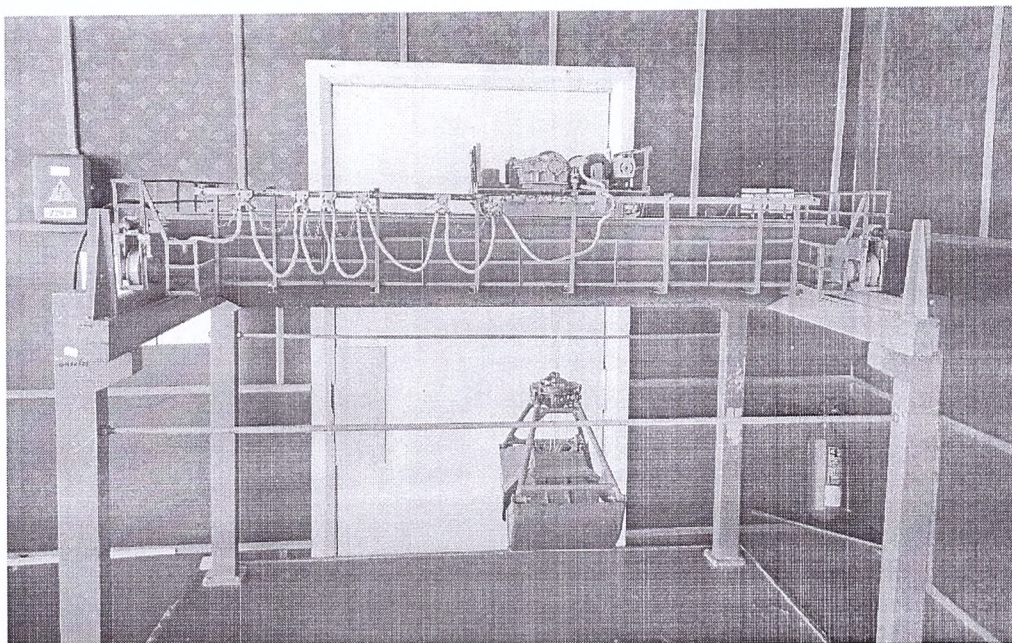


Рисунок 1.15 – Макет мостового крана

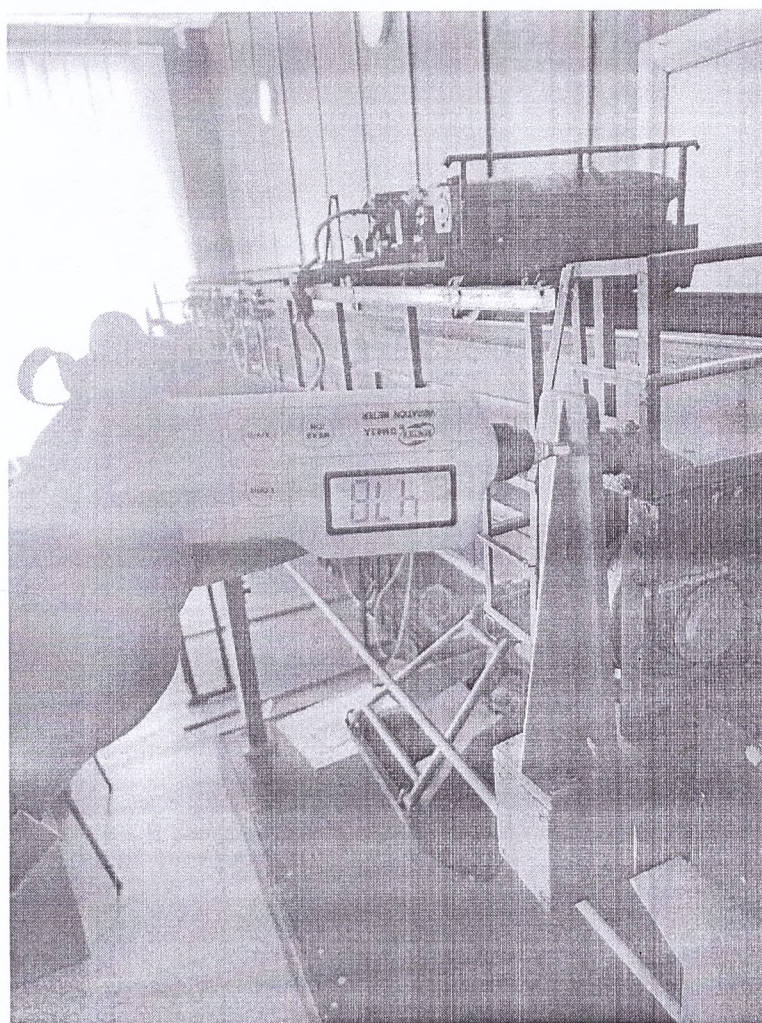


Рисунок 1.16 – Процес замірів горизонтальних вібронавантажень при наїзді крана на опору

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

21

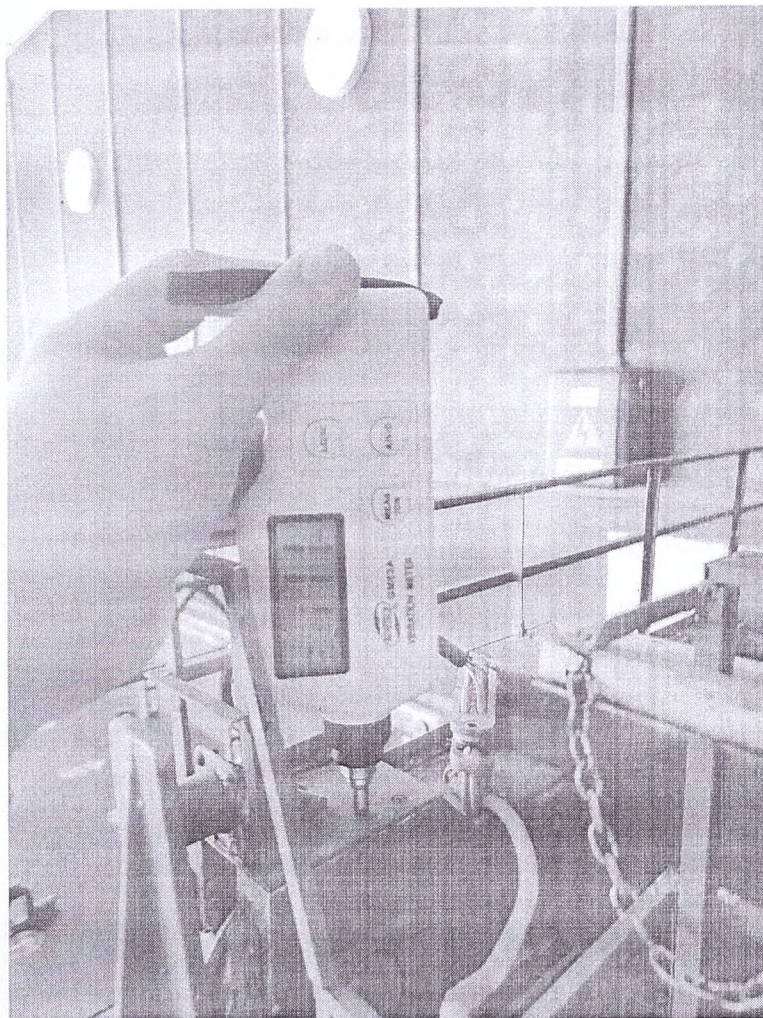


Рисунок 1.17 – Процес замірів вертикальних вібронавантажень крана після удару об опору

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

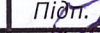
22

2 Моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв

2.1 Аналіз процесів при наїзді мостового крана на буфери

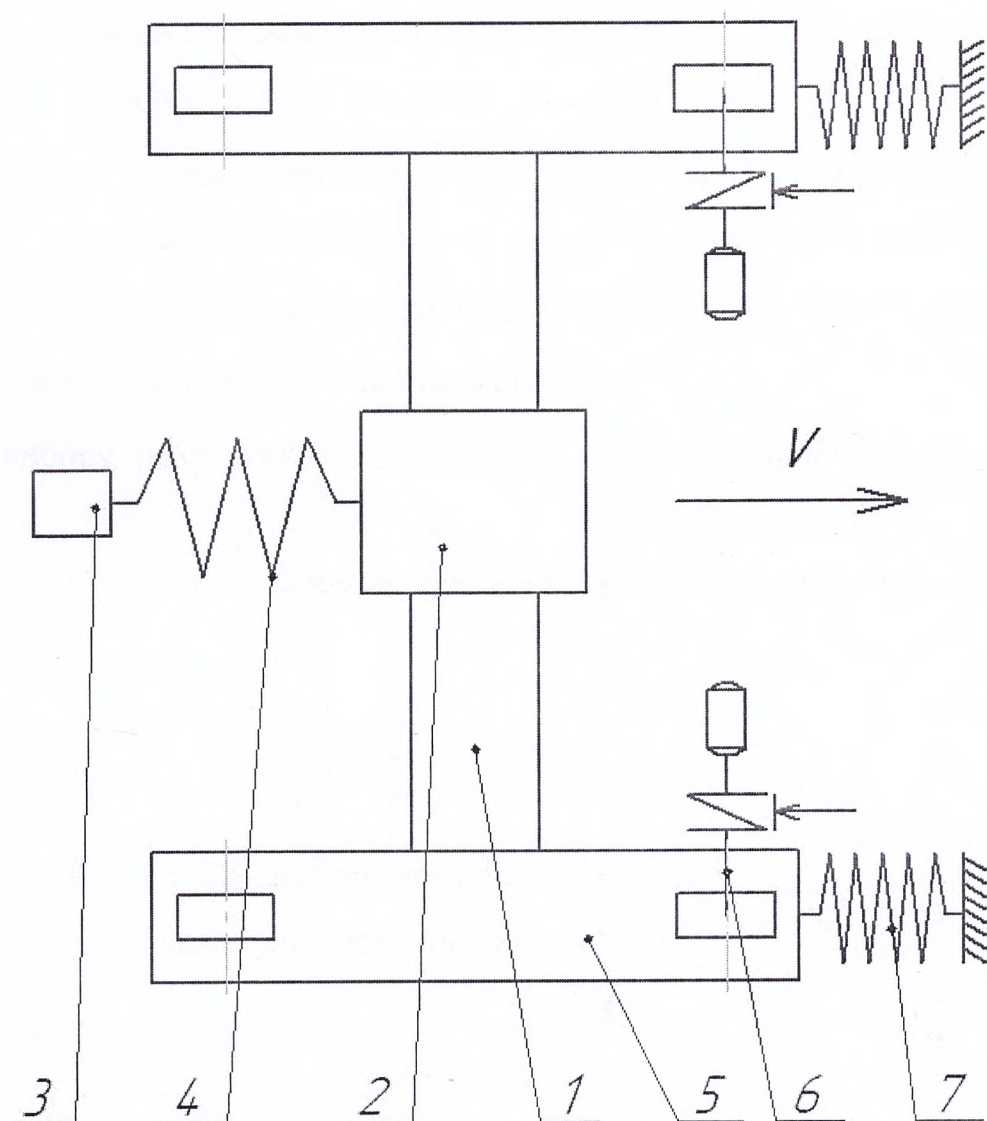
Крани, що пересуваються металевими коліями, під час роботи зазнають максимальних динамічних навантажень, коли потрапляють у тупики. Такі умови навантаження не враховуються під час проектування, в проектах експлуатації кранів або в технологічних процесах підприємства, але в той же час вони є не тільки випадковими, але й закономірними. Тому для безпечної експлуатації крана при проектуванні систем безпеки для мостових кранів в кінці лінії важливо враховувати наступне: які сили діють на тупик під час руху крана, які параметри гальмування крана є важливими в цьому випадку. Фактори, що впливають на різні буферні пристрої, повинні бути проаналізовані і порівняні. Це підвищить надійність системи безпеки і дозволить їй справлятися з необхідними навантаженнями. Оскільки буферні пристрої призначені для гасіння кінетичної енергії крана і зниження динамічних навантажень на сталеву конструкцію крана і опори крана при його зупинці в тупику, буферні пристрої можуть допомогти в ситуації, якщо попередні елементи системи безпеки (обмежувач ходу і гальмо) вийшли з ладу.

Під час руху мостового крана по рейковій колії його елементи зазнають динамічних навантажень внаслідок взаємодії між механізмом пересування та його приводом, металоконструкцією крана, підкрановою колією та вантажем, що перевозиться. Специфічні ударні навантаження на несучі елементи мостових кранів виникають при наїзді крана на тупик або буферний пристрій. Внаслідок цього основні елементи крана пружно деформуються, а вантаж на гнучкій підвісці (на канаті) піддається коливальним ривкам.

					ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв	Лім.	Лист	Листів	
Розроб.	Камчатний			16.08		Н			
Перев.	Криворот			16.08			23	13	
Н. контр.	Васильєв			22.08		НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТМ, 2024 р.			
Затв.	Орисенко			16.08					

При розрахунку буферної системи не враховується рушійне зусилля від приводного електродвигуна механізму пересування крана. Це пов'язано з тим, що відповідно до вимог [3] кран долає тупик з буферним пристроєм після спрацювання обмежувача ходу і вимкнення двигуна. У розрахунках передбачається, що кран проходить тупик з номінальною швидкістю, а рушійна сила двигуна не враховується. Така ситуація може виникнути, коли спрацьовує запобіжний пристрій (обмежувач), при несправних гальмах.

Схема руху крана в разі одночасного наїзду на два буферні пристрої, які розташовані на кінцевих балках, наведено на рисунку 2.1.



1 – міст, 2 – вантажний візок, 3 – гакова підвіска з вантажем, 4 – поліспаст,
5 – кінцева балка, 6 – механізм пересування мостового крана, 7 – буфер

Рисунок 2.1 – Схема руху мостового крана при наїзді на буферний пристрій

Відомо, що вибір не виправдано простих розрахункових схем збільшує похибки у визначенні динамічних навантажень, а якщо схема надмірно складна, то метод розрахунку стає занадто громіздким і його практичне застосування стає вкрай складним.

Для забезпечення точності розрахунку динамічних навантажень, що виникають при наїзді крана на буферну систему, бажано використовувати динамічну розрахункову схему з чотирма масами і трьома пружними зв'язками. Іншими словами, чим більше мас включено в розрахункову схему, тим точніше ця схема буде відображати події, що відбуваються. Але при цьому рівняння руху і, зокрема, розв'язання цих рівнянь стають складнішими.

У цьому випадку можна виділити наступні маси: $m_{пр}$ - маса вільно обертової частини приводу механізму пересування, приведена до окружності рухомих коліс; m_k - маса кінцевої балки, приведена до окружності рухомих коліс; m_m - маса головної балки моста, приведена до центру прогону і маса приведенного візка; $m_{вант}$ - маса вантажу на гнучкій підвісці.

Після вибору розрахункової динамічної схеми крана необхідно скласти рівняння руху.

Найбільш поширеною формою рівняння руху є саме рівняння Лагранжа [13].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2.1)$$

де n – число ступенів свободи механічної системи;

i – порядковий номер узагальненої координати;

q_i – узагальнена координата;

$\dot{q}_i$ – узагальнена швидкість;

Q_i – узагальнена сила;

T – кінетична енергія системи; t – час.

Щоб уникнути можливих помилок, напрямок осей координат повинен бути вирівняний з напрямком руху. Рушійні сили повинні бути орієнтовані в напрямку руху, а гальмівні сили - в протилежному напрямку руху.

Послідовність складання розрахованих кінетичних діаграм та рівнянь руху пружної системи наведено в [14].

- Визначення сили інерції (моменту інерції) маси;
- Розрахунок жорсткості (пружності) всіх частин системи;
- Зведення всіх мас і жорсткостей ділянок валу до одного валу (для систем, що крутяться);
- Замінити багатомасові системи на системи з обмеженою кількістю мас. Замінено на (2....4);
- Встановлення закону зміни крутного моменту двигуна з урахуванням статичних або динамічних характеристик технічного опору і силових моментів;
- Визначення коефіцієнта дисипації системи;
- Розрахунок частоти коливань системи
- Складання систем диференціальних рівнянь руху мас під дією зовнішніх навантажень.

2.2 Масова математична модель для мостового крана при наїзді на буферні пристрої

2.2.1 Розрахункова динамічна схема (чотиримасова)

Під час руху крана по колії в металоконструкції балок та елементах (вузлах) механізму пересування відбуваються деформації. Тому розрахунковою схемою, найбільш наближеною до реальних умов руху крана, є розрахункова схема, яка враховує пружні частини і елементи ходового механізму та пружність конструкції моста.

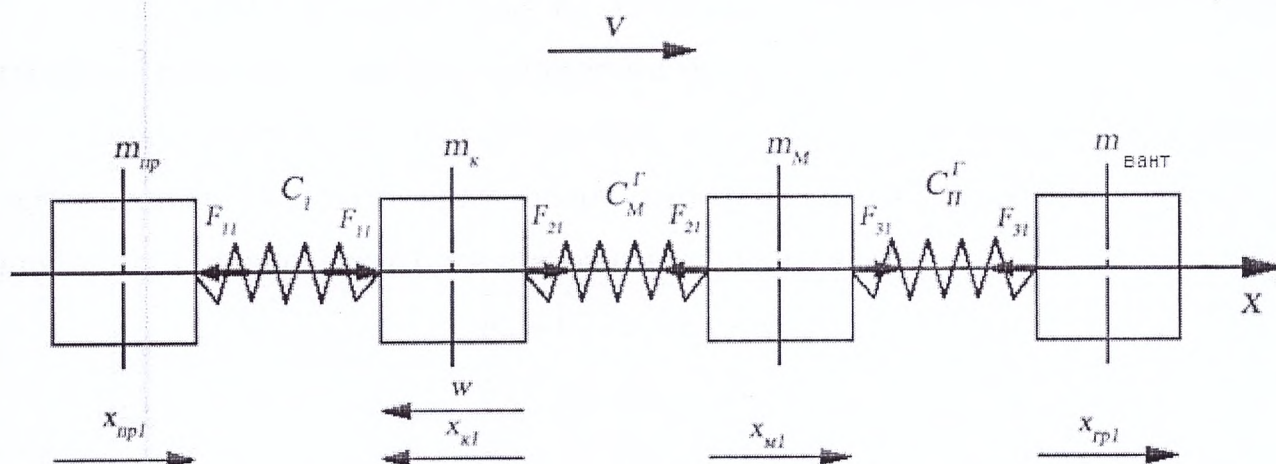
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

26

Спільну роботу пружних елементів приводу механізму пересування, металоконструкції моста і гнучкого вантажопідйомного механізму під час горизонтального переміщення крана можна дослідити за допомогою чотиримасової розрахункової схеми з трьома пружними зв'язками (рис. 2.2).



c_1 – коефіцієнт жорсткості вільної частини трансмісії; $c_M^Г$ – коефіцієнт жорсткості моста у горизонтальному напрямі; $c_П^Г$ – коефіцієнт горизонтальної жорсткості гнучкої підвіски вантажу; W – сумарний опір пересуванню, який складається із статичного опору пересуванню і сили гальмування; F_{11}, F_{21}, F_{31} – сили в пружних зв'язках на першому етапі; V – швидкість пересування крана в момент підходу до кінцевих вимикачів; $x_{пр}, x_к, x_М, x_{гр}$ – переміщення мас $m_{пр}, m_к, m_М, m_{вант}$ на першому етапі.

Рисунок 2.2 – Розрахункова динамічна схема (чотиримасова) перед наїздом мостового крана на буферні пристрої

Перша стадія відбувається до контакту кінцевих балок моста крана з буферним пристроєм, друга стадія характеризується спрацюванням буферного пристрою.

На рисунку 2.2. показано, що цей етап починається після наїзду моста на кінцевий вимикач, що викликає рішення про вимкнення електродвигуна приводу пересування крана і активацію гальма механізму. Рух маси на цій фазі відбувається під дією кінетичної енергії, що утворюється під час розгону машини.

Рух кожної з мас можна записати наступним чином

$$\begin{cases} m_{PP} \cdot \ddot{x}_{PP1} = -F_{11} \\ m_K \cdot \ddot{x}_{K1} = F_{21} + F_{11} - W \\ m_M \cdot \ddot{x}_{M1} = F_{31} - F_{21} \\ m_{BAHT} \cdot \ddot{x}_{BAHT1} = -F_{31} \end{cases} \quad (2.2)$$

Перед тим, як кран досягне кінцевої зупинки, всі пружні коливання гасяться і вільна частина валу приводного механізму.

Припускаючи, що вільна частина вала приводу механізму пересування деформується під дією сили опору пересуванню W , залежність зусиль у пружному з'єднанні може бути показана наступним чином.

$$\begin{aligned} F_{11} &= W - c \cdot (x_{K1} - x_{PP1}) \\ F_{21} &= c_M^r \cdot (x_{M1} - x_{K1}) \\ F_{31} &= c_\Pi^r \cdot (x_{BAHT1} - x_{M1}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Підставимо сили в пружних зв'язках на першому етапі у попереднє рівняння і одержимо диференціальну систему рівнянь, які описують рух мас на першому етапі

$$\begin{cases} m_{PP} \cdot \ddot{x}_{PP1} + W - c \cdot (x_{K1} - x_{PP1}) = 0 \\ m_K \cdot \ddot{x}_{K1} - c_M^r \cdot (x_{M1} - x_{K1}) + c \cdot (x_{K1} - x_{PP1}) = 0 \\ m_M \cdot \ddot{x}_{M1} - c_\Pi^r \cdot (x_{BAHT1} - x_{M1}) + c_M^r \cdot (x_{M1} - x_{K1}) = 0 \\ m_{BAHT} \cdot \ddot{x}_{BAHT1} + c_\Pi^r \cdot (x_{BAHT1} - x_{M1}) = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Початкові умови

$$\begin{aligned} t &= 0; \\ x_{PP10} &= x_{M10} = x_{K10} = x_{BAHT10} = 0; \\ \dot{x}_{PP10} &= \dot{x}_{M10} = \dot{x}_{K10} = \dot{x}_{BAHT10} = 0. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для переходу до другого етапу використаємо умову

$$x_{PP1K} = S_0. \quad (2.5)$$

де S_0 – відстань яку долає кран від кінцевого вимикча до буфера.

Другий етап характеризується роботою буферів, тобто в схему розрахунку (рис. 2.3) добавляються пружні зв'язки.

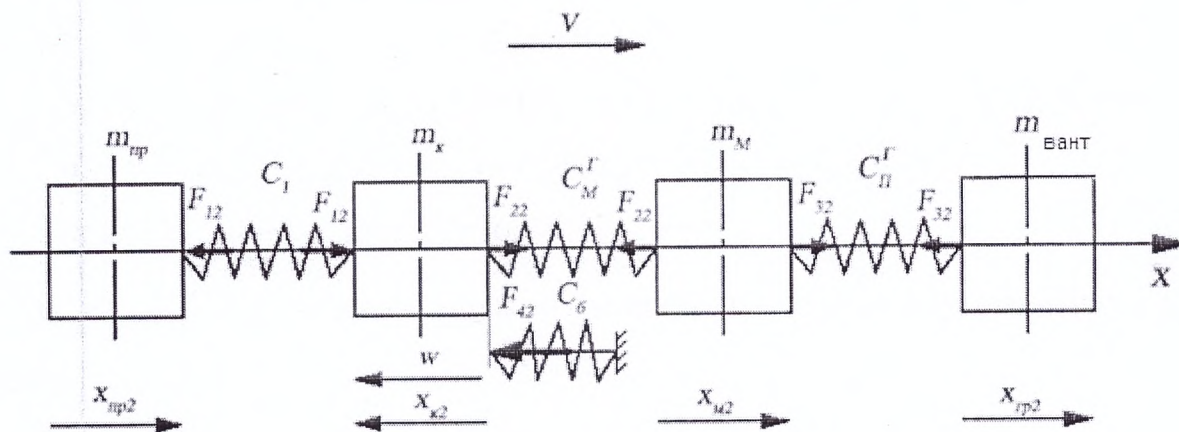


Рисунок 2.3 – Динамічна схема розрахунку при наїзді мостового крана на буферні пристрої

Розглянемо систему диференціальних рівнянь для випадку, коли кран наїжджає на буферну пружину, не стискаючи її. Розглянемо рух кожної маси в динамічній системі мостового крана при наїзді моста на буферну пружину і запишемо

$$\begin{cases} m_{\text{пр}} \cdot \ddot{x}_{\text{пр}2} = -F_{12} \\ m_{\text{к}} \cdot \ddot{x}_{\text{к}2} = F_{22} + F_{12} - W - F_{42} \\ m_{\text{м}} \cdot \ddot{x}_{\text{м}2} = F_{32} - F_{22} \\ m_{\text{вант}} \cdot \ddot{x}_{\text{вант}2} = -F_{32} \end{cases} \quad (2.6)$$

Сили у пружних зв'язках знаходяться за

$$\begin{aligned} F_{12} &= F_{120} - c_1 \cdot (x_{\text{к}2} - x_{\text{пр}2}) \\ F_{22} &= F_{220} + c_M^Г \cdot (x_{\text{м}2} - x_{\text{к}2}) \\ F_{32} &= F_{320} + c_{\text{П}}^Г \cdot (x_{\text{вант}2} - x_{\text{м}2}) \\ F_{42} &= c_6 \cdot x_{\text{к}2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

де c_6 – коефіцієнт жорсткості буферів.

Підставимо сили в пружних зв'язках на другому етапі у рівняння (2.6) і одержимо диференційну систему рівнянь, які описують рух мас на другому етапі

$$\begin{cases} m_{\text{ПР}} \cdot \ddot{x}_{\text{ПР}2} - c \cdot (x_{\text{К}2} - x_{\text{ПР}2}) + F_{120} = 0 \\ m_{\text{К}} \cdot \ddot{x}_{\text{К}2} - c_{\text{М}}^{\Gamma} \cdot (x_{\text{М}2} - x_{\text{К}2}) + c_1 \cdot (x_{\text{К}2} - x_{\text{ПР}2}) + c_{\text{Б}} \cdot x_{\text{К}2} - F_{220} - F_{120} + W = 0 \\ m_{\text{М}} \cdot \ddot{x}_{\text{М}2} - c_{\text{П}}^{\Gamma} \cdot (x_{\text{БАНТ}2} - x_{\text{М}2}) + c_{\text{М}}^{\Gamma} \cdot (x_{\text{М}2} - x_{\text{К}2}) - F_{320} + F_{220} = 0 \\ m_{\text{БАНТ}} \cdot \ddot{x}_{\text{БАНТ}2} + c_{\text{П}}^{\Gamma} \cdot (x_{\text{БАНТ}2} - x_{\text{М}2}) + F_{320} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

де $F_{120}, F_{220}, F_{320}$ – сили у пружних зв'язках на початку другого етапу і кінці першого.

Початкові умови

$$\begin{aligned} t &= 0; \\ x_{\text{ПР}20} &= x_{\text{М}20} = x_{\text{К}20} = x_{\text{БАНТ}20} = 0; \\ \dot{x}_{\text{ПР}20} &= \dot{x}_{\text{ПР}1\text{К}}; \dot{x}_{\text{К}20} = \dot{x}_{\text{К}1\text{К}}; \dot{x}_{\text{М}20} = \dot{x}_{\text{М}1\text{К}}; \dot{x}_{\text{БАНТ}20} = \dot{x}_{\text{БАНТ}1\text{К}}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Рішення системи диференціальних рівнянь (2.4) і (2.8), наприклад, методом Рунге-Кутта може бути використаний для визначення сил F_{12} , F_{22} і F_{32} в пружних зв'язках і динамічної сили F_{42} при наїзді мостового крана на буферний пристрій.

Результати, отримані в роботі [14], показують, що при стисненні пружин з постійною жорсткістю у вільній частині передачі не відбувається силового розкриття. Другий етап масообміну мостового крана закінчується повторним стисканням буферних пружин і зупинкою ходової частини крана. Сила стиснення буферних пружин достатня для того, щоб перші чотири маси почали рухатися в протилежних напрямках (пружний відскік буфера). Під час пружного відскоку максимальне навантаження на пружну ланку нижче, ніж під час стиснення буферної пружини. Для запобігання руху маси крана в протилежному напрямку (для запобігання пружного відскоку) необхідно будувати буферні пристрої зі змінною жорсткістю (що зменшується при спрацьовуванні буферного пристрою). Це забезпечує максимальний коефіцієнт поглинання кінетичної енергії при наїзді мостового крана на буферний пристрій і значно знижує динамічні навантаження на металоконструкцію крана, підвищуючи тим самим надійність і довговічність машини.

На основі квадратурного розрахунку динамічної діаграми при визначенні динамічних навантажень при наїзді крана на буферний пристрій можна зробити

наступні висновки

- гнучкість моста крана в горизонтальному напрямку і гнучкість вала приводного механізму зменшують максимальне навантаження на буферний пристрій в порівнянні з розрахунком динамічного навантаження в припущенні, що міст і вал повністю жорсткі;

- потенційна енергія, накопичена металоконструкцією крана, вивільняється під час деформації моста.

Потенційною енергією, накопиченою в металоконструкції крана, яка виникає під час деформації моста, можна знехтувати при розрахунку буферного пристрою.

2.2.2 Розрахункова динамічна схема (двомасова)

Відомо, що частота маятникових коливань вантажу на гнучкому підвісі значно нижча за частоту пружних коливань елементів конструкції крана і робочого механізму. Навіть при дуже малих довжинах канатів частота маятникових коливань вантажу становить близько трьох за секунду, але частота пружних коливань металевої конструкції крана на порядок вище; відповідно до висновків, зроблених в розділі 2.2.1, з урахуванням цього при розрахунку динамічних навантажень, що виникають при контакті мостового крана і буферного пристрою, можна вважати, що металева конструкція пересувного механізму і система передачі є абсолютно жорсткими. Це значно спрощує розрахунки. При цьому розрахункове максимальне значення динамічного навантаження є вищим за фактичне, що підвищує безпеку металоконструкції крана (тобто можна зробити запас).

Таким чином, для визначення динамічних навантажень, які виникають при наїзді мостового крана на буферний пристрій, можна використовувати схему динамічного навантаження з двомасовою конструкцією (рис. 2.4).

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

39

$$\begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x} - m_{\text{БАГТ}} \cdot \ddot{\varphi} \cdot l \cdot \cos \varphi - m_{\text{БАГТ}} \cdot \dot{\varphi}^2 - l \cdot \sin \varphi + W = F_{\text{БУФ}}; \\ \ddot{x} \cdot \cos \varphi + \ddot{\varphi} \cdot l + g \cdot \sin \varphi = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

де $F_{\text{БУФ}}$ – сила в буфері.

Кінетична енергія поглинається силою опору $F_{\text{БУФ}}$ буферного пристрою. Значення $F_{\text{БУФ}}$ можна ввести для кожного типу буферного пристрою, а динамічне навантаження, що діє на кран при наїзді крана на буферний пристрій, можна отримати шляхом чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.10) методом Рунге-Кутта./

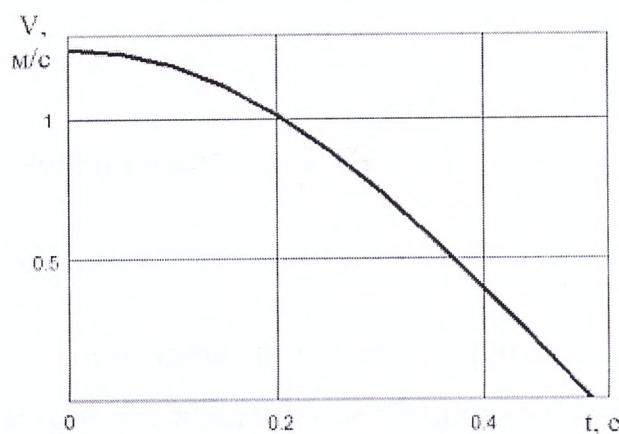
Авторами [15] проаналізовано використання різних типів буферних пристроїв у системах захисту мостових кранів (П - пружинний, Г - гідравлічний, П-Г - пружинно-гідравлічний).

Таблиця 2.1. – Параметри процесу наїзду мостового крана на буферний пристрій

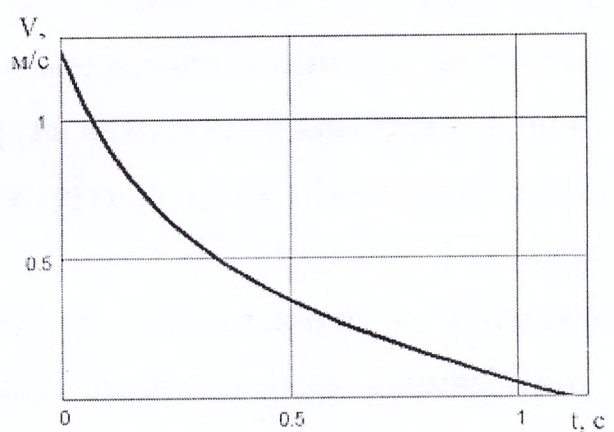
№	V , м/с	$m_{\text{ГР}}$, т	Тип буфера	t , с	S , мм	φ , град.	a , м/с ²	F , кН	V_3 , м/с
1	0,5	0	П	0,5	160	0	1,6	16	0
			Г	0,7	140		1,4	13,9	
			П-Г	0,45	116		1,1	11,6	
2	0,5	5	П	0,55	171	9,8	1,4	20,7	0
			Г	0,9	191	7	1,2	18,6	0,1
			П-Г	0,5	125	7,4	1,0	14,6	0
3	1	0	П	0,5	321	0	3,1	32	0
			Г	0,95	325				
			П-Г	0,45	200				
4	1	5	П	0,55	344	19,5	2,7	41	0
			Г	0,7	357	13,6			0,4
			П-Г	0,5	228	17,3			0
5	1,25	0	П	0,5	401	0	3,9	40	0
			Г	1,1	433				
			П-Г	0,35	219				
6	1,25	5	П	0,55	430	24,5	3,2	48,6	0
			Г	0,7	469	17,1			0,5
			П-Г	0,4	247	21,4			0

(час гальмування t , деформація буфера S , уповільнення крана a , максимальна сила удару F і залишкова швидкість крана V).

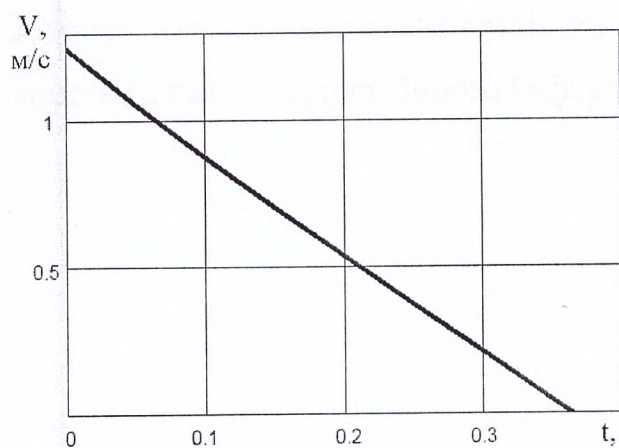
На рисунку 2.5 показано графіки залежностей швидкості крана від навантаження для трьох різних буферних матеріалів при швидкості крана 1,25 м/с.



пружинний буфер



гідравлічний буфер



пружинно-гідравлічний буфер

Рисунок 2.5 – Процес зміни швидкості мостового крана при наїзді на буфери

Аналізуючи результати досліджень, приходимо до висновків:

- Гідравлічні буфери повинні бути обладнані пристроєм для регулювання (зміни) гідравлічного опору;
- Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери;
- При спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини.

2.3 Висновки до розділу 2

1. Для запобігання руху маси крана в протилежному напрямку (для запобігання пружного відскоку) необхідно будувати буферні пристрої зі змінною жорсткістю (що зменшується при спрацьовуванні буферного пристрою). Це забезпечує максимальний коефіцієнт поглинання кінетичної енергії при наїзді мостового крана на буферний пристрій і значно знижує динамічні навантаження на металоконструкцію крана, підвищуючи тим самим надійність і довговічність машини.

2. Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери, і при спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини, яку можна замінити на пневмоелемент із змінною жорсткістю. Тому доцільно буде дослідити характеристики пневмогідравлічного буфера.

3 Результати досліджень пневмогідравлічних буферів

3.1 Визначення параметрів та характеристик досліджуваного пневмогідравлічного буферного пристрою

Щоб підвищити надійність роботи мостового крана, запропонована будова гідро-пневматичного буфера (рис. 3.1).

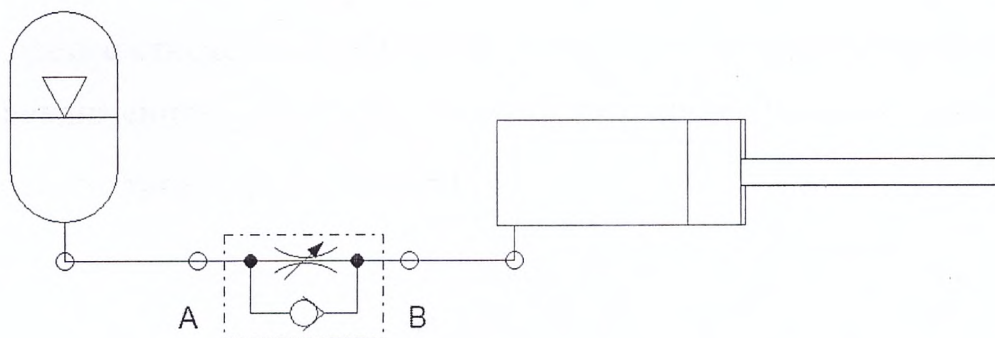


Рисунок 3.1 – Схема комбінованого гідро-пневматичного буфера

На схемі наведено гідроциліндр односторонньої дії з одностороннім штоком, гідропневмоаккумулятор та регульований дросель із зворотнім клапаном.

Коли кран зупиняється об тупиковий упор, буферна тяга з поршнем починає рухатися і нагнітає робочу рідину через дросель у порожнину пневмоаккумулятора. В результаті потрапляння рідини до пневмоаккумулятора, відбувається стиснення об'єму газу, що міститься в його порожнині пневмогидроаккумулятора. Відповідно тиск газу в аккумуляторі зростає, і опір повітря зростає.

Тому опір, створюваний буфером під час роботи, складається з

				ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	П.Оришак	Дата	Результати досліджень пневмогідравлічних буферів	
Розроб.	Камчатний			16.08		
Перев.	Криворот			16.08		
Н. контр.	Васильєв			22.02		
Затв.	Орисенко			26.08		
					Лім.	Лист
						36
					Листів	28
					НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТР, 2024 р.	

гідравлічного опору та пневматичного опору. Гідравлічний опір визначається наступним чином:

$$F_{\psi} = \alpha \cdot \dot{x}^2 \operatorname{sign}(\dot{x}) \quad (3.1)$$

де α – коефіцієнт демпфування.

Опір повітря виражається наступним рівнянням

$$F_p = p_{\kappa} \cdot A_{\text{пор}} \quad (3.2)$$

де p_{κ} – максимальний тиск пневмогідроаккумулятора, МПа;

$A_{\text{пор}}$ – площа поршня гідроциліндра, м².

Завжди процес стиснення любого газу утворював ізотермічний процес, наш випадок не є виключенням $p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}$. Отже кінцевий вигляд значення p_{κ} буде при початкових тисках p_0 і об'ємах V_0

$$p_{\kappa} = \frac{p_0 V_0}{V_0 - \frac{\pi \cdot D_{\text{п}}^2}{4} \cdot x} \quad (3.3)$$

Дослідження показали, що найбільш ефективна робота пневмобуферів полягає в тому, що кінетична енергія маси крана витрачається якомога менше на тертя в гідроциліндрі, а витрати на гідравлічну і пневматичну підтримку розподіляються приблизно порівну що це так висвітлено у [15]. Якщо більша частина кінетичної енергії крана сприймається гідравлічним опором, характеристиками амортизаційної дії буде жорсткість, що призводить до збільшення ударних навантажень. Коли більша частина кінетичної енергії маси крана поглинається опором повітря, робота буфера стає м'якою, що призводить до збільшення гальмівного шляху крана.

За результатами досліджень встановлено параметри гальмування в процесі зіткнення мостового крана з гідро-пневматичним буфером. Результати наведені в таблиці. 3.1

З таблиці 3.1 видно, що використовуючи однакові параметри гідро-пневмобуфера для крана постійної маси, було змодельовано наїзд на тупик з навантаженням і без нього. Наявність вантажу збільшила гальмівний шлях і час

гальмування.

Таблиця 3.1 – Параметри гальмування мостового крана при зіткненні з гідро-пневматичним буфером

№	$m_{\text{вант}}$, т	V_K , м/с	$D_{\text{П}}$, м	α , кг/м ² с	p_0 , МПа	V_0 , л	t , с	S , мм	p_x , МПа	φ , град.	a_{max} , м/с ²	F_{max} , кН
1	0	1,25	0,12	$3,9 \cdot 10^4$	7,3	6,3	0,35	205	11,6	0	3,961	144,6
	50	1,25	0,12	$3,9 \cdot 10^4$	7,3	6,3	0,45	232	12,5	20,9	3,994	345,4
	0	0,88	0,12	$3,9 \cdot 10^4$	7,3	6,3	0,3	124	9,4	0	3,189	116,4
	50	0,88	0,12	$3,9 \cdot 10^4$	7,3	6,3	0,3	132	9,6	15,8	3,25	281,5
2	0	1,25	0,15	$7,5 \cdot 10^4$	11	10	0,35	203	17,2	0	3,903	316,2
	100	1,25	0,15	$7,5 \cdot 10^4$	11	10	0,4	226	18,3	21,7	3,926	710,6
	0	0,88	0,15	$7,5 \cdot 10^4$	11	10	0,3	120	14	0	3,222	261
	100	0,88	0,15	$7,5 \cdot 10^4$	11	10	0,3	128	14,2	16,6	3,27	592
3	0	1,25	0,2	$11 \cdot 10^4$	7,5	20	0,35	202	12,4	0	3,955	411,4
	160	1,25	0,2	$11 \cdot 10^4$	7,5	20	0,4	231	13,7	20,6	3,99	1053
	0	0,88	0,2	$11 \cdot 10^4$	7,5	20	0,3	123	9,9	0	3,186	331,4
	160	0,88	0,2	$11 \cdot 10^4$	7,5	20	0,35	132	10,1	15,3	3,252	858,6

Таблиця 3.2 – Порівняння параметрів різних типів буферів за основними показниками ефективності

Параметр	Значення параметра для типу буфера			
	гумовий	пружинний	гідролічний	гідро-пневматичний
Швидкість наїзду, м/хв	до 60	до 70	до 160	до 120
Маса крана, т	до 70	до 50	необмежена	до 200
Явище віддачі	присутнє	присутнє	відсутнє	Відсутнє
Відсоток кінетичної енергії, яку поглинає буфер, %	30–50	20	до 100	до 100
Скорочення зони обслуговування крана	немає	є	немає	Немає
Уповільнення крана, м/с ²	> 40	> 4	> 4	до 4

Таблиця 3.2 предствлена для порівняння гідро-пневмобуферів та інших типів буферів за основними показниками ефективності.

На основі аналізу теоретичних досліджень гідро-пневмобуферів встановлено:

- гідро-пневмобуфери пропонують значні переваги майже за всіма робочими параметрами (таблиця 3.2).
- щоб зменшити ударні навантаження від важких кранів, необхідно збільшити гальмівний шлях, тим самим зменшуючи уповільнення крана.
- для досягнення максимальної ефективності під час роботи гідро-пневмобуфера гідравлічний опір повинен становити 40% від сили удару на початку гальмування, а пневматичний опір повинен бути 55%.

Особливо слід відзначити переваги використання гідро-пневмобуферів для захисту великих кранів.

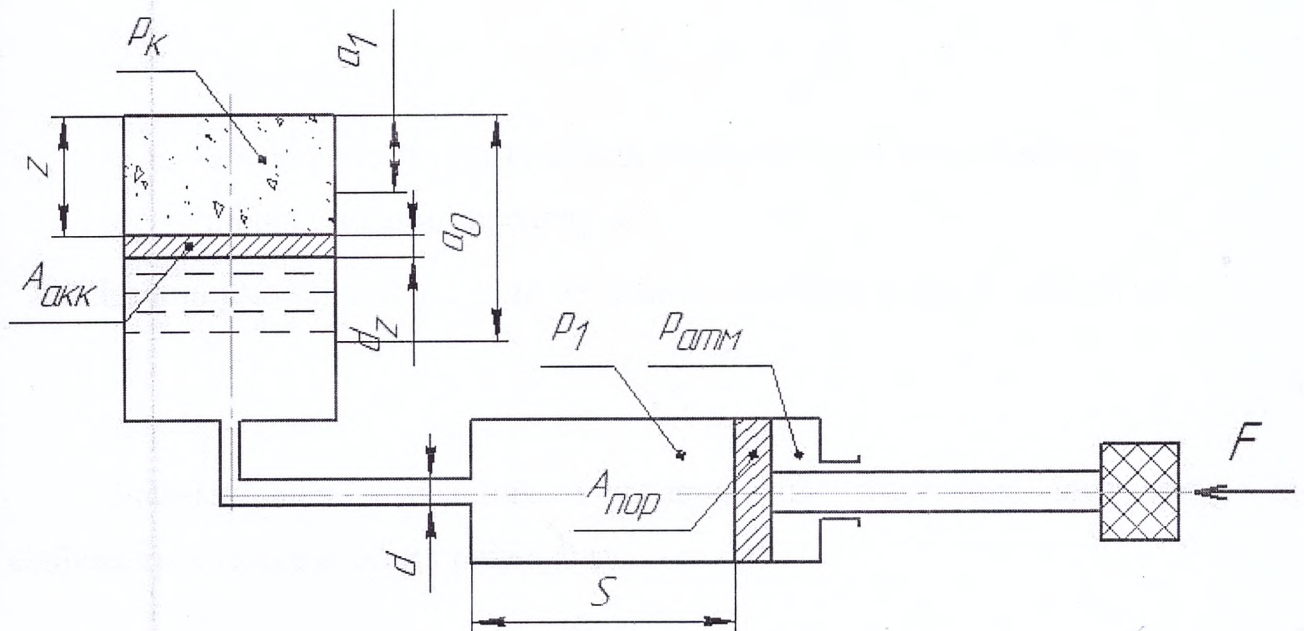
Однак, як і пружинно-гідравлічні буфери так і гідро-пневмобуфери також мають свої поточні недоліки.

Враховуючи складність конструкції і високі матеріальні витрати, необхідні для підтримки працездатності при експлуатації у виробничих умовах.

Однією з важливих характеристик любого кранового буфера є час його активації, тобто час зупинки крана. Занадто малий час може призвести до сильного удару та збільшення динамічних навантажень на металоконструкцію крана та кранову конструкцію, а занадто великий час свідчить про те, що буфер втратив свою ефективність.

Оскільки робоча рідина з гідроциліндра надходить в пневмогідроаккумулятор, то час роботи пневмобуферного пристрою можна знайти по масообміну робочого тіла в буфері і порівняти зі значеннями, отриманими при математичному моделюванні його роботи.

Розрахункова схема гідро-пневмобуфера наведено на рисунку 3.2.



$A_{акк}$ – площа поршня пневмоакумулятора, p_k – тиск газу в пневмоакумуляторі, z – відстань, на якій зменшується рівень газу та підвищується рівень масла в пневмоакумуляторі, a_0 – початкова висота об'єму газу в пневмоакумуляторі, a_1 – кінцева висота об'єму газу в пневмоакумуляторі, p_1 – надлишковий тиск у гідроциліндрі, d – діаметр умовного проходу, S – шлях, пройдений поршнем гідроциліндра, $A_{пор}$ – площа поршня в гідроциліндрі, $p_{атм}$ – атмосферний тиск; F – сила удару від мостового крана.

Рисунок 3.2. – Схема розрахунку для гідро-пневмобуфера

Диференціальне рівняння процесу відтоку рідини від гідроциліндра до пневмокамери під дією тиску від удару крана по буферу, має вигляд

$$-A_{акк} dz = Q dt \quad (3.4)$$

де $A_{акк}$ – площа поршня або мембрани енергоакумулятора, m^2 ;

dz – підвищення рівня рідини в акумуляторі за час t , m ;

Q – витрати рідини, $m^3/год$.

Під час розрахунку витікання рідини під змінним тиском (напором від спадання інтенсивності за рахунок дроселювання) можна знехтувати фактором вагомості робочого середовища, тобто прийняти що перетікання рідини відбувається тільки під дією тиску зі сторони поршня.

$$Q = n \cdot A_{отв} \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_0}{\rho}} \quad (3.5)$$

де n – коефіцієнт витрати робочої рідини під час дроселювання;

$A_{отв}$ – площа умовного проходу, м².

Надлишковий тиск p_1 , коли не враховуємо сили тертя, знайдемо за

$$p_1 = \frac{F}{A_{пор}} \quad (3.6)$$

Диференціація стиснення і розширення газу при врахуванні, що відбувається ізотермічний процес, буде

$$p = \frac{a_0}{z} \cdot (p_0 + p_{атм}) - p_{атм}, \quad (3.7)$$

Для початкових умов

$$p(a_1) = \frac{a_0}{a_1} \cdot \left(p_1 \cdot \frac{A_{пор}}{A_{акк}} + p_{атм} \right) - p_{атм}. \quad (3.8)$$

Для кінцевих умов

$$p(a_0) = p_{\kappa} = \frac{a_0}{a_1} \cdot \left(p_1 \cdot \frac{A_{пор}}{A_{акк}} + p_{атм} \right) - p_{атм} = p_1 \cdot \frac{A_{пор}}{A_{акк}}. \quad (3.9)$$

Після підстановки (3.5) в (3.4), маємо

$$dt = - \frac{A_{акк}}{n \cdot A_{пор} \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_0}{\rho}}} dz. \quad (3.10)$$

Далі підставимо (3.7) в (3.10), і після спрощення отримаємо

$$dt = -A \frac{dz \cdot \sqrt{z_{акк}}}{\sqrt{Cz - B}}, \quad (3.11)$$

де $A = \frac{A_{акк}}{n \cdot A_{отв} \sqrt{2 \cdot \frac{p_1 - p_0}{\rho}}}$; $B = a_1 \cdot (p_0 + p_{атм})$; $C = (p_1 + p_{атм})$.

Взявши інтеграл виразу (3.11), знайдемо час спрацювання гідропневмоакумулятора

$$t = -A \int_{a_0}^{a_1} \frac{\sqrt{z_{акк}}}{\sqrt{Cz - B}} dz, \quad (3.12)$$

$$t = \frac{A_{акк}}{n \cdot d_{омб} \sqrt{\frac{2}{\rho}}} \cdot \frac{a_1}{\sqrt{C}} \cdot \frac{1}{K_1} \cdot \left[\sqrt{m} \cdot \sqrt{m \cdot K_1^2 - 1} - \sqrt{K_1^2 - 1} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2 \cdot K_1} \ln \frac{2 \cdot \sqrt{m} \cdot K_1 \cdot \sqrt{m \cdot K_1^2 - 1} + 2 \cdot m \cdot K_1^2 - 1}{2 \cdot K_1 \cdot \sqrt{K_1^2 - 1} + 2 \cdot K_1^2 - 1} \right] \quad (3.13)$$

У виразі (3.13) для його спрощення введено, що $K_1^2 = \frac{p_1 + p_{атм}}{p_0 + p_{атм}}$, та $m = \frac{a_0}{a_1}$.

Підставимо у вираз (3.13) вихідні дані, і знайдемо час спрацювання гідро-пневмобуфера для кранів різної вантажопідйомності (табл.3.3).

Таблиця 3.3 – Час спрацювання гідро-пневмобуфера для кранів різної вантажопідйомності і одій швидкості руху

№	М _{крану} , Т	М _{вант.віз.} , Т	М _{вант.} , Т	V _к , м/с	t, с	
					Імітаційний метод	Розрахунок за виразом (3.13)
1	59,5	13,5	50	1,25	0,45	0,52
2	126	36	100	1,25	0,4	0,46
3	162	46	160	1,25	0,4	0,48

Приклад імітаціного розрахунку у програмному серидовищі Festo, наведено на рисунку 3.3.

Порівнявши значення, знайдені за моделюванням (імітаційним методом), і значення, знайдені за формулою (3.13), приходимо до висновку, що час спрацьовування гідро-пневмобуфера, визначений правильно.

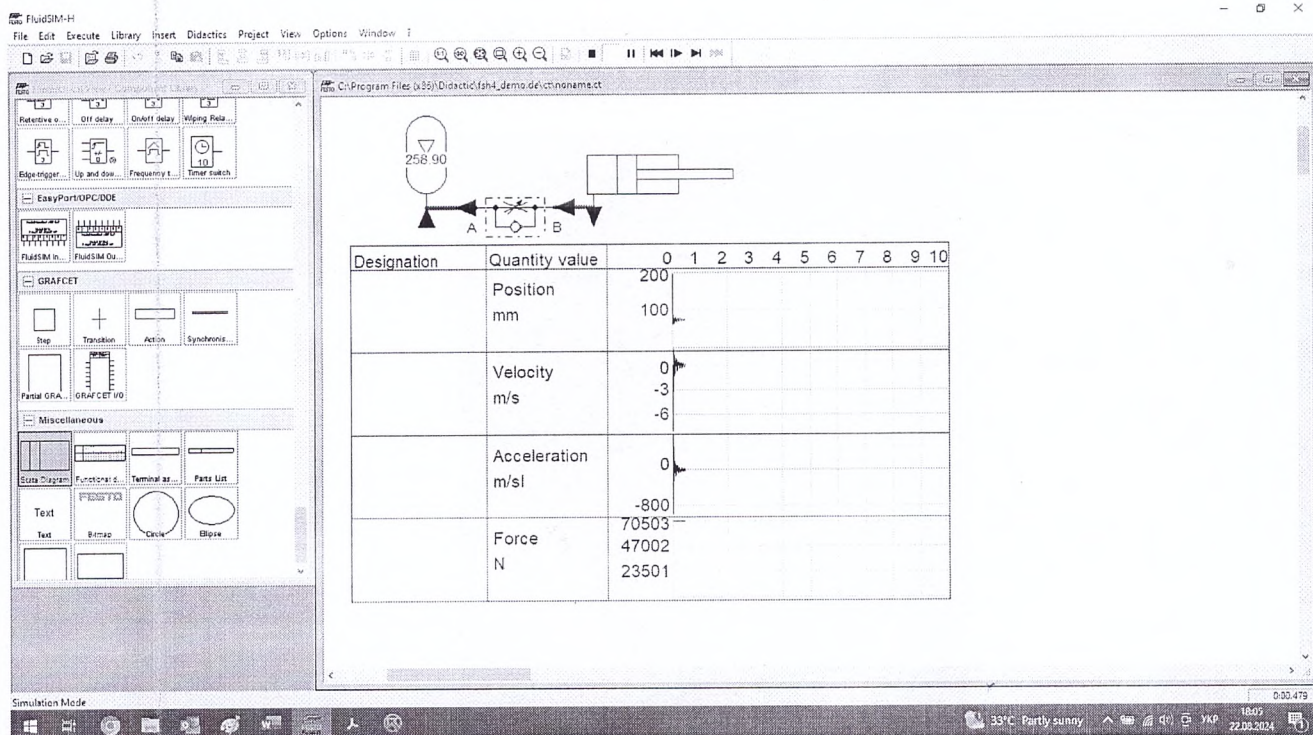


Рисунок 3.3 – Моделювання роботи гідропневмобуфера.

3.2 Експериментальне дослідження робочих процесів пружинного та пневматичного пружних елементів

Було вирішено виконати оригінальне експериментальне дослідження, а саме провести вимірювання частоти коливань та часу затухання від удару двох типів пружин: металевої та пневматичної.

3.2.1 Програмне забезпечення для Accelerometer Meter

Ця програма реєструє дані датчика акселерометра. Він може виводити результат у графічному вигляді, або з можливістю збереження даних, або перетворює його в частотний спектр, або навіть перетворює ваш пристрій на

світловий або музичний інструмент, який керується з виходу датчика акселерометра [16].



Рисунок 3.4 – Стартовий екран (Екран меню)

Стартовий екран має шість напрямлень для вимірювань:

Meter – перегляд вихідного сигналу в реальному часі з акселерометра;

Graph – для запису вихідних даних акселерометра на графіку;

Spectrum – Графік частотного спектру;

Light – перетворить пристрій на світло, яке залежить від орієнтації;

Music – Музичний інструмент, заснований на орієнтації;

Info – технічні характеристики датчиків, виявлених на вашому пристрої.

Кожен з цих варіантів докладно описаний нижче.

Режим Meter (рис. 3.5) відображає вихід датчика акселерометра разом із мінімальним і максимальним значеннями, виміряними для кожної з осей.

XYZ / Rθφ – Вибирає, чи представлений вектор прискорення в декартових сферичних координатах.

g або m/s^2 – одиниці прискорення можуть бути обрані як m/s^2 або g . На землі $g = 9,81 m/s^2$.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

44

Slow ... Fast – виберіть швидкість, з якою акселерометр повертає дані.

Reset Min & Max – скидає мінімальне і максимальне значення.

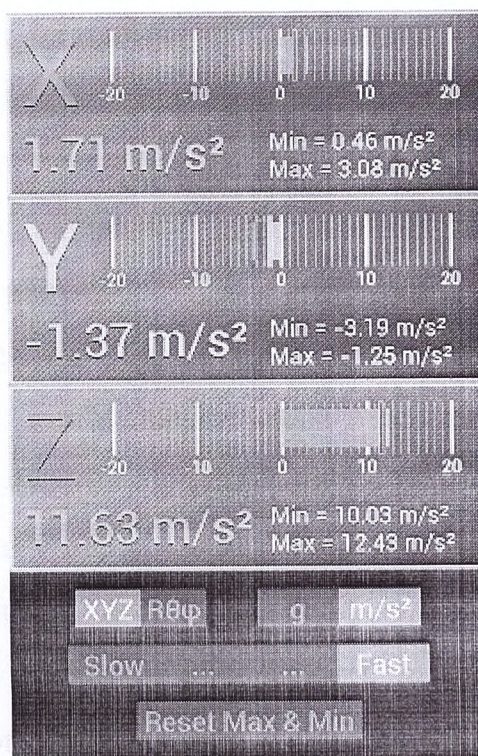


Рисунок 3.5 – Екран режиму Meter

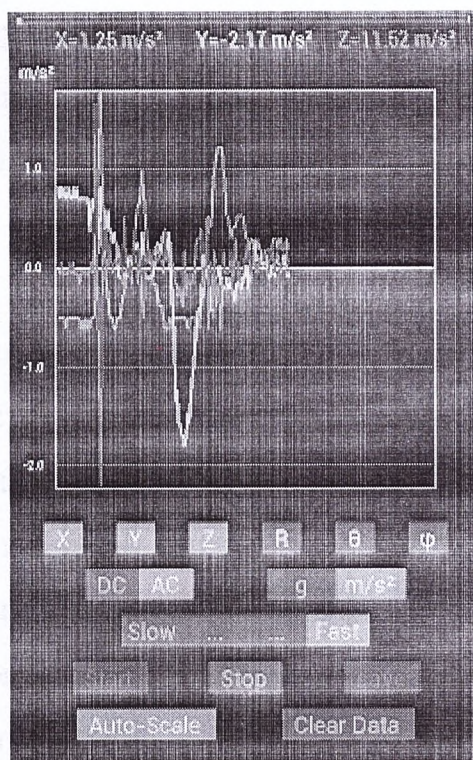


Рисунок 3.6 – Екран режиму Graph

Режим Graph (рис 3.6) цей режим дозволяє вести журнал і зберігати дані з акселерометра. Індикатор перебігу вгорі показує обсяг використаної пам'яті відносно загальної кількості виділених (20000 точок даних). Червоний маркер показує поточну позицію даних, що реєструються. Якщо пам'ять заповнена, вона обернеться і почне перезаписувати раніші дані. У світлішій частині індикатора поступу відображаються дані, які наразі відображені на графіку нижче [16].

Під індикатором прогресу знаходяться останні показання для кожного з параметрів, показаних на графіку.

Графік має до шести ліній залежно від параметрів (X, Y, Z, R, θ ф), вибраних у наведених нижче елементах керування. Кожна лінія має свій унікальний колір, на що вказує останнє значення над графіком. Ліва вісь призначена для значень прискорення. Права вісь призначена для градусів. При ввімкненому автоматичному масштабуванні будуть показані останні показання, а вісь Y відрегульована відповідно до даних. Затиснувши графік по осі X, можна зробити так, щоб графік показував більше або менше пінтів даних. При вимкненому автоматичному масштабі та більшій кількості даних, ніж поміститься на екрані, інші дані можна переміщати в поле зору. При вимкненому автоматичному масштабуванні вісь Y також можна збільшувати та переміщати за бажанням [16].

Елементи керування:

X, Y, Z, R, θ ф – вибір параметра, які відображаються на графіку;

DC/AC – зв'язок постійних або змінних значень. У режимі змінного значення постійне середнє значення видаляється з кожного показання;

g або m/s^2 – вибір одиниці вимірювання даних;

Slow ... Fast – вибір швидкості, з якою акселерометр записує дані;

Start – запуск ведення журналу даних;

Stop – зупинити/призупинити ведення журналу. Ведення журналу має бути призупинено для збереження даних.

Save – зберегти дані в текстовому файлі (рис. 3.7), розділеному комами, що містить Time, X, Y, Z, R, θ і ϕ . Файл зберігається в кореневому каталозі пристрою;

AutoScale – вісь Y автоматично масштабується, якщо її ввімкнено.

Clear Data – очищає записані дані, щоб ви могли розпочати новий тест.

```

Accelerometer Data 0001: Блокнот
Файл Редагування Формат Вигляд Додатки
Keuwl Accelerometer Data File
2023-11-16 15:25:08

Time (s), X (g), Y (g), Z (g), R (g), Theta (deg), Phi (deg)
121.8038254,0.014091,-0.550543,-6.514320,-6.000790,121.096825,-43.941452
121.8088455,0.018475,-0.551256,-6.514830,-6.002865,121.286674,-44.141251
121.8138657,0.020921,-0.550543,-6.511568,-6.006293,121.229820,-44.331833
121.8188934,0.022654,-0.555844,-6.513607,-6.007723,121.515739,-44.058136
121.8239136,0.015519,-0.552480,-6.506675,-6.008141,120.915031,-43.886765
121.8289413,0.016742,-0.564406,-6.510854,-6.010314,121.446709,-43.108612
121.8339691,0.015519,-0.560736,-6.501068,-6.015755,120.934639,-43.302292
121.8389893,0.008281,-0.569809,-6.500355,-6.016208,120.901237,-42.245621
121.8440094,0.001655,-0.569299,-6.491588,-6.019258,120.317070,-41.919464
121.8490295,-0.010577,-0.570319,-6.492608,-6.012460,119.948082,-41.191910
121.8540649,-0.016388,-0.566853,-6.500151,-6.002348,119.941231,-41.135886
121.8590851,-0.028416,-0.564916,-6.503515,-5.992650,119.598503,-40.654724
121.8641052,-0.035450,-0.562979,-6.504738,-5.987194,119.352211,-40.437210
121.8691254,-0.047376,-0.567872,-6.499641,-5.986342,118.863625,-39.511490
121.8741531,-0.051556,-0.561960,-6.502088,-5.979956,118.671303,-39.720764
121.8791809,-0.052575,-0.569299,-6.497705,-5.985433,118.642891,-39.163193
121.8842010,-0.057468,-0.563387,-6.501374,-5.977746,118.475014,-39.341141
121.8892212,-0.055822,-0.559513,-6.503631,-5.971522,118.780663,-39.723206
121.8942413,-0.052575,-0.554416,-6.504738,-5.974514,118.556938,-40.188354
121.8992691,-0.037183,-0.560736,-6.499641,-5.989181,119.042870,-40.507604
121.9042969,-0.034735,-0.558596,-6.498622,-5.990430,119.035133,-40.777420
121.9093170,-0.029843,-0.561756,-6.486695,-6.003179,118.823250,-40.803879
121.9143372,-0.021586,-0.564202,-6.485981,-6.009145,119.145576,-41.053482
121.9193649,-0.020057,-0.567566,-6.489448,-6.006701,119.419607,-40.894394
121.9243851,-0.011801,-0.572255,-6.478132,-6.023427,119.392555,-40.988602
121.9294128,-0.013737,-0.575925,-6.485472,-6.018315,119.785040,-40.622894
121.9344330,-0.013228,-0.580716,-6.486695,-6.019506,119.894157,-40.381407
121.9394531,-0.017101,-0.580716,-6.481802,-6.021094,119.563850,-40.101563
121.9444809,-0.010781,-0.587852,-6.478509,-6.030895,119.784798,-39.903805
121.9495010,-0.007128,-0.587852,-6.475278,-6.036452,120.015777,-40.325684
121.9545212,-0.001301,-0.597128,-6.477419,-6.039084,120.396088,-39.704559
121.9595415,0.001655,-0.596822,-6.478948,-6.039385,120.558571,-39.884064
121.9645767,-0.002728,-0.594478,-6.476909,-6.037718,120.253853,-39.829651
121.9695969,-0.000791,-0.604162,-6.471812,-6.046210,120.377541,-39.194885
121.9746170,-0.006908,-0.603244,-6.464983,-6.047718,119.851143,-38.947327
121.9796371,-0.002015,-0.602021,-6.470079,-6.046075,120.207329,-39.294830
121.9846649,-0.011495,-0.602225,-6.475278,-6.037083,120.060326,-38.789703
121.9896927,-0.014247,-0.602938,-6.473749,-6.036995,119.914604,-38.595764
121.9947128,-0.013228,-0.600492,-6.477725,-6.033659,120.047691,-38.832718
  
```

Рисунок 3.7 – Приклад даних

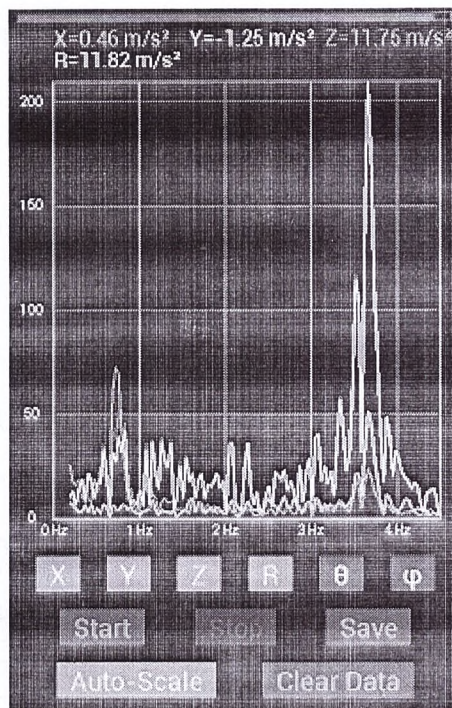


Рисунок 3.8 – Екран режиму Spectrum

Режим Spectrum (рис. 3.8) дозволяє отримати частотний спектр за останніми даними акселерометра. Індикатор поступу вгорі показує пам'ять, яка використовується для обробки частотного спектру. Дані зважуються на найновіші дані. Маркер показує прогрес вибірки через цю пам'ять. Дані спочатку інтерполуються та повторно відбираються перед виконанням. Діапазон частот перетворення Фур'є вибирається виходячи з частоти дискретизації. Таким чином, частотний діапазон буде відрізнятися для різних пристроїв, але повинен бути найкращим для цього пристрою [16].

Під індикатором прогресу знаходяться останні показання для кожного з параметрів, показаних на графіку.

Графік має до шести ліній залежно від параметрів (X, Y, Z, R, θ , ϕ), вибраних у наведених нижче елементах керування. Кожна лінія має свій унікальний колір, на що вказує останнє значення над графіком. Вісь Y показує величину сигналу на цій частоті. Одиниці виміру довільні. При ввімкненому автоматичному масштабуванні вісь Y регулюється відповідно до даних, інакше

стискання або торкання екрана дозволить вам переміщатися та збільшувати дані за потреби [16].

Елементи керування:

X, Y, Z, R, θ ϕ – вибір параметра, які відображаються на графіку;

Start – запуск ведення журналу даних;

Stop – зупинка/призупинення ведення журналу.

Save – зберегти дані в текстовому файлі з роздільником комами, що містить частоту в Гц і вибрані параметри;

AutoScale – вісь Y автоматично масштабується, якщо її ввімкнено. Якщо він вимкнений, зашипування графіка призведе до його відповідного масштабування.

Clear Data – очищає записані дані, щоб ви могли розпочати новий тест.

Режими Light та Music малозначимі в наукових експериментах, тому їх розгляд є недоцільним.



Рисунок 3.9 – Екран режиму Info

На цьому екрані відображаються технічні характеристики датчиків, виявлених на пристрої з операційною системою Android. У ньому вказано внутрішнє ім'я датчика, постачальника, номер версії, роздільну здатність, максимальний діапазон і потужність (у мВт), що використовується датчиком [16].

Описаний комплекс програмного забезпечення цілком і повністю задовольняє умови експериментального дослідження. Саме для визначення частоти коливань та часу затухання від вертикального удару пружинного та пневматичного пружного елемента було використано режим Graph [16].

3.2.2 Допоміжне обладнання для проведення експериментальних досліджень

Під час проведення експериментальних досліджень використовувалися набір тягарців на штанзі, 20 кг, (рисунок 3.10);

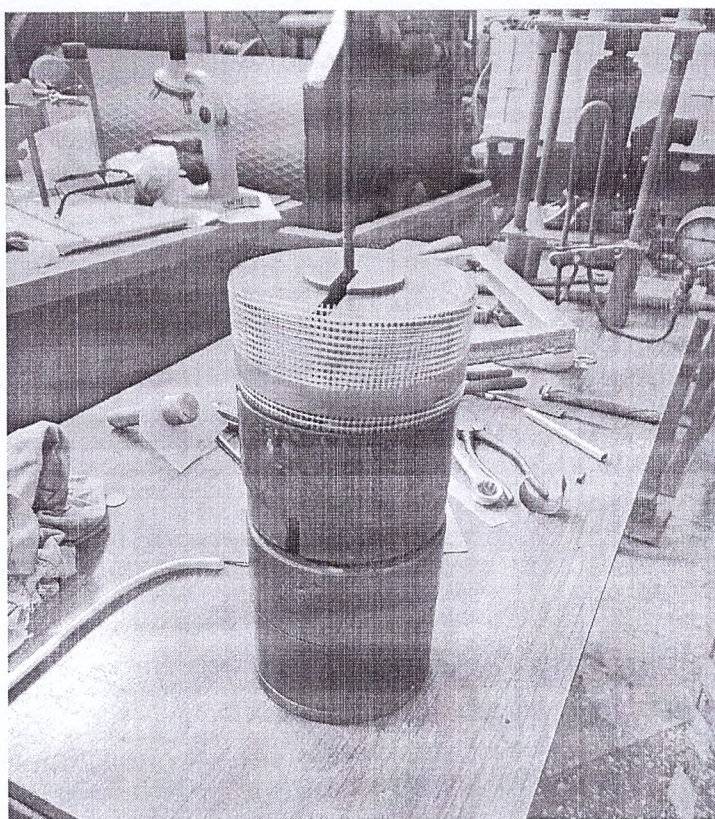


Рисунок 3.10 – Набір тягарців на штанзі.

3.2.3 Дослідження швидкості затухання коливань (вібропоглинання)

Коли пружиний елемент деформується, то виникає сила, яка намагається повернути їй початковий розмір і форму. Ця сила спричинена електромагнітними ефектами між атомами та молекулами матеріалу, з якого складається пружний елемент. Ця сила називається силою пружності. В залежності від величини цієї сили і буде змінюватися вібропоглинання, або швидкість затухання коливань. Для визначення вібропоглинання було проведено ще один експеримент, а саме навантаження пружного елемента тягарцями у 16 кг і додаткове скидання тягарця у 4 кг з висоти у 30 см (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Підготовка тягарців до проведення експериментальних досліджень

Експерименти проводилися для всіх пружних елементів у однакових умовах. Діаграма затухання коливань усіх пружних елементів знімалася за допомогою мобільного телефону з операційною системою «Android» на якому встановлений застосунок, який описаний у розділі 3.2.1. Схема визначення затухаючих коливань зображено на рисунку 3.12.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ

Лист

51

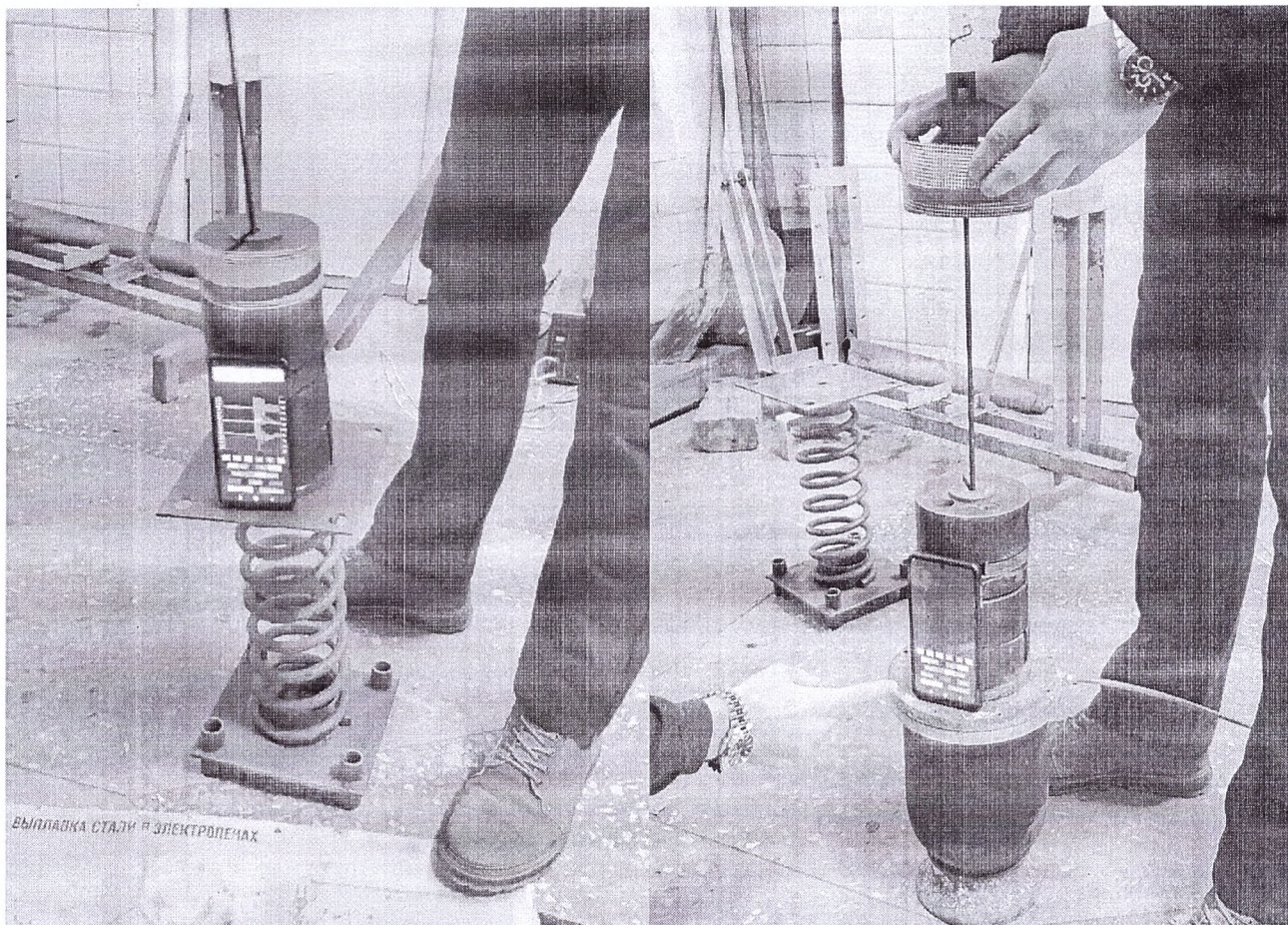


Рисунок 3.12 – Процес зняття діаграм затухання.

Отримані дані записуються у великому текстовому файлі за всіма ступенями вільності (додаток А), їх можна відкрити за допомогою програми Microsoft Excel і побудувати графік затухання коливань. Так як для даного дослідження є цікавими саме найбільші коливання, то далі на рисунках 3.13 – 3.18 будуть зображені лише вони.

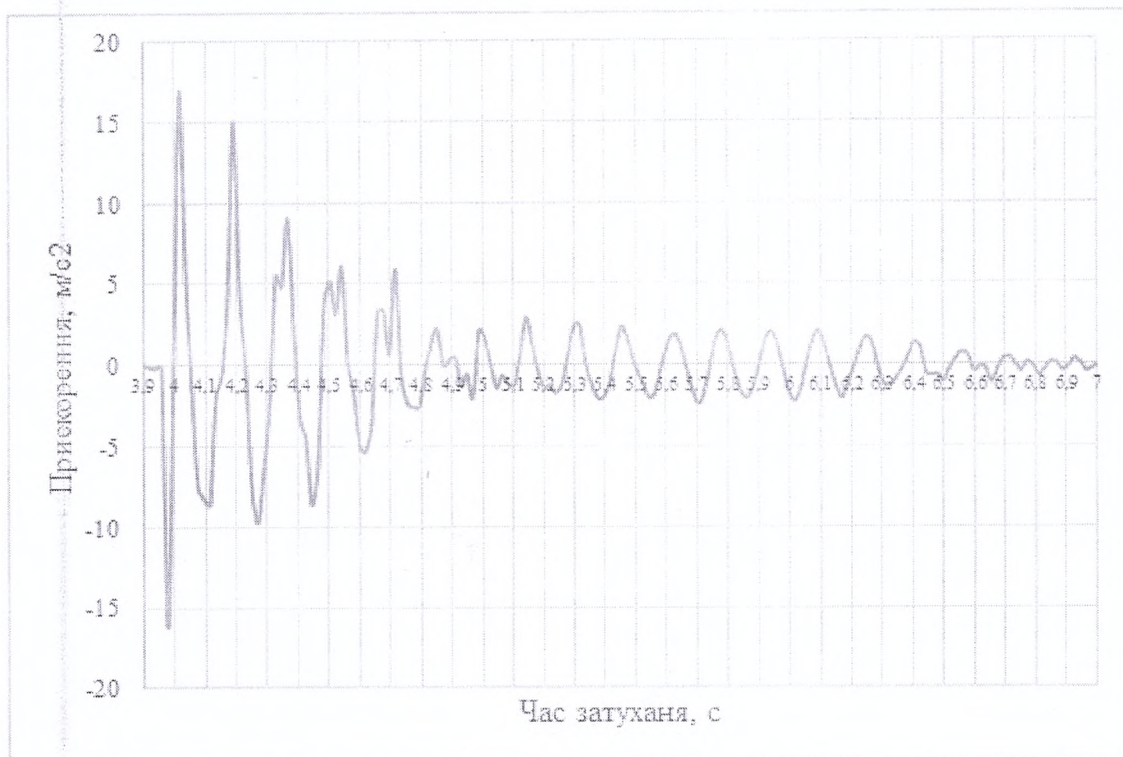


Рисунок 3.13 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у металевому пружному елементу.

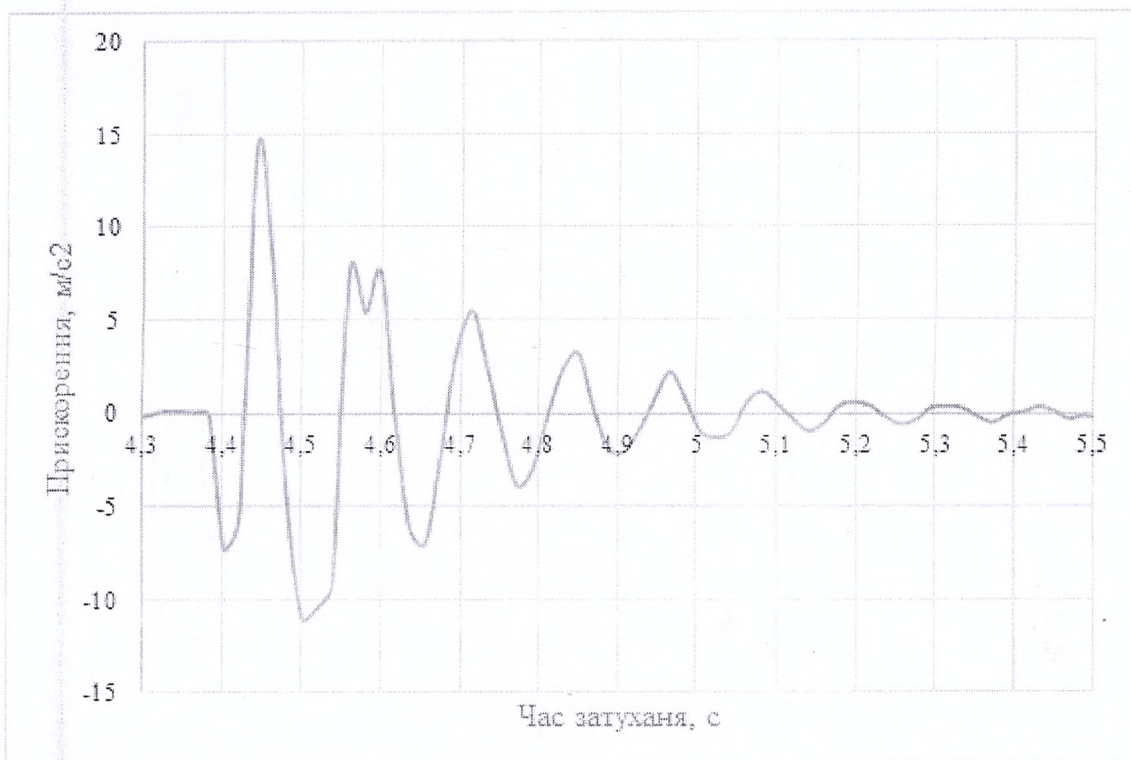


Рисунок 3.14 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=0,5$ атм).

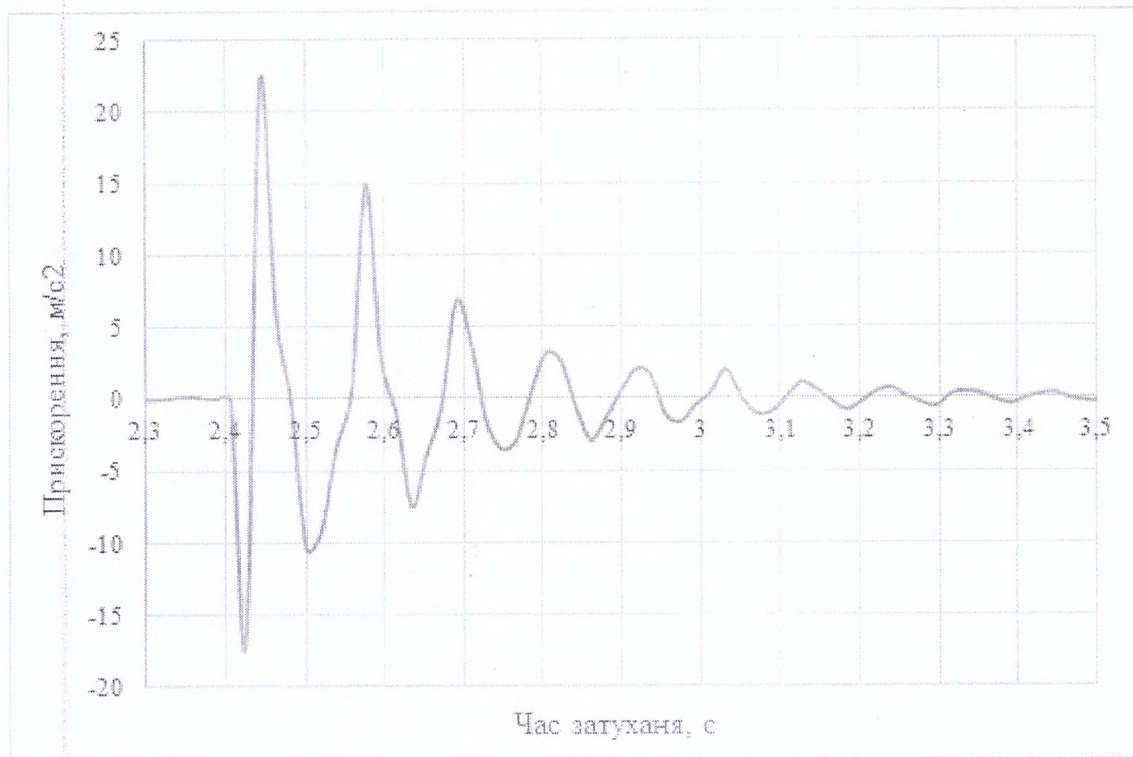


Рисунок 3.15 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елемента ($P_B=1$ атм).

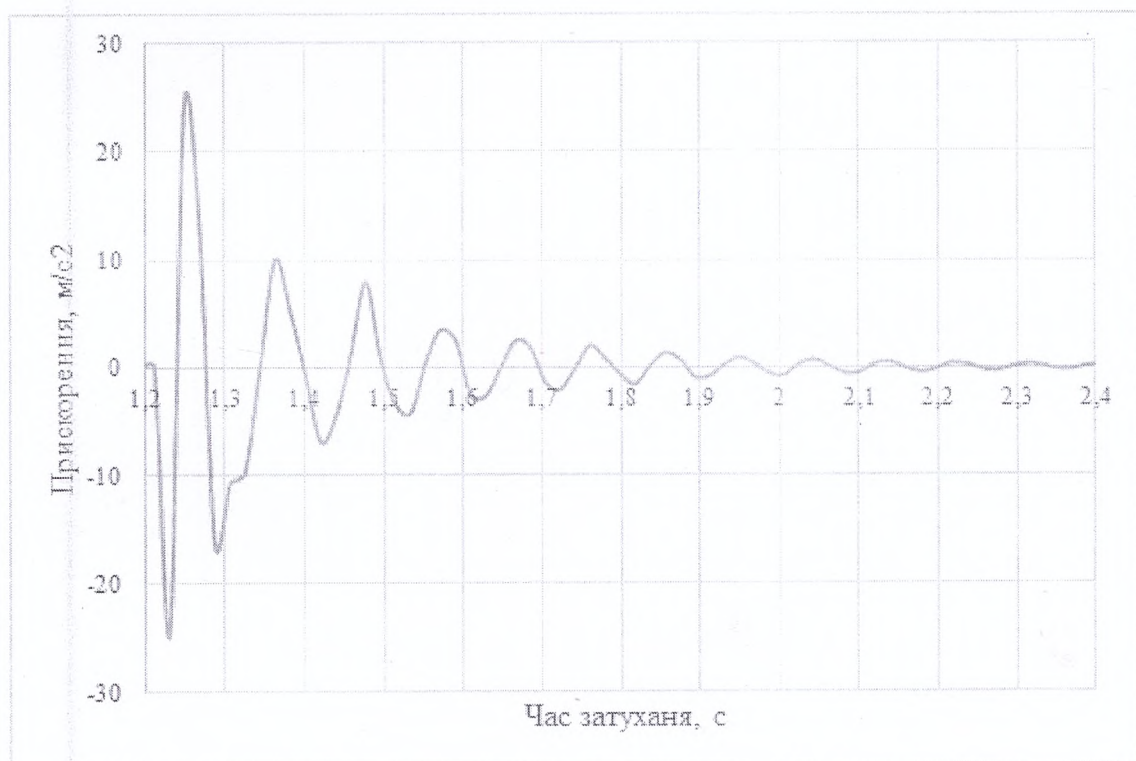


Рисунок 3.16 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елемента ($P_B=1,5$ атм).

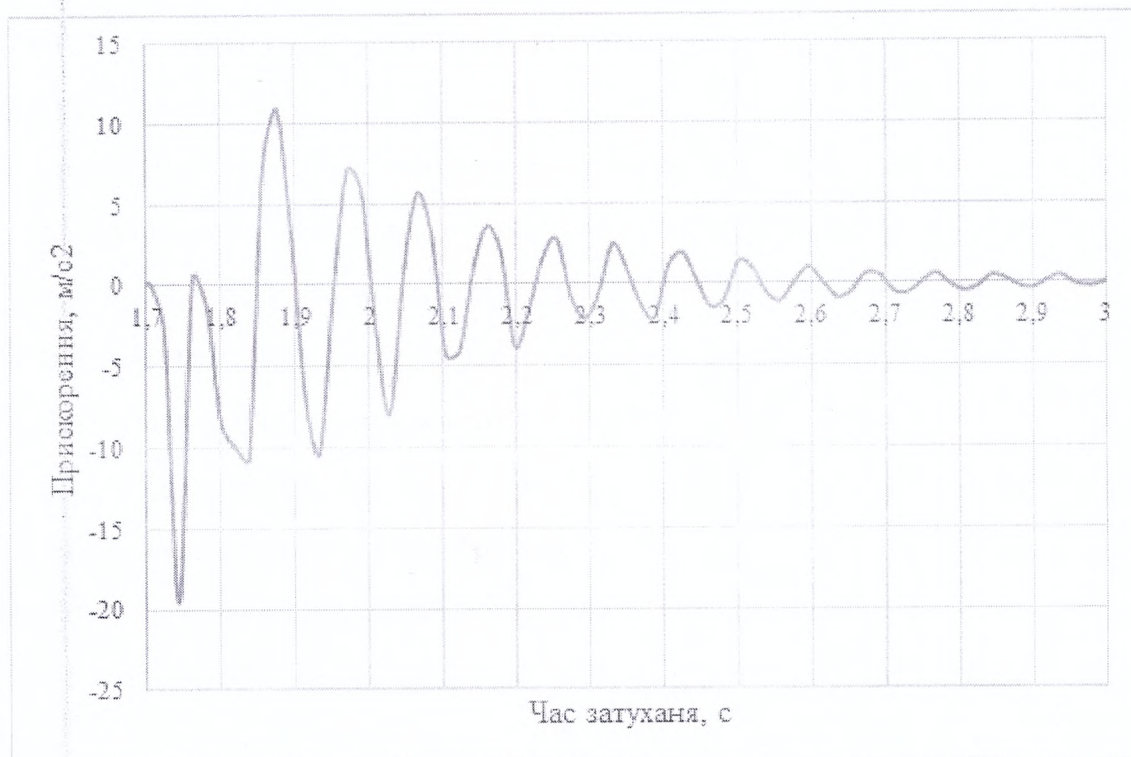


Рисунок 3.17 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елемента ($P_B=2$ атм).

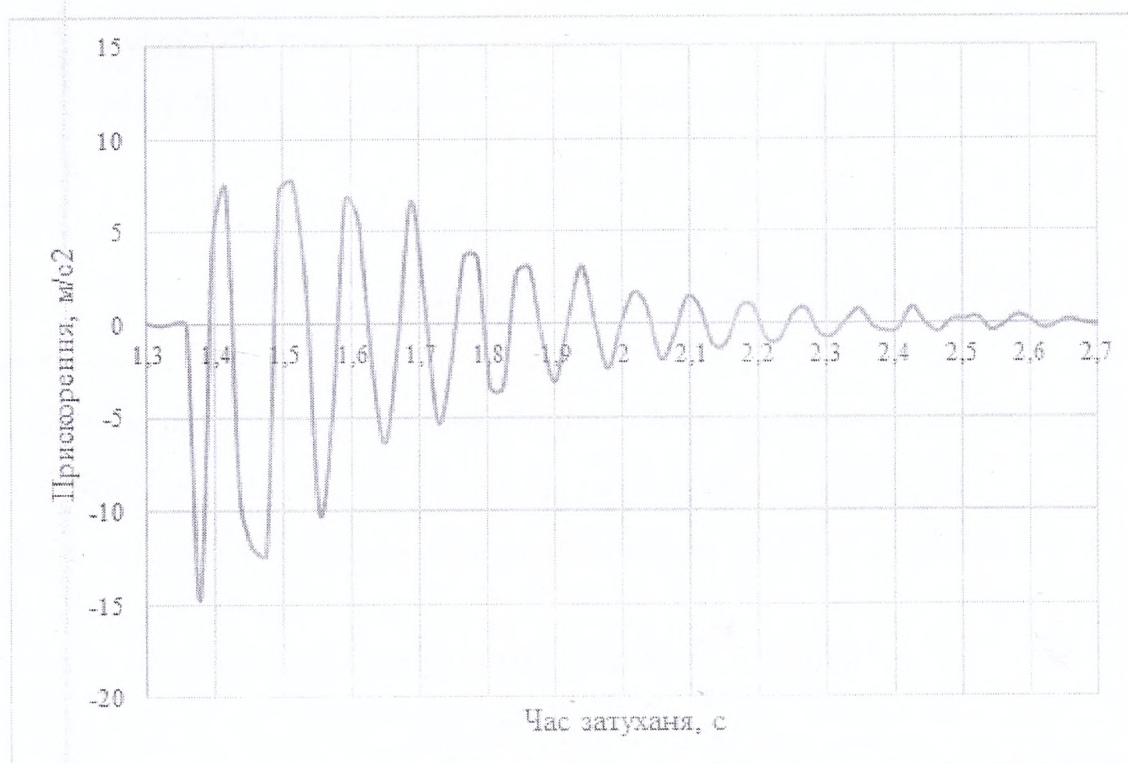


Рисунок 3.18 – Експериментально визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елемента ($P_B=2,5$ атм).

Детальне вивчення графічних залежностей на рисунках 3.13 – 3.18 дає дісний час затухання:

- для металевого пружного елемента час рівний 3,05 с;
- для пневматичного пружного елемента при $P_B=0,5$ атм – 1,02 с;
- для пневматичного пружного елемента при $P_B=1$ атм к – 1,1 с;
- для пневматичного пружного елемента при $P_B=1,5$ атм – 1,09 с;
- для пневматичного пружного елемента при $P_B=2$ атм – 1,3 с;
- для пневматичного пружного елемента при $P_B=2,5$ атм – 1,35 с.

Аналіз даних показує, що процес затухання у пневматичному пружному елементі при всіх тиска відбувається майже втричі швидше.

Для отримання диференційних рівнянь, які описують процес затухання коливань у пружних елементах використано методику д.т.н., професора Крота О.Ю. [17].

За отриманим експериментально графіками (рис. 3.13-3.18) визначимо:

- 1) період та частоту коливань вантажу;
- 2) логарифмічний декремент коливань;
- 3) коефіцієнт в'язкого опору середовища (у диференційному рівнянні коливань);
- 4) жорсткість “с” пружного елемента;
- 6) отримаємо (з числовими значеннями коефіцієнтів) рівняння затухаючих коливань вантажу.

Для прикладу приведено визначення рівняння для пневматичного пружного елемента при $P_B=1$ атм, всі інші розрахунки наведено у додатку Б.

На відрізку п'яти повних циклів коливань укладається приблизно 5 поділок шкали. 1 поділка – 0,1 с.

Отже, умовний період затухаючих коливань, с, дорівнює

$$T_1 = \frac{2,91 - 2,43}{5} = 0,096. \quad (3.14)$$

Кругова частота, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$

$$k = \frac{2\pi}{T_1} \quad (3.15)$$

$$k = \frac{2 \cdot 3,14}{0,096} = 65,45 \quad (3.16)$$

Визначаємо логарифмічний декремент коливань (декремент згасання).

Натуральний логарифм відношення амплітуд, що слідують один за одним через період T , називається логарифмічним декрементом згасання.

Час релаксації τ - час, протягом якого амплітуда A зменшується в e разів. ($e=2,718$).

Отже, логарифмічний декремент згасання δ (в різних джерелах використовуються різні літери, наприклад, χ) є фізична величина, зворотна числу коливань, після закінчення яких амплітуда зменшується в e разів.

При великому коефіцієнті згасання відбувається не тільки швидке зменшення амплітуди, але і помітно збільшується період коливань. Коли опір дорівнює критичному, то кругова частота обертається на нуль, а коливання припиняються. Такий процес називається аперіодичним.

Таблиця 3.8 – Амплітуди коливань на п'яти періодах (рис. 3.15).

a_i, b_i	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4	a_5	b_5
м/с ²	-17,07	21,91	-10,38	14,89	-7,47	6,72	-3,5	3,12	-2,9	1,97

Логарифмічний декремент

$$\delta = \ln \left(\frac{\frac{a_1}{a_2} + \frac{b_1}{b_2} + \frac{a_2}{a_3} + \frac{b_2}{b_3} + \frac{a_3}{a_4} + \frac{b_3}{b_4} + \frac{a_4}{a_5} + \frac{b_4}{b_5}}{8} \right) \quad (3.17)$$

$$\delta = \ln \left(\frac{\frac{-17,07}{-10,38} + \frac{21,91}{14,89} + \frac{-10,38}{-7,47} + \frac{14,89}{6,72} + \frac{-7,47}{-3,5} + \frac{6,72}{3,12} + \frac{-3,5}{-2,9} + \frac{3,12}{1,97}}{8} \right) = 0,545 \quad (3.18)$$

Загальноприйняте диференційне рівняння коливань

$$m \cdot \ddot{x} + \alpha \cdot \dot{x} + c \cdot x = 0. \quad (3.19)$$

Використовувані позначення при масі вантажу $m = 4 \text{ кг}$.

$$n = \frac{\alpha}{2m}, \quad (3.20)$$

$$k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}. \quad (3.21)$$

$$k_1 = \sqrt{65,45^2 - 5,68^2} = 65,696. \quad (3.22)$$

Власна частота коливань системи

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (3.23)$$

Тоді

$$n = \frac{\delta}{T_1}, \quad (3.24)$$

$$n = \frac{0,545}{0,096} = 5,68 \frac{1}{c}. \quad (3.25)$$

Тоді коефіцієнт в'язкого опору, $\frac{Hc}{m}$

$$\alpha = 2mn, \quad (3.26)$$

$$\alpha = 2 \cdot 4 \cdot 5,68 = 45,436. \quad (3.27)$$

Оскільки на координаті $t = 0$ кут нахилу дотичної до кривої $x = x(t)$ (тобто швидкість зміни прискорення) є невеликим, то вважаємо, що початкова швидкість зміни прискорення дорівнює нулю ($v_0 \approx 0$).

Рівняння затухаючих коливань для системи що розглядається матиме вигляд:

$$x(t) = e^{-nt} \left(x_0 \cdot \cos k_1 t + \frac{v_0 + n \cdot x_0}{k_1} \cdot \sin k_1 t \right) \quad (3.28)$$

Після проведених розрахунків отримаємо:

$$x(t) = e^{-5,68t} (-17,07 \cdot \cos 65,45 \cdot t - 5,94 \cdot \sin 65,696 \cdot t) \quad (3.29)$$

Отриманий вираз (3.29) є диференціальним рівнянням затухаючих коливань отриманих експериментальним шляхом, дані для виведення якого взято з рисунка. За допомогою програмного забезпечення MathCad відобразимо отримане рівняння у графічному вигляді (рис. 3.19).

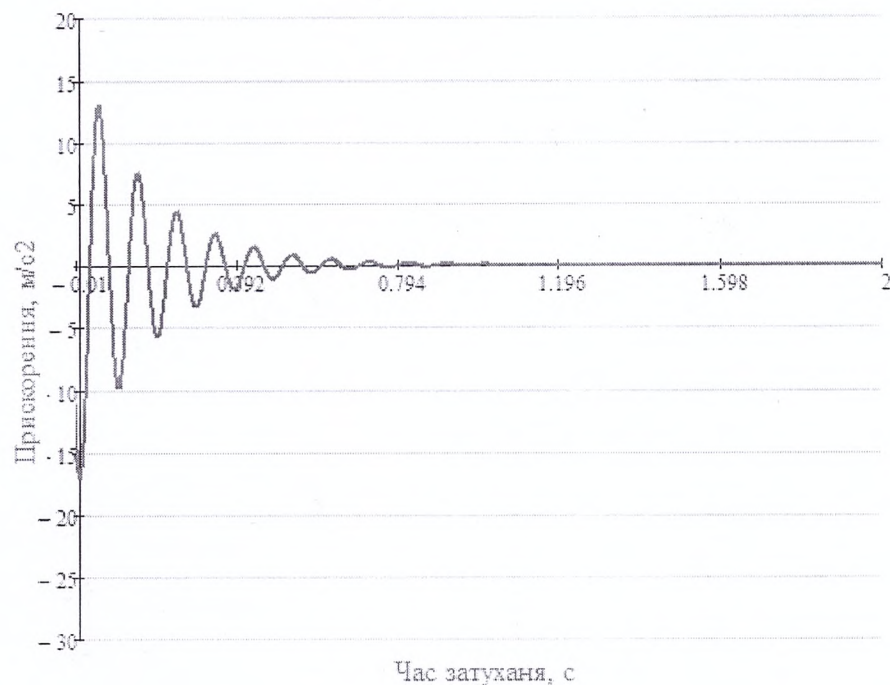


Рисунок 3.19 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=1$ атм).

За аналогією отримано графічні залежності (рис. 3.20-3.24) для інших пружних елементів. Порівняння отриманих графічних залежностей з графіками затухання коливань отриманих експериментальним шляхом приходимо до висновку, що вони схожі, та фізичні процеси які в них протікають подібні. Із збільшенням тиску повітря у пневматичному пружному елементі збільшується період затухання, тобто до повного затухання, збільшується кількість коливань самого пружного елементу, але скорочується час затухання і зменшуються амплітуди коливань.

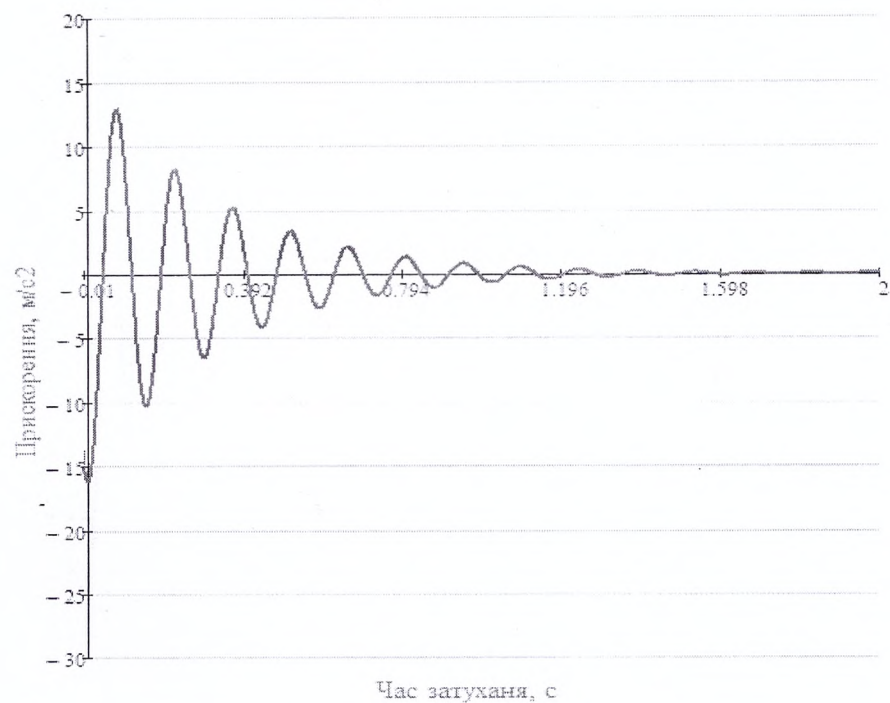


Рисунок 3.20 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань металевого пружного елементу.

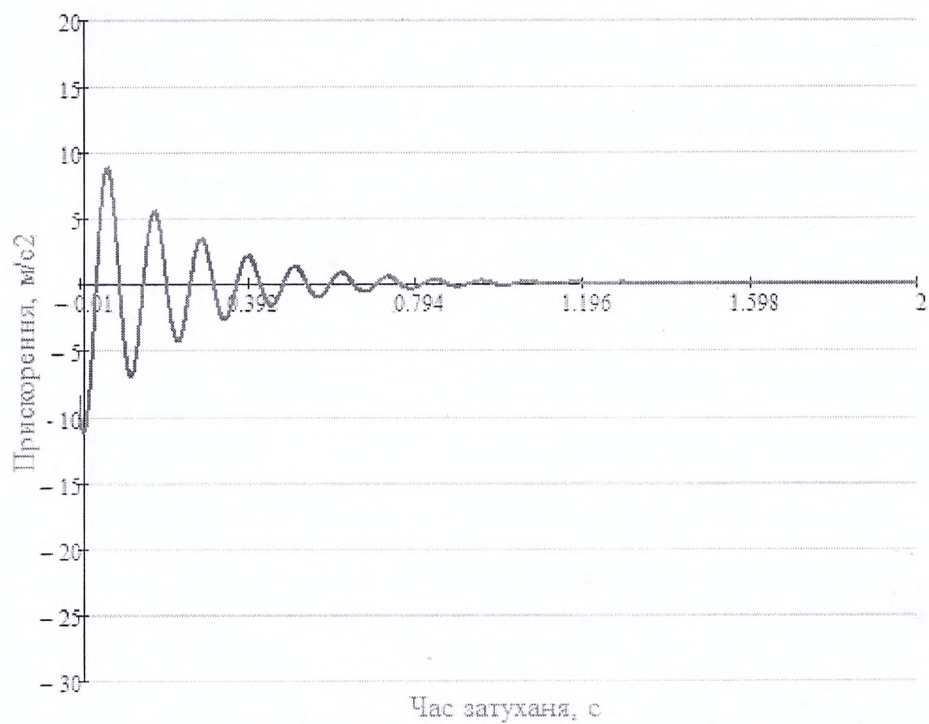


Рисунок 3.21 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=0,5$ атм).

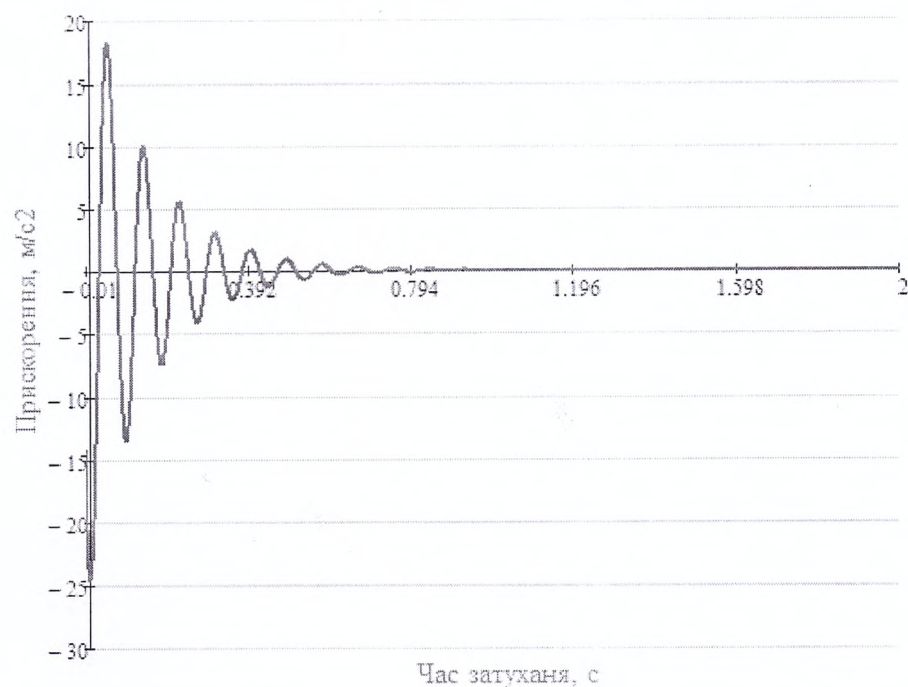


Рисунок 3.22 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=1,5$ атм).

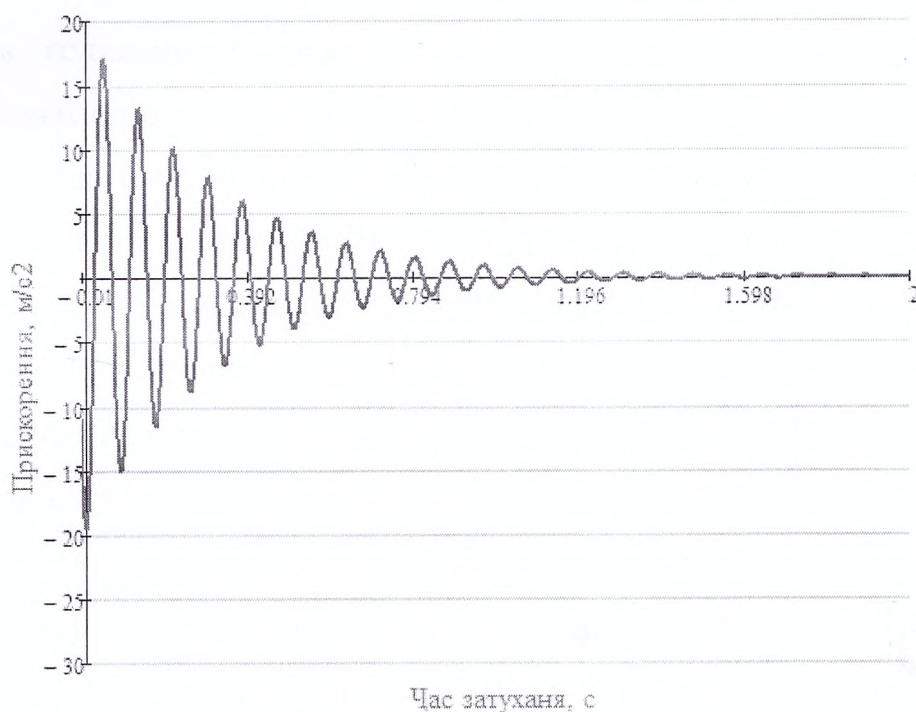


Рисунок 3.23 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=2$ атм).

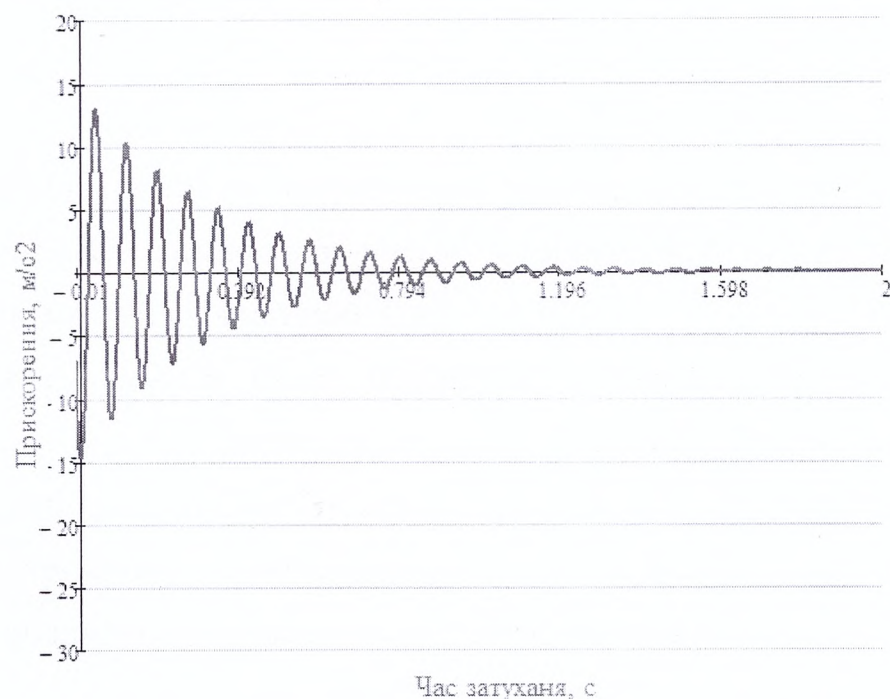


Рисунок 3.24 – Математично визначений процес затухання найбільших коливань у пневматичного пружного елементу ($P_B=2,5$ атм).

Кількість коливань до повного затухання на графічних залежностях отриманих математичним шляхом (рис. 3.20-3.24) будуть:

- для металевого пружного елементу – 10;
- для пневматичного пружного елементу при $P_B=0,5$ атм – 9;
- для пневматичного пружного елементу при $P_B=1$ атм – 8;
- для пневматичного пружного елементу при $P_B=1,5$ атм – 9;
- для пневматичного пружного елементу при $P_B=2$ атм – 19;
- для пневматичного пружного елементу при $P_B=2,5$ атм – 21.

Отримані результати досліджень доводять ефективність використання пневматичних пружних елементів для буферних механізмів всіх категорій вантажопідіймальної техніки. Тим більше, за рахунок використання пневматичного пружного елементу, що дозволяє змінювати жорсткість і пружність системи лише зміною внутрішнього тиску, це додатково створює менші затрати на виробництво буферів для кранів різноманітних компоновок.

3.3 Висновки до розділу 3

1. На основі аналізу теоретичних досліджень кранових буферних пристосувань встановлено, що гідро-пневмобуфери пропонують значні переваги майже за всіма робочими параметрами (таблиця 3.2).

2. Виведене рівняння (3.13) перевірене за допомогою моделюванням (імітаційним методом), порівняння значень яких показало мінімальну похибку.

3. Проведені дослідження показали, що процес затухання коливань у пневматичному пружному елементі при всіх досліджуваних тиска відбувається майже втричі швидше ніж у металевому пружному елементі.

					ГММ.602-ММв.009 – 00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		63

Висновки

1 Виконано аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів. Досліджено типи і характеристик буферних пристроїв.

2 Проведений аналіз наукових праць, показав, що для запобігання руху маси крана в протилежному напрямку необхідно будувати буферні пристрої зі змінною жорсткістю. Це забезпечує максимальний коефіцієнт поглинання кінетичної енергії при наїзді мостового крана на буферний пристрій і значно знижує динамічні навантаження на металоконструкцію крана, підвищуючи тим самим надійність і довговічність.

3 Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери, і при спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини, яку можна замінити на пневмоелемент із змінною жорсткістю.

4 На основі аналізу теоретичних досліджень кранових буферних пристосувань встановлено, що гідро-пневмобуфери мають значні переваги майже за всіма робочими параметрами.

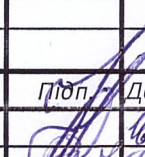
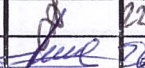
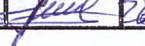
5 Підібрано, уточнено й описано обладнання та програмне забезпечення для експериментального дослідження робочих процесів пружинного та пневматичних елементів буферів.

6 Виконано та оброблено комплекс експериментальних дослідження робочих процесів пружинного і пневматичних елементів, які показали, що процес затухання коливань у пневматичному пружному елементі при всіх досліджуваних тиска відбувається майже втричі швидше ніж у металевому пружному елементі.

ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000ПЗ					Висновки		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			
Розроб.	Камчатний			16.08			
Перев.	Криворот			16.08			
Н. контр.	Васильєв			22.08			
Затв.	Орисенко			26.08			
					Літ.	Лист	Листів
					Н	64	1
					НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТР, 2024 р.		

Список літератури

1. Thompson, R. G., & Sahin, H. "Cushioning and Absorbing Technologies for Overhead Cranes." *Materials Handling Engineering*, vol. 50, no. 8, 2017, pp. 25-32.
2. Жигулін О. А., Махмудов І. І., Жигуліна Н. О. Підйомно-транспортні машини: Навчальний посібник. Ніжин, 2020. 150 с
3. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання: НПАОП 0.00-1. 80-18, 2018.
4. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підіймальних і транспортувальних машин: Підручник / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник та ін. – К. : Вища шк., 2009. – 734 с.
5. Тіщенко Л. М. Проектування вантажопідіймних машин та навантажувачів / Л. М. Тіщенко, В. О. Білостоцький. – Харків, 2003. – 401 с.
6. Іванченко Ф. К. Підйомно-транспортні машини / Ф. К. Іванченко. – К. : Вища школа, 1993. – 413 с.
7. Підйомно-транспортні та вантажно-розвантажувальні машини: підручник / О.М. Лівінський, О.І. Курок, Л.Є. Пелевін та ін. – К.: «МП Леся», 2016. – 676 с.
8. Козуб Ю. Г. Підйомно-транспортні машини : підручник / Ю.Г. Козуб, С.В. Маслійов – Старобільськ: Вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2018. – 277с.
9. Іваненко О. І. Підвищення ефективності захисної системи вантажопідіймних кранів при угоні вітром : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. І. Іваненко ; Одес. держ. політехн. ун-т. – О., 1999. – 19 с.

ГММ.602–ММв.009 – 00.00.000ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Камчатний		16.08
Перев.		Криворот		16.08
Н. контр.		Васильєв		22.08
Затв.		Орисенко		26.08

Список літератури

Лім.	Лист	Листів
Н	65	2

НУ «ПП імені Юрія Кондратюка», ННІТР,
2024 р.

10. Підйомно-транспортні машини та механізми : лабораторний практикум / Л. К. Поліщук, А. В. Слабкий. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 74 с.
11. Хмара Л.А., Колісник М.П., Голубченко О.І. Будівельні крани. Конструкція та експлуатація.-К.: Техніка, 2001.-294 с
12. Яким Р. С. Приводи транспортних машин : навчальний посібник. Дрогобич : Редакційновидавничий відділ Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, 2020. 240 с.
13. Yang, Q., Qu, F., Yu, Z., Xie, Z. (2019). Stress and stability analysis of slewing motion for crawler crane mounted on flexible ground. Engineering Failure Analysis, 105, 817–827. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.005>
14. В.С. Ловеїкін, Ю.О. Ромасевич. Динаміка машин. – Київ, 2013. Навчальний посібник.
15. Ісьєміні І. І. Підвищення ефективності захисних систем кранів мостового типу застосуванням пневмогідравлічних буферів: дис. ... канд. техн. наук / І. І. Ісьєміні. – Харків, 2014.– 154 с.
16. Accelerometer Meter: веб-сайт. URL: <https://www.keuwl.com/Accelerometer/> (дата звернення: 20.06.2024).
17. Методичні рекомендації до проведення практичних занять з дисципліни «Експериментальні методи досліджень в інженерній механіці» для студентів за спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 274 «Автомобільний транспорт» усіх форм навчання. Укладач: О.Ю. Крот, докт. техн. наук, професор. – Полтава, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2022. – 123 с.

Додаток А

Keuwl Accelerometer Data File
2023-11-24 14:54:51

Time (s), X (m/s²), Y (m/s²), Z (m/s²), R (m/s²), Theta (deg), Phi (deg)

0.0000000,0.154935,9.455538,0.519243,9.471051,86.857231,89.061256
0.0189465,0.178863,9.539586,0.612563,9.560906,86.326569,88.925850
0.0378937,0.159721,9.561121,0.581456,9.580116,86.520348,89.042946
0.0568387,0.152542,9.508479,0.588634,9.527904,86.458008,89.080894
0.0757838,0.164507,9.465408,0.591027,9.485269,86.427582,89.004311
0.0947288,0.166899,9.482158,0.593420,9.502174,86.419495,88.991615
0.1136739,0.166899,9.518050,0.602991,9.538591,86.375572,88.995422
0.1326196,0.169292,9.530014,0.595813,9.550122,86.423111,88.982300
0.1515676,0.166899,9.503694,0.588634,9.523368,86.456322,88.993904
0.1705167,0.157328,9.486943,0.574277,9.505610,86.536392,89.049911
0.1894634,0.157328,9.503694,0.552742,9.521054,86.671837,89.051590
0.2084090,0.152542,9.520443,0.559920,9.538114,86.634605,89.082047
0.2273532,0.150150,9.527621,0.533599,9.543733,86.794868,89.097130
0.2462972,0.152542,9.501301,0.519243,9.516702,86.872322,89.080200
0.2652425,0.145364,9.510872,0.504886,9.525373,86.961655,89.124359
0.2841870,0.142971,9.544372,0.504886,9.558785,86.972282,89.141792
0.3031304,0.142971,9.558728,0.507278,9.573247,86.962524,89.143082
0.3220746,0.145364,9.518050,0.509671,9.532795,86.935219,89.125023
0.3410192,0.152542,9.498908,0.504886,9.513539,86.957870,89.079971
0.3599640,0.157328,9.513265,0.521635,9.528854,86.861908,89.052544
0.3789083,0.162114,9.515657,0.538385,9.532254,86.762192,89.023972
0.3978526,0.183649,9.510872,0.550349,9.528552,86.688873,88.893791
0.4168005,0.190828,9.494123,0.559920,9.512533,86.625542,88.848534
0.4357500,0.195613,9.508479,0.574277,9.527814,86.544472,88.821449
0.4546970,0.198006,9.539586,0.583849,9.559486,86.498459,88.810928
0.4736418,0.205185,9.522836,0.581456,9.542777,86.506714,88.765663
0.4925869,0.200399,9.484550,0.593420,9.505210,86.420639,88.789581
0.5115330,0.193220,9.479765,0.581456,9.499545,86.490799,88.832336
0.5304787,0.190828,9.515657,0.581456,9.535316,86.503983,88.851143
0.5494242,0.183649,9.515657,0.564706,9.534168,86.604401,88.894348
0.5683696,0.171685,9.496515,0.564706,9.514839,86.597496,88.964279
0.5873120,0.169292,9.513265,0.547956,9.530537,86.703972,88.980507
0.6062533,0.152542,9.546764,0.535992,9.563015,86.786980,89.084579
0.6251978,0.140578,9.527621,0.521635,9.542926,86.866539,89.154671
0.6441433,0.133400,9.486943,0.509671,9.501560,86.925133,89.194397
0.6630881,0.131007,9.496515,0.507278,9.510957,86.942612,89.209641
0.6820326,0.121137,9.553943,0.507278,9.568168,86.960907,89.273575
0.7009760,0.126221,9.570692,0.504886,9.584830,86.980522,89.244408
0.7199214,0.123829,9.496515,0.504886,9.510733,86.956970,89.252945
0.7388690,0.116351,9.484550,0.507278,9.498819,86.938698,89.297165
0.7578177,0.126221,9.520443,0.514457,9.535168,86.907181,89.240417
0.7767662,0.138186,9.549157,0.528814,9.564786,86.830643,89.170929
0.7957126,0.145364,9.534800,0.535992,9.550959,86.782913,89.126556
0.8146569,0.154935,9.498908,0.552742,9.516238,86.670151,89.065536
0.8336009,0.162114,9.484550,0.562313,9.502587,86.607552,89.020775
0.8525464,0.171685,9.491729,0.562313,9.509920,86.610176,88.963753
0.8714944,0.181256,9.522836,0.569492,9.541571,86.578247,88.909569
0.8904414,0.190828,9.501301,0.586242,9.521282,86.469971,88.849403
0.9093860,0.198006,9.522836,0.579063,9.542480,86.521004,88.808830
0.9283326,0.209970,9.527621,0.576670,9.547366,86.537170,88.737518

0.9472818,0.212363,9.506086,0.569492,9.525496,86.572472,88.720245
0.9662295,0.202792,9.496515,0.567099,9.515594,86.583328,88.776672
0.9851734,0.193220,9.527621,0.557528,9.545876,86.651733,88.838196
1.0041174,0.195613,9.515657,0.552742,9.533705,86.676262,88.822334
1.0230631,0.171685,9.484550,0.533599,9.501100,86.780472,88.962975
1.0420078,0.166899,9.513265,0.533599,9.529679,86.790131,88.994911
1.0609531,0.154935,9.551550,0.519243,9.566908,86.888748,89.070686
1.0798976,0.142971,9.561121,0.509671,9.575763,86.948982,89.143295
1.0988402,0.131007,9.513265,0.500100,9.527301,86.991089,89.211029
1.1177859,0.116351,9.474979,0.500100,9.488881,86.978897,89.296455
1.1367314,0.116351,9.494123,0.512064,9.508633,86.912987,89.297874
1.1556742,0.109173,9.546764,0.509671,9.560983,86.944260,89.344818
1.1746181,0.113958,9.527621,0.519243,9.542440,86.880768,89.314728
1.1935619,0.123829,9.489336,0.533599,9.505134,86.781837,89.252373
1.2125071,0.131007,9.503694,0.538385,9.519833,86.757965,89.210236
1.2314521,0.145364,9.537193,0.545564,9.553890,86.726410,89.126778
1.2503966,0.154935,9.522836,0.547956,9.539845,86.707191,89.067886
1.2693441,0.166899,9.482158,0.555135,9.499860,86.649948,88.991615
1.2882910,0.176471,9.498908,0.564706,9.517316,86.598381,88.935684
1.3072367,0.183649,9.527621,0.564706,9.546108,86.608650,88.895737
1.3261831,0.178863,9.532407,0.564706,9.550794,86.610321,88.925041
1.3451285,0.176471,9.513265,0.559920,9.531363,86.632217,88.937286
1.3640730,0.181256,9.496515,0.545564,9.513900,86.712639,88.906548
1.3830192,0.171685,9.501301,0.552742,9.518913,86.671089,88.964798
1.4019669,0.169292,9.515657,0.545564,9.532787,86.719154,88.980766
1.4209160,0.174078,9.534800,0.531207,9.551172,86.811745,88.954063
1.4398642,0.166899,9.518050,0.526421,9.534058,86.834816,88.995422
1.4588106,0.157328,9.510872,0.521635,9.526464,86.861115,89.052307
1.4777569,0.159721,9.518050,0.524028,9.533803,86.849136,89.038620
1.4967034,0.164507,9.520443,0.526421,9.536405,86.835594,89.010071
1.5156493,0.164507,9.513265,0.526421,9.529239,86.833214,89.009323
1.5345931,0.159721,9.515657,0.540778,9.532350,86.747818,89.038376
1.5535368,0.159721,9.530014,0.545564,9.546953,86.724030,89.039825
1.5724823,0.154935,9.496515,0.538385,9.513025,86.755638,89.065308
1.5914286,0.154935,9.472587,0.552742,9.489964,86.660927,89.062943
1.6103743,0.145364,9.515657,0.564706,9.533507,86.604164,89.124802
1.6293190,0.147757,9.553943,0.567099,9.571899,86.603455,89.113960
1.6482618,0.152542,9.510872,0.569492,9.529127,86.573776,89.081123
1.6672058,0.162114,9.457931,0.564706,9.476161,86.583588,89.018021
1.6861520,0.183649,9.482158,0.562313,9.500591,86.606842,88.890442
1.7050980,0.176471,9.541979,0.562313,9.560162,86.628006,88.940483
1.7240440,0.186042,9.568299,0.552742,9.586058,86.694435,88.886108
1.7429904,0.186042,9.520443,0.543171,9.537740,86.735260,88.880508
1.7619362,0.176471,9.484550,0.533599,9.501187,86.780495,88.934074
1.7808822,0.181256,9.494123,0.521635,9.510169,86.855736,88.906273
1.7998277,0.171685,9.525229,0.526421,9.541309,86.837227,88.967400
1.8187740,0.162114,9.549157,0.528814,9.565162,86.830765,89.027397
1.8377211,0.147757,9.544372,0.533599,9.560418,86.800468,89.113075
1.8566673,0.131007,9.525229,0.524028,9.540532,86.851357,89.212021
1.8756155,0.121137,9.491729,0.528814,9.507220,86.811432,89.268814
1.8945637,0.118744,9.484550,0.545564,9.500970,86.708160,89.282707
1.9135113,0.126221,9.530014,0.543171,9.546315,86.738197,89.241180
1.9324594,0.116351,9.546764,0.567099,9.564301,86.600754,89.301743
1.9514079,0.126221,9.503694,0.564706,9.521293,86.599800,89.239082

1.9703575,0.135793,9.472587,0.562313,9.490233,86.603134,89.178703
 1.9893064,0.142971,9.496515,0.569492,9.514649,86.568558,89.137474
 2.0082531,0.145364,9.539586,0.569492,9.557675,86.584023,89.126999
 2.0271993,0.157328,9.527621,0.579063,9.546498,86.522469,89.053970
 2.0461473,0.164507,9.477372,0.571885,9.496036,86.547356,89.005569
 2.0650942,0.166899,9.460623,0.562313,9.478788,86.599030,88.989319
 2.0840421,0.150150,9.518050,0.557528,9.535547,86.648102,89.096222
 2.1029918,0.154935,9.539586,0.557528,9.557119,86.655670,89.069527
 2.1219389,0.159721,9.465408,0.531207,9.481648,86.788338,89.033272
 2.1408856,0.157328,9.448359,0.526421,9.464321,86.811470,89.046036
 2.1598320,0.133400,9.630513,0.535992,9.646339,86.814758,89.206398
 2.1787779,0.121137,9.656834,0.550349,9.673262,86.738464,89.281311
 2.1977243,0.113958,9.484550,0.550349,9.501187,86.679329,89.311615
 2.2166712,0.123829,9.369396,0.540778,9.385806,86.696983,89.242805
 2.2356186,0.135793,9.474979,0.564706,9.492764,86.589569,89.178909
 2.2545643,0.121137,9.620942,0.586242,9.639548,86.513329,89.278633
 2.2735085,0.131007,9.580264,0.564706,9.597788,86.626930,89.216545
 2.2924526,0.145364,9.467801,0.524028,9.483406,86.832375,89.120377
 2.3113978,0.131007,9.419645,0.502493,9.433949,86.946732,89.203194
 2.3303452,0.118744,9.539586,0.437887,9.550368,87.372055,89.286850
 2.3492947,0.087637,9.642477,0.416351,9.651859,87.527672,89.479271
 2.3682456,0.054138,9.580264,0.354138,9.586960,87.883041,89.676231
 2.3871944,-0.103789,9.457931,0.246461,9.461711,88.507378,90.628723
 2.4061410,-0.091825,9.463016,-3.457330,10.075228,110.069000,90.555954
 2.4250865,2.594418,-7.568797,-10.160822,12.932903,141.781448,288.920593
 2.4440317,1.873879,31.412079,8.936893,32.712353,74.145447,86.586082
 2.4629769,-6.256633,15.536597,5.458328,17.616034,71.949814,111.934792
 2.4819231,0.413360,9.223434,-6.385247,11.225595,124.667389,87.433929
 2.5008683,0.181256,-0.886840,3.138486,3.266410,16.088129,281.551270
 2.5198123,0.286541,0.305384,1.632503,1.685358,14.387167,46.823349
 2.5387566,3.322135,6.156733,-1.206880,7.099190,99.787964,61.648972
 2.5577013,-2.619842,9.838689,10.765907,14.817831,43.401989,104.910706
 2.5766468,2.941676,24.392433,-13.265809,27.921782,118.366257,83.123459
 2.5955913,-0.029611,12.220743,3.593421,12.738135,73.614449,90.138832
 2.6145351,0.296112,8.404790,0.483350,8.423883,86.710648,87.982231
 2.6334784,-0.673580,2.033899,2.288436,3.134867,43.114075,108.323654
 2.6524205,0.238684,5.551049,-0.230010,5.560937,92.370529,87.537910
 2.6713612,-1.727020,8.880961,1.936691,9.252289,77.917480,101.004578
 2.6903045,2.749951,16.223936,-0.230010,16.456951,90.800819,80.379822
 2.7092497,1.064507,13.302897,0.124128,13.345999,89.467102,85.424904
 2.7281947,0.477966,7.942676,1.179961,8.044057,81.565002,86.556267
 2.7471409,0.042173,6.003293,0.464208,6.021361,85.578484,89.597504
 2.7660871,-0.321536,6.513263,0.995713,6.596774,81.318626,92.826187
 2.7850330,0.353540,9.824331,1.232603,9.907663,82.853371,87.939034
 2.8039780,1.107578,12.625429,0.713061,12.693961,86.779816,84.986511
 2.8229232,0.707976,12.084352,0.825823,12.133210,86.097260,86.647087
 2.8418701,0.607179,8.933903,0.600598,8.974631,86.162796,86.111961
 2.8608184,-0.075075,6.599405,0.476172,6.616987,85.873314,90.651772
 2.8797679,0.046959,8.071888,0.809073,8.112471,84.276260,89.666679
 2.8987157,0.873081,9.929616,1.122533,10.030933,83.574738,84.975075
 2.9176633,0.619143,11.476276,0.638884,11.510710,86.818253,86.911896
 2.9366131,0.468395,11.158031,0.742074,11.192486,86.198441,87.596230
 2.9555631,0.090030,8.390432,0.366102,8.398898,87.501724,89.385239
 2.9745114,0.101994,7.842177,0.593420,7.865258,85.673019,89.254860

2.9934580,0.681356,9.005687,0.488136,9.044607,86.906258,85.673332
3.0124040,0.255434,9.860224,1.022034,9.916341,84.084267,88.516060
3.0313506,0.427717,11.485847,0.502493,11.504787,87.496704,87.867371
3.0503006,-0.075075,9.652048,0.306281,9.657199,88.182541,90.445648
3.0692499,-0.063111,8.455039,0.406780,8.465054,87.245644,90.427666
3.0881989,0.241077,8.534002,0.303888,8.542813,87.961418,88.381882
3.1071458,0.207577,9.498908,0.545564,9.516827,86.713646,88.748131
3.1260924,0.126221,10.573585,0.586242,10.590576,86.826767,89.316071
3.1450405,-0.103789,10.109377,0.366102,10.116536,87.926102,90.588211
3.1639886,-0.130110,9.323933,0.184247,9.326661,88.868057,90.799477
3.1829369,0.013460,8.677571,0.073878,8.677896,89.512215,89.911133
3.2018850,0.070887,9.228220,0.306281,9.233574,88.099129,89.559883
3.2208333,0.020638,9.946365,0.547956,9.961469,86.846703,89.881111
3.2397814,-0.053539,10.171590,0.459422,10.182101,87.413902,90.301582
3.2587266,-0.127717,9.597013,0.311067,9.602903,88.143692,90.762444
3.2776721,0.013460,9.180363,0.172283,9.181989,88.924889,89.916000
3.2966166,0.003888,8.924331,0.167498,8.925903,88.924759,89.975037
3.3155587,-0.029611,9.764511,0.332602,9.770219,88.049133,90.173752
3.3345010,-0.055932,9.922438,0.471386,9.933786,87.280136,90.322968
3.3534434,0.049352,9.774082,0.533599,9.788761,86.875175,89.710701
3.3723862,0.104387,9.331111,0.447458,9.342417,87.254753,89.359062
3.3913307,0.109173,9.106186,0.287139,9.111366,88.194061,89.313126
3.4102764,0.094816,9.467801,0.380459,9.475917,87.698952,89.426231
3.4292231,0.020638,9.754940,0.488136,9.767167,87.135323,89.878784
3.4481711,0.109173,9.831510,0.528814,9.846327,86.921349,89.363792
3.4671183,0.265005,9.431609,0.595813,9.454124,86.386742,88.390549
3.4860635,0.332004,9.292826,0.595813,9.317823,86.333817,87.953865
3.5050085,0.224327,9.273684,0.569492,9.293860,86.486938,88.614304
3.5239527,0.159721,9.640084,0.598206,9.659947,86.449608,89.050789
3.5428994,0.241077,9.728619,0.610170,9.750715,86.412262,88.580490

Додаток Б

Декремент металлических пружинный элемент

$$T1 := \frac{4.71 - 3.98}{5}$$

$$T1 = 0.146$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 43.036$$

$$a1 := -16.19 \quad a2 := -13.73 \quad a3 := -9.74 \quad a4 := -5.35 \quad a5 := -2.4$$

$$b1 := 16.89 \quad b2 := 15.06 \quad b3 := 6.04 \quad b4 := 5.92 \quad b5 := 4.53$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.179 \quad \frac{b1}{b2} = 1.122 \quad \frac{a2}{a3} = 1.41 \quad \frac{b2}{b3} = 2.493$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.573$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.453$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 3.101$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 24.806$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 43.147$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 7.447 \times 10^3$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

$$x0 := a1 \quad v0 := 0$$

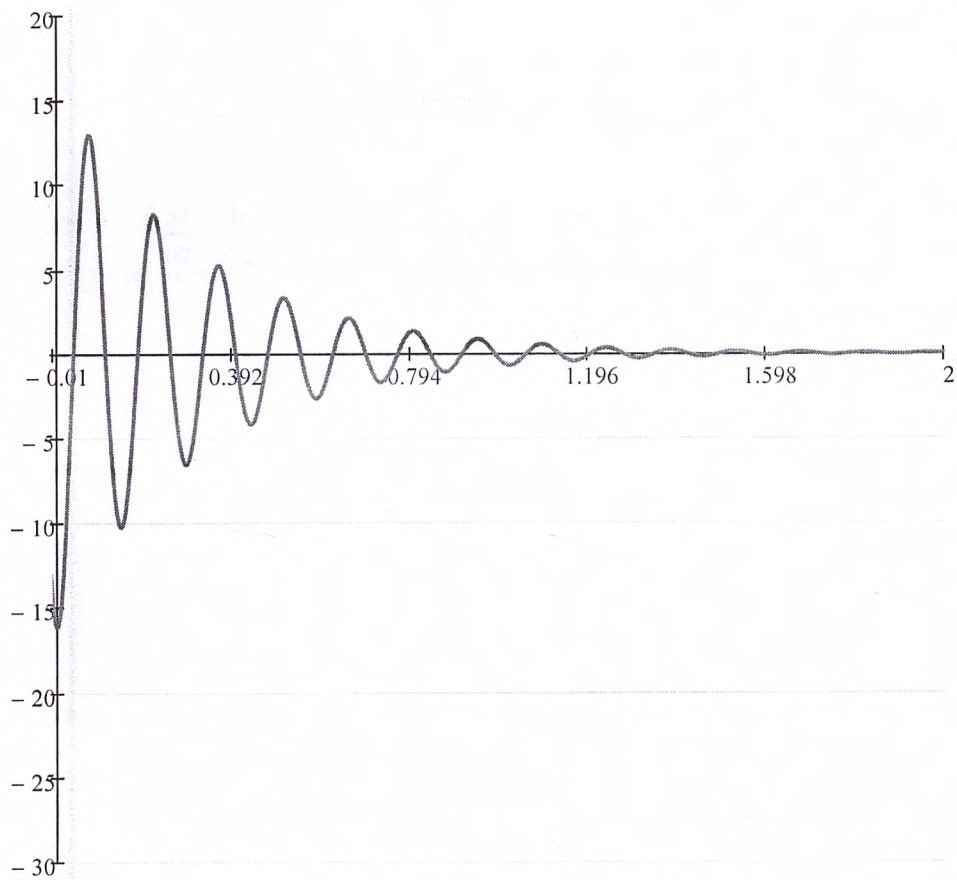
$$f(x) := e^{-nx} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right) \quad n = 3.101$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$

$$e^1 = 2.718$$



Декремент пневматичний пружний елемент тиск 0,5 атм

$$T1 := \frac{4.96 - 4.4}{5}$$

$$T1 = 0.112$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 56.1$$

$$a1 := -11.19 \quad a2 := -10.94 \quad a3 := -7.01 \quad a4 := -3.81 \quad a5 := -1.86$$

$$b1 := 14.28 \quad b2 := 7.85 \quad b3 := 5.48 \quad b4 := 3.18 \quad b5 := 2.23$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.023 \quad \frac{b1}{b2} = 1.819 \quad \frac{a2}{a3} = 1.561 \quad \frac{b2}{b3} = 1.432$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.609$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.476$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 4.247$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 33.976$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 56.26$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 1.266 \times 10^4$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

$$x0 := a1 \quad v0 := 0$$

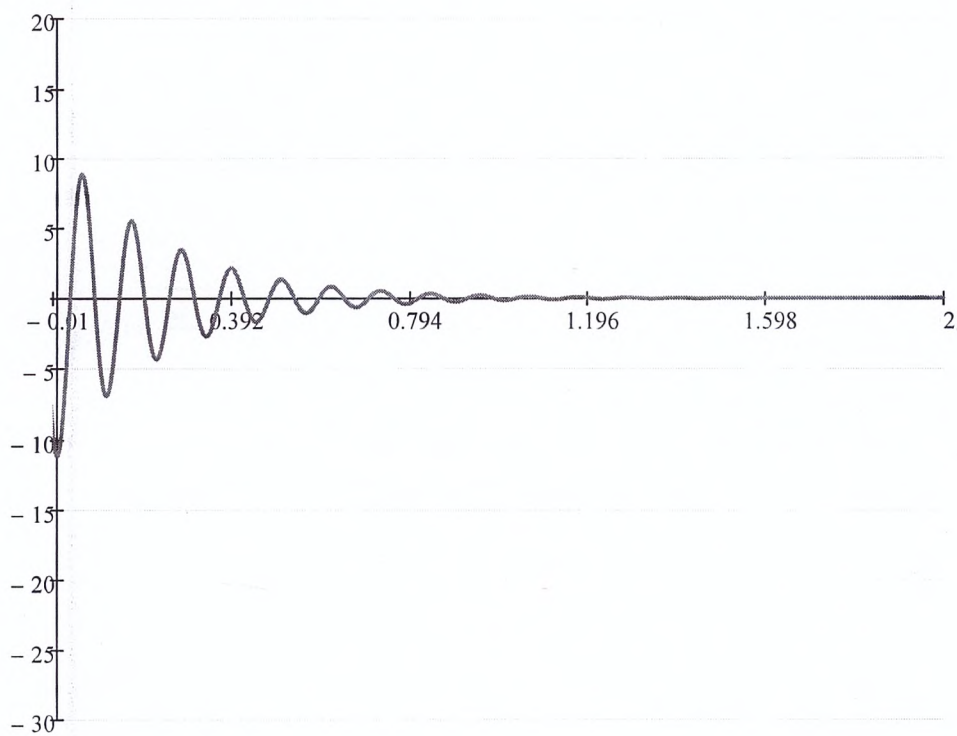
$$f(x) := e^{-nx} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right) \quad n = 4.247$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$

$$e^1 = 2.718$$



Декремент пневматичний пружний елемент тиск 1 атм

$$T1 := \frac{2.91 - 2.43}{5}$$

$$T1 = 0.096$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 65.45$$

$$a1 := -17.07 \quad a2 := -10.38 \quad a3 := -7.47 \quad a4 := -3.5 \quad a5 := -2.9$$

$$b1 := 21.91 \quad b2 := 14.89 \quad b3 := 6.72 \quad b4 := 3.12 \quad b5 := 1.97$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.645 \quad \frac{b1}{b2} = 1.471 \quad \frac{a2}{a3} = 1.39 \quad \frac{b2}{b3} = 2.216$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.725$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.545$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 5.68$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 45.436$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 65.696$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 1.726 \times 10^4$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

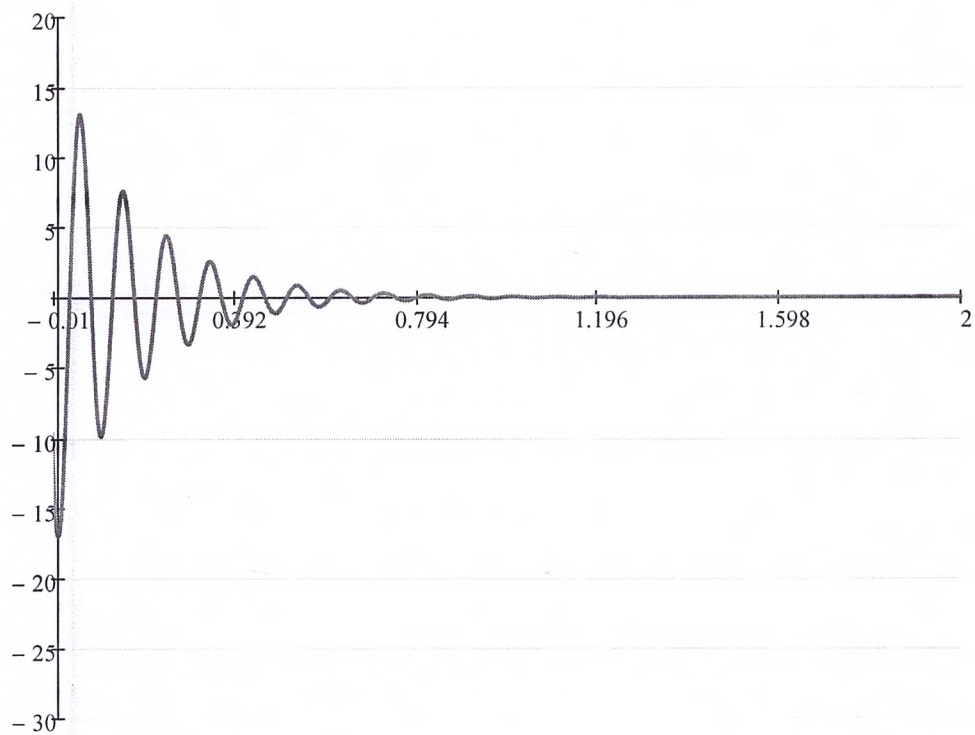
$$x0 := a1 \quad v0 := 0$$

$$f(x) := e^{-n \cdot x} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right) \quad n = 5.68$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$



Декремент пневматичний пружний елемент тиск 1,5 атм

$$T1 := \frac{1.67 - 1.23}{5}$$

$$T1 = 0.088$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 71.4$$

$$a1 := -24.59 \quad a2 := -16.45 \quad a3 := -6.91 \quad a4 := -4.25 \quad a5 := -2.65$$

$$b1 := 24.25 \quad b2 := 10.11 \quad b3 := 7.97 \quad b4 := 3.48 \quad b5 := 2.41$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.495 \quad \frac{b1}{b2} = 2.399 \quad \frac{a2}{a3} = 2.381 \quad \frac{b2}{b3} = 1.269$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.813$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.595$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 6.763$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 54.105$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 71.719$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 2.057 \times 10^4$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

$$x0 := a1$$

$$v0 := 0$$

$$f(x) := e^{-n \cdot x} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right)$$

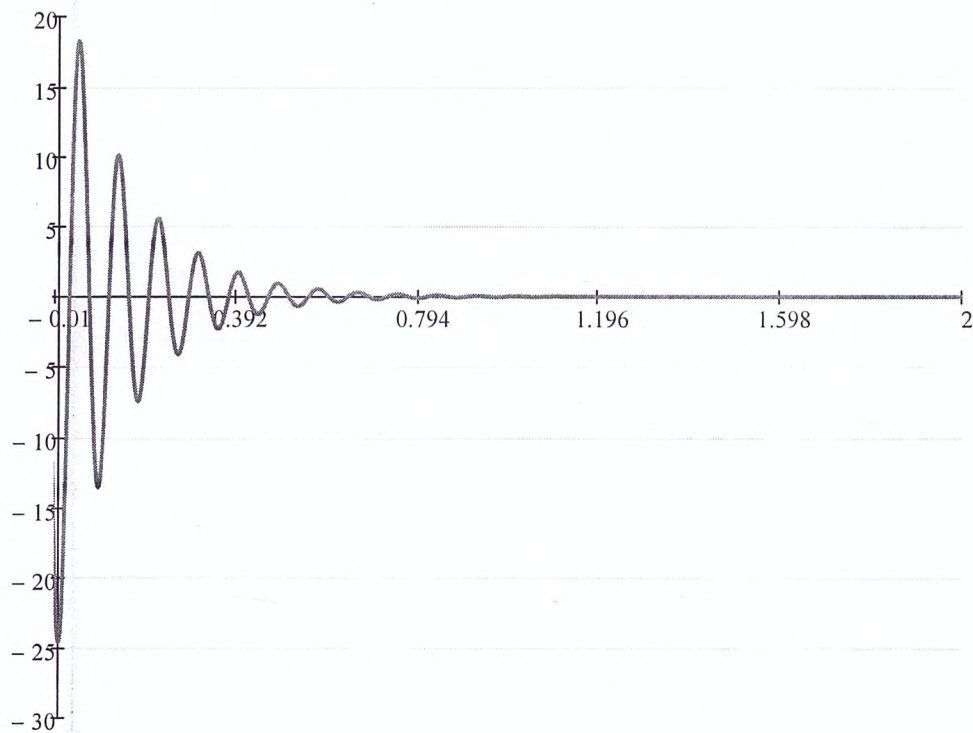
$$n = 6.763$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$

$$e^1 = 2.718$$



Декремент пневматичний пружний елемент тиск 2 атм

$$T1 := \frac{2.16 - 1.74}{5}$$

$$T1 = 0.084$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 74.8$$

$$a1 := -19.54 \quad a2 := -10.71 \quad a3 := -10.29 \quad a4 := -7.93 \quad a5 := -4.29$$

$$b1 := 0.44 \quad b2 := 10.91 \quad b3 := 7.14 \quad b4 := 5.68 \quad b5 := 3.61$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.824 \quad \frac{b1}{b2} = 0.04 \quad \frac{a2}{a3} = 1.041 \quad \frac{b2}{b3} = 1.528$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.301$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.263$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 3.135$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 25.08$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 74.865$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 2.242 \times 10^4$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

$$x0 := a1$$

$$v0 := 0$$

$$n = 3.135$$

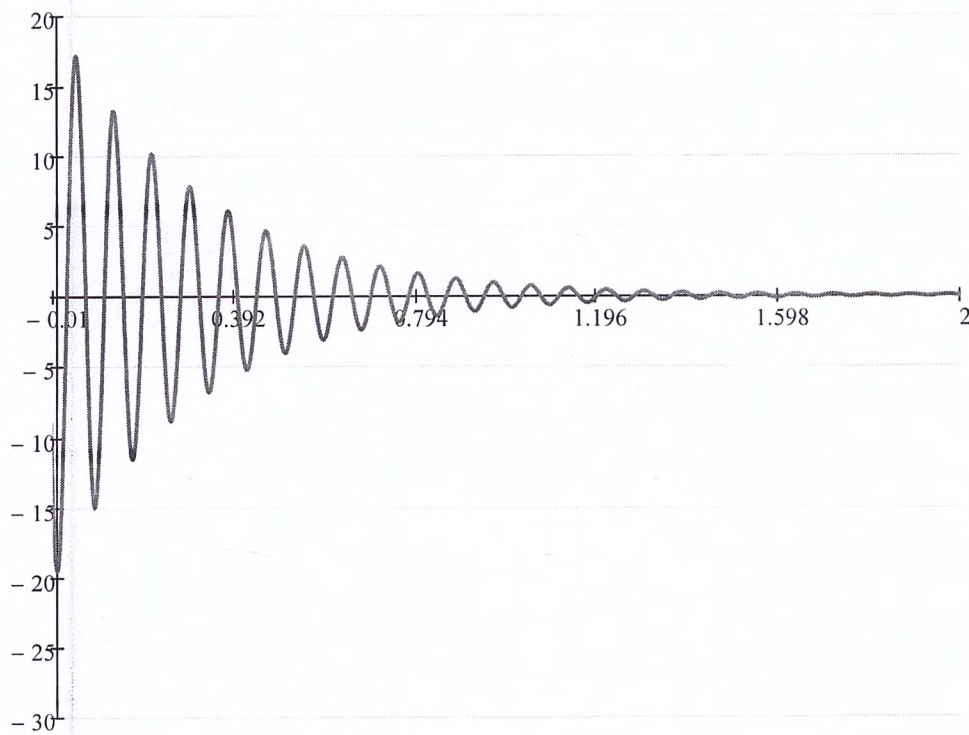
$$f(x) := e^{-nx} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right)$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$

$$e^1 = 2.718$$



Декремент пневматичний пружний елемент тиск 2,5 атм

$$T1 := \frac{1.76 - 1.38}{5}$$

$$T1 = 0.076$$

$$k1 := \frac{2\pi}{T1} \quad k1 = 82.673$$

$$a1 := -14.72 \quad a2 := -12.31 \quad a3 := -10.08 \quad a4 := -6.36 \quad a5 := -5.23$$

$$b1 := 7.34 \quad b2 := 7.75 \quad b3 := 6.71 \quad b4 := 6.65 \quad b5 := 3.65$$

$$\frac{a1}{a2} = 1.196 \quad \frac{b1}{b2} = 0.947 \quad \frac{a2}{a3} = 1.221 \quad \frac{b2}{b3} = 1.155$$

$$\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} = 1.269$$

$$\delta := \ln \left(\frac{\frac{a1}{a2} + \frac{b1}{b2} + \frac{a2}{a3} + \frac{b2}{b3} + \frac{a3}{a4} + \frac{b3}{b4} + \frac{a4}{a5} + \frac{b4}{b5}}{8} \right) \quad \delta = 0.238$$

$$n := \frac{\delta}{T1} \quad n = 3.133$$

$$m := 4$$

$$\alpha := 2m \cdot n$$

$$\alpha = 25.066$$

$$k := \sqrt{k1^2 + n^2} \quad k = 82.733$$

$$c := m \cdot k^2 \quad c = 2.738 \times 10^4$$

$$\frac{2.705 \cdot 0.15}{57.12} = 7.103 \times 10^{-3}$$

$$x0 := a1$$

$$v0 := 0$$

$$n = 3.133$$

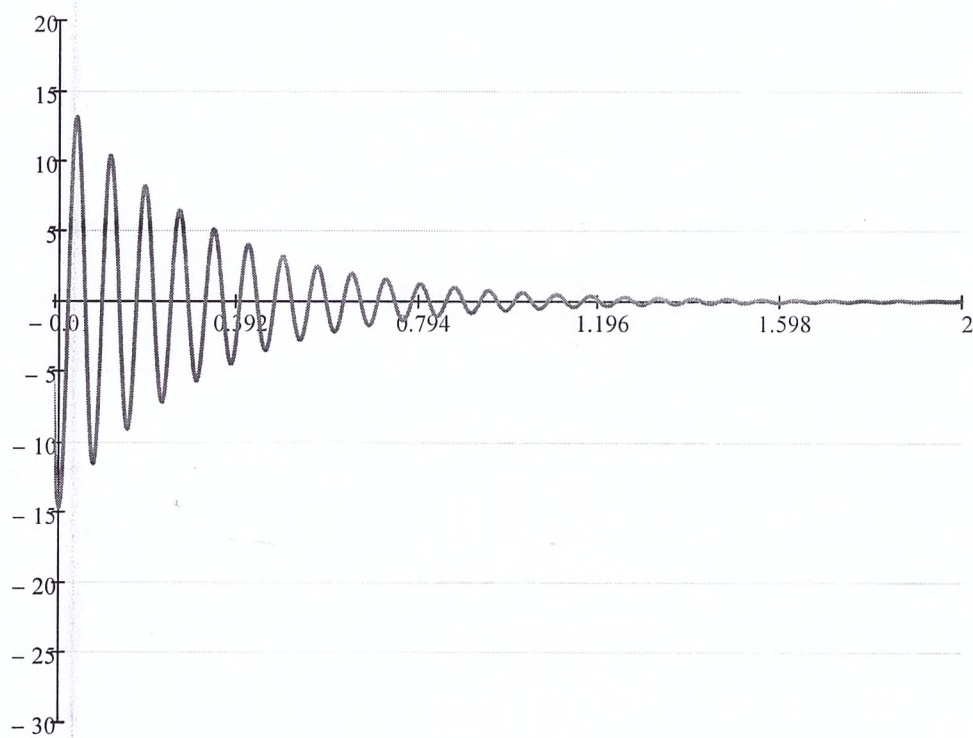
$$f(x) := e^{-nx} \cdot \left(x0 \cdot \cos(k1 \cdot x) + \frac{v0 + n \cdot x0}{k1} \cdot \sin(k1 \cdot x) \right)$$

$$r1 := 1$$

$$n := 1000$$

$$x := -r1, -r1 + \frac{r1}{n} .. 2r1$$

$$e^1 = 2.718$$



Презентаційні матеріали

Кваліфікаційна робота магістра

на тему

«Дослідження робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів»

Виконав: студент ІІ курсу, групи 602-ММів

Камчатний Олександр Михайлович

Керівник: к.т.н., доцент

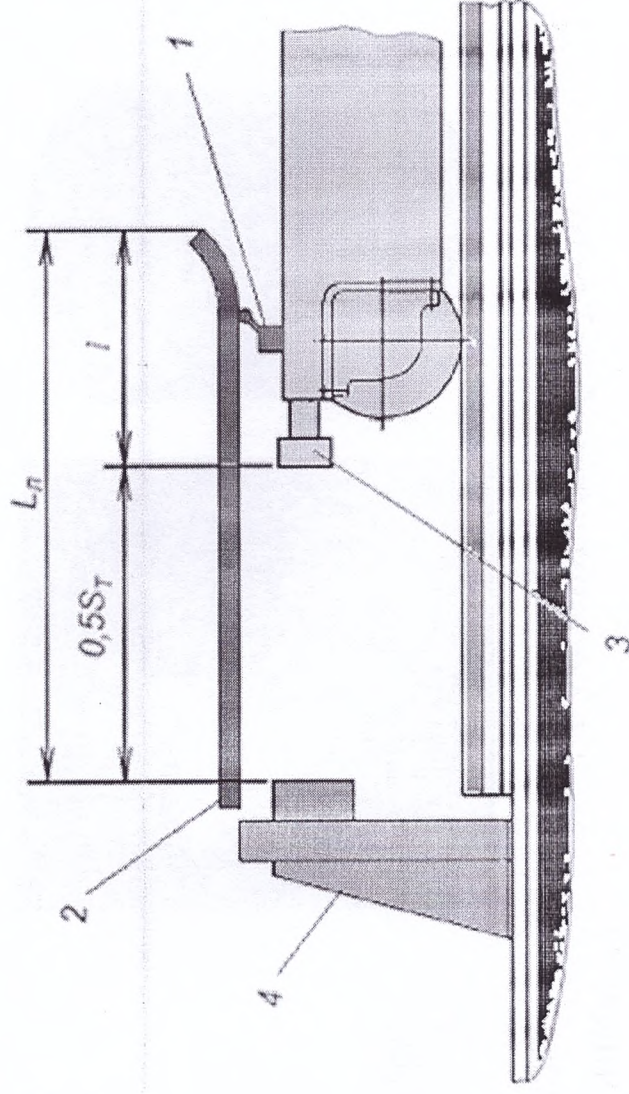
Криворот Анатолій Ігорович

Полтава – 2024 року

Мета магістерської роботи полягає в дослідженні робочих процесів та параметрів буферних пристроїв мостових кранів для оптимізації їхньої роботи і підвищення ефективності. У роботі будуть розглянуті різні типи буферних пристроїв, проаналізовано їхні характеристики, а також запропоновано шляхи покращення їхньої конструкції.

Для досягнення поставленої мети завдання сформульовані наступним чином:

- аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів;
- дослідження типів і характеристик буферних пристроїв;
- моделювання робочих процесів мостового крана та буферних пристроїв;
- визначення параметрів та характеристик досліджуваного пневмогідравлічного буферного пристрою;
- експериментальне дослідження робочих процесів пружинного та пневматичного пружних елементів.

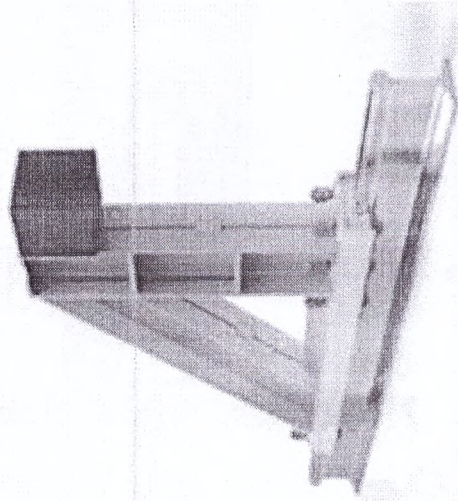


1 – кінцевий вимикач, 2 – комутаційна лінійка, 3 – буферний пристрій, 4 – тупиковий упор

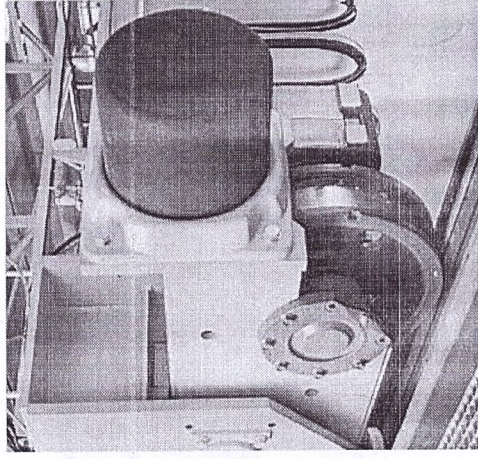
Основні вимоги [8] до характеристик буферних систем:

- 1) Для забезпечення безпечної роботи крана в разі відмови інших елементів системи захисту буфер повинен поглинати всю кінетичну енергію крана;
- 2) Значна частина кінетичної енергії, що поглинається буфером, повинна бути поглинута і перетворена в іншу форму енергії, щоб при відскоку не виникали ударні явища, які також згубно впливають на конструкцію крана;
- 3) Буфер повинна мати простий, компактний дизайн і бути недорогою;
- 4) Буфер повинен бути здатним надійно працювати протягом тривалого періоду часу за будь-яких умов, включаючи мінусові температури;
- 5) Експлуатація буферу та моніторинг його стану повинні бути простими та зручними.

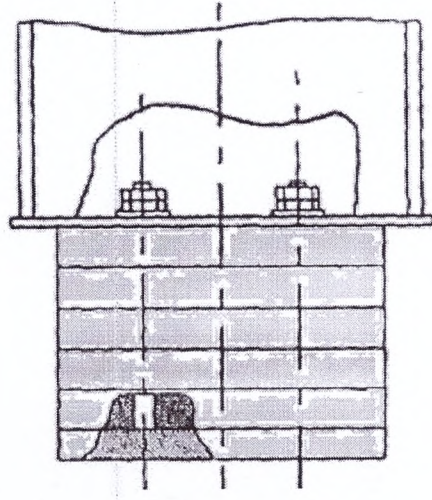
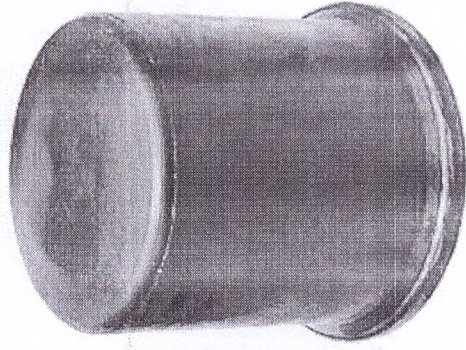
Дослідження типів і характеристик буферних пристроїв



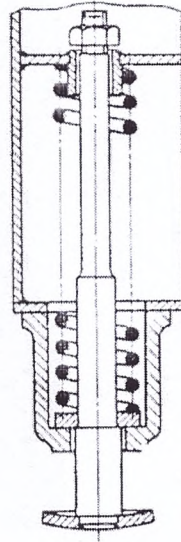
Ударний буферний пристрій з дерев'яним брусом



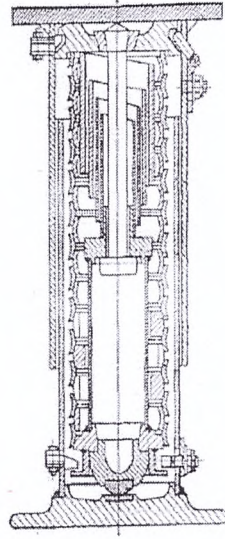
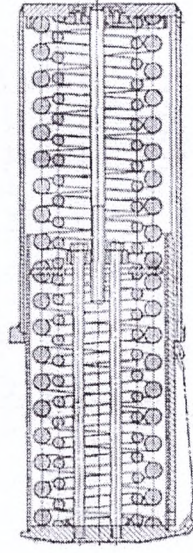
Гумовий бампер (буфер)



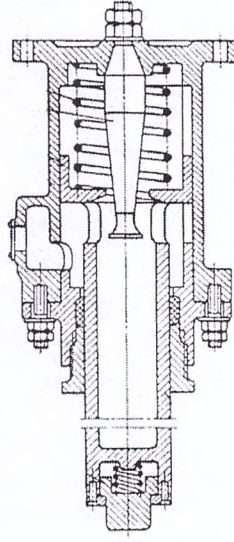
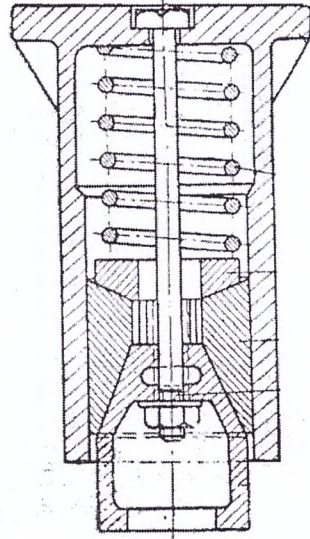
Гумовий буфер з набірних пластин



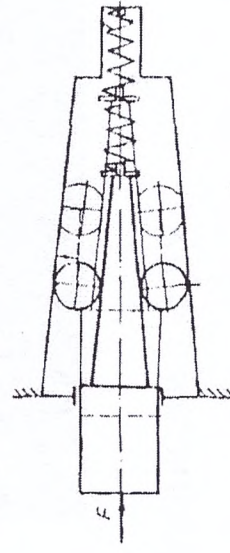
Буфери пружинного типу



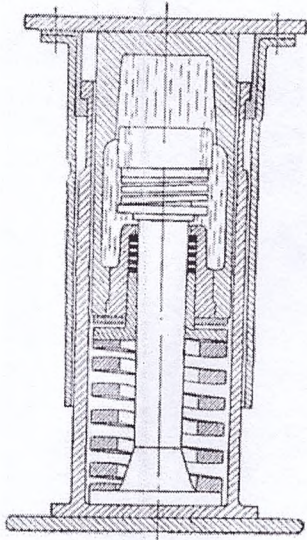
Буфери пружинно-фрикційного типу



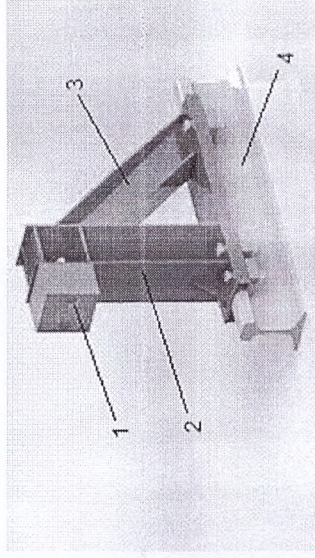
Буфер гідрравлічного типу



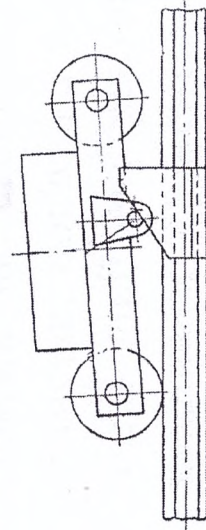
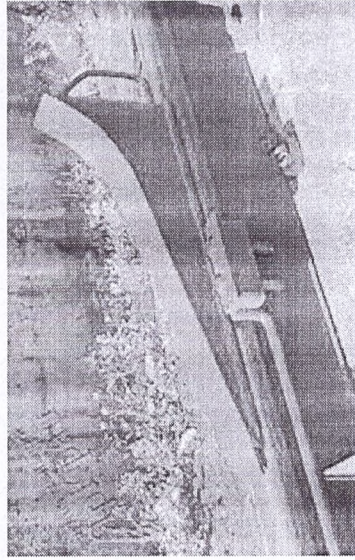
Буфер фрикційний з тілами кочення



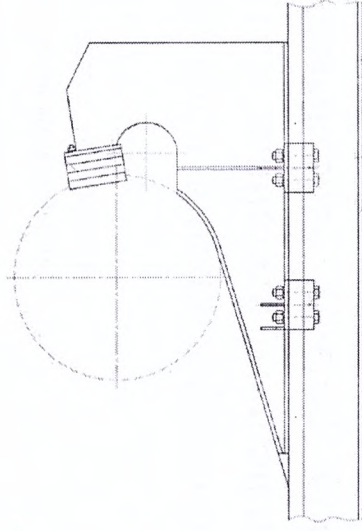
Комбінований буфер



Тупиковий упор ударного типу



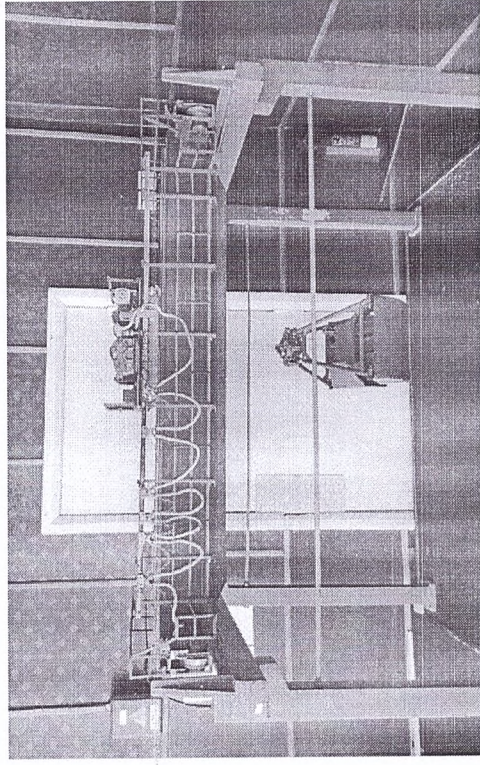
Тупикові упори безударного типу



Комбінований упор тупикового типу



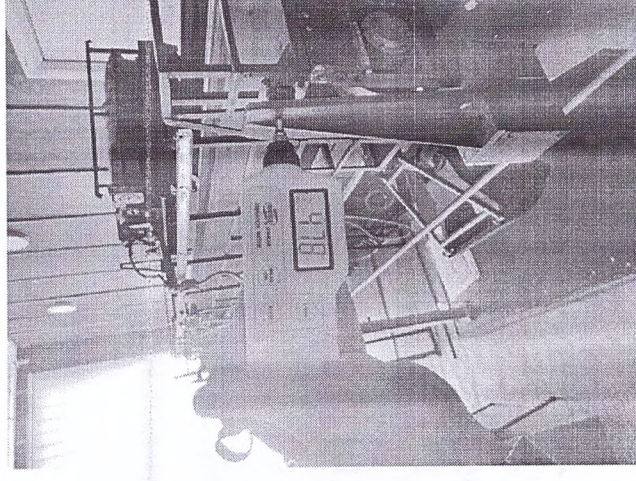
Дослідження типів і характеристик буферних пристроїв



Макет мостового крана



Процес замірів вертикальних вібронавантажень крана після удару об опору



Процес замірів горизонтальних вібронавантажень при наїзді крана на опору

Довгий час експлуатації мостових кранів показав, що обов'язковість встановлення захистів, пов'язана з виникненням аварійних ситуацій, і система безпеки крана на кінці лінії відіграє важливу роль у забезпеченні безпечної роботи крана. Дуже важливим елементом конструкції мостового крана є буферні кранові пристрої, функція яких полягає в поглинанні кінетичної енергії крана і забезпеченні його безпечної та надійної роботи навіть при відмові інших елементів системи захисту. Це також показали експериментальні дослідження виконані на лабораторному обладнанні мостового крана лабораторії мехатроніки при використанні вібрографа GM63A.

буферних пристроїв

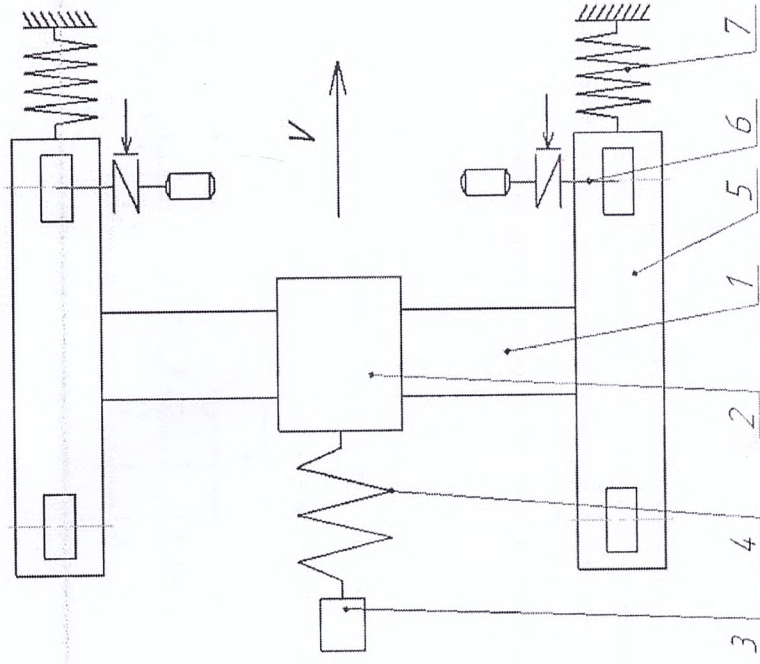


Схема руху мостового крана при наїзді на буферний пристрій

1 – міст, 2 – вантажний візок, 3 – гакова підвіска з вантажем, 4 – поліспаст, 5 – кінцева балка, 6 – механізм пересування мостового крана, 7 – буфер

Найбільш поширеною формою рівняння руху є саме рівняння Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

де n – число ступенів свободи механічної системи;

i – порядковий номер узагальненої координати;

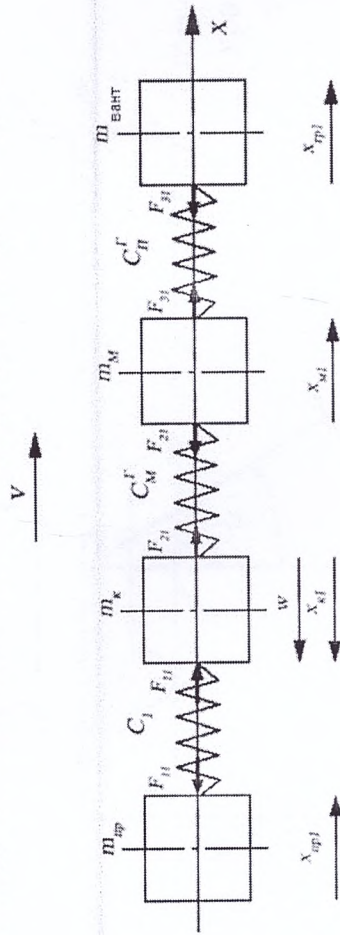
q_i – узагальнена координата;

$\dot{q}_i$ – узагальнена швидкість;

Q_i – узагальнена сила;

T – кінетична енергія системи; t – час.

Перед наїздом на буферні пристрої



Рух кожної з мас можна записати наступним чином

$$\begin{cases} m_{п\cdot} \ddot{x}_{п1} = -F_{11} \\ m_{к\cdot} \ddot{x}_{к1} = F_{21} + F_{11} - W \\ m_{M\cdot} \ddot{x}_{M1} = F_{31} - F_{21} \\ m_{вант\cdot} \ddot{x}_{вант1} = -F_{31} \end{cases}$$

Перед тим, як кран досягне кінцевої зупинки, всі пружні коливання гасяться і вільна частина вала приводного механізму.

Припускаючи, що вільна частина вала приводу механізму пересування деформується під дією сили опору пересуванню W , залежність зусиль у пружному з'єднанні може бути показана наступним чином.

$$\begin{aligned} F_{11} &= W - c \cdot (x_{к1} - x_{п1}) \\ F_{21} &= c_M' \cdot (x_{M1} - x_{к1}) \\ F_{31} &= c_H' \cdot (x_{вант1} - x_{M1}) \end{aligned}$$

Підставимо сили в пружних зв'язках на першому етапі у попереднє рівняння і одержимо диференціальну систему рівнянь, які описують рух мас на першому етапі

$$\begin{cases} m_{п\cdot} \ddot{x}_{п1} + W - c \cdot (x_{к1} - x_{п1}) = 0 \\ m_{к\cdot} \ddot{x}_{к1} - c_M' \cdot (x_{M1} - x_{к1}) + c \cdot (x_{к1} - x_{п1}) = 0 \\ m_{M\cdot} \ddot{x}_{M1} - c_H' \cdot (x_{вант1} - x_{M1}) + c_M' \cdot (x_{к1} - x_{M1}) = 0 \\ m_{вант\cdot} \ddot{x}_{вант1} + c_H' \cdot (x_{вант1} - x_{M1}) = 0 \end{cases}$$

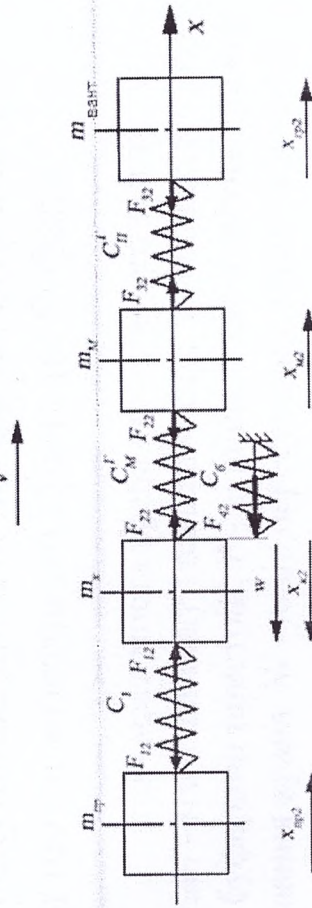
Початкові умови

$$\begin{aligned} t &= 0; \\ x_{п10} &= x_{к10} = x_{M10} = x_{вант10} = 0; \\ \dot{x}_{п10} &= \dot{x}_{к10} = \dot{x}_{M10} = \dot{x}_{вант10} = 0. \end{aligned}$$

Для переходу до другого етапу використаємо умову

$$x_{п1к} = S_0.$$

При наїзді на буферні пристрої



Розглянемо систему диференціальних рівнянь для випадку, коли кран наїждє на буферну пружину, не стискаючи її. Розглянемо рух кожної маси в динамічній системі мостового крана при наїзді моста на буферну пружину і запишемо

$$\begin{cases} m_{п\cdot} \ddot{x}_{п2} = -F_{12} \\ m_{к\cdot} \ddot{x}_{к2} = F_{22} + F_{12} - W - F_{42} \\ m_{M\cdot} \ddot{x}_{M2} = F_{32} - F_{22} \\ m_{вант\cdot} \ddot{x}_{вант2} = -F_{32} \end{cases}$$

Сили у пружних зв'язках знаходяться за

$$\begin{aligned} F_{12} &= F_{120} - c_1 \cdot (x_{к2} - x_{п2}) \\ F_{22} &= F_{220} + c_M' \cdot (x_{M2} - x_{к2}) \\ F_{32} &= F_{320} + c_H' \cdot (x_{вант2} - x_{M2}) \\ F_{42} &= c_6 \cdot x_{62} \end{aligned}$$

де c_6 — коефіцієнт жорсткості буферів.

Підставимо сили в пружних зв'язках на другому етапі у рівняння (2.6) і одержимо диференціальну систему рівнянь, які описують рух мас на другому етапі

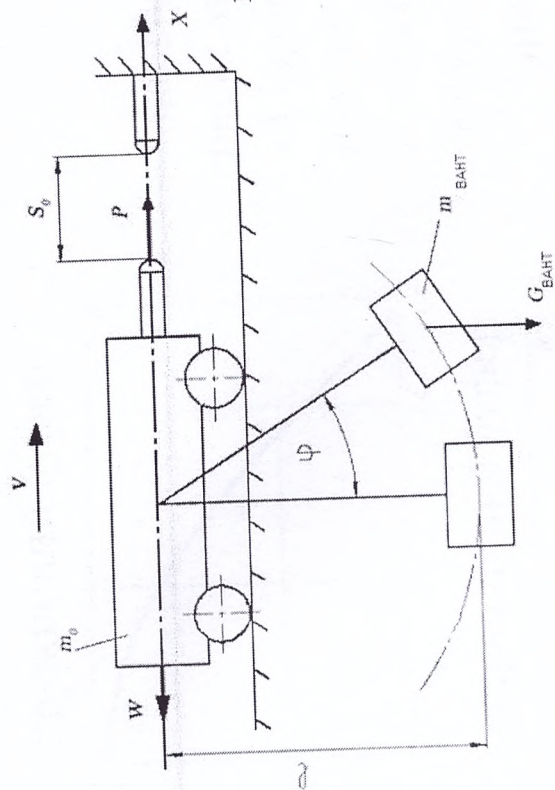
$$\begin{cases} m_{п\cdot} \ddot{x}_{п2} - c \cdot (x_{к2} - x_{п2}) + F_{120} = 0 \\ m_{к\cdot} \ddot{x}_{к2} - c_M' \cdot (x_{M2} - x_{к2}) + c_1 \cdot (x_{к2} - x_{п2}) - F_{220} - F_{120} + W = 0 \\ m_{M\cdot} \ddot{x}_{M2} - c_H' \cdot (x_{вант2} - x_{M2}) + c_M' \cdot (x_{к2} - x_{M2}) - F_{320} + F_{220} = 0 \\ m_{вант\cdot} \ddot{x}_{вант2} + c_H' \cdot (x_{вант2} - x_{M2}) + F_{320} = 0 \end{cases}$$

де $F_{120}, F_{220}, F_{320}$ — сили у пружних зв'язках на початку другого етапу і кінці першого.

Початкові умови

$$\begin{aligned} t &= 0; \\ x_{п20} &= x_{к20} = x_{M20} = x_{вант20} = 0; \\ \dot{x}_{п20} &= \dot{x}_{п1к}, \dot{x}_{к20} = \dot{x}_{к1к}, \dot{x}_{M20} = \dot{x}_{M1к}, \dot{x}_{вант20} = \dot{x}_{вант1к}. \end{aligned}$$

Розрахункова динамічна схема (двомасова)
при наїзді мостового крана на буфери



то - маса моста крана і вантажного візка;

$G_{\text{вант}}$ і $G_{\text{вант}}$ - маса вантажу і вага вантажу; V - швидкість наїзду крана на буферний пристрій; P - рушійна сила двигуна приводу пересування крана; W — опір пересуванню крана, від тертя; l - довжина підвісу вантажу; φ - це кут відхилення вантажу від вертикалі; S_o - відстань між кінцевим вимикачем і буферним пристроєм.

Розглянемо процес наїзду крана на буферний пристрій при наступних припущеннях:

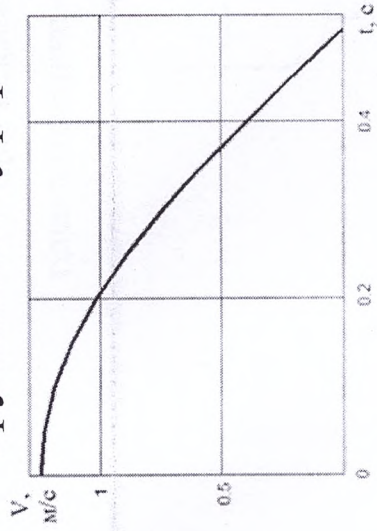
- Навантаження на гнучкій підвісці нагадує вільно підвішений маятник;
- Вага підйомного каната не враховується;
- Вважаємо, що позовжні коливання вантажу менш важливі, ніж поперечні

Отже, отримане диференційне рівняння двохмасової динамічної системи

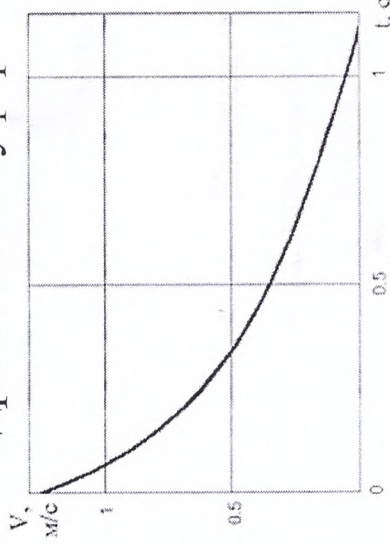
МАТИМЕ ВИГЛЯД

$$\begin{cases} m_0 \cdot \ddot{x} - m_{BAHT} \cdot \ddot{\varphi} \cdot l \cdot \cos \varphi - m_{BAHT} \cdot \dot{\varphi}^2 - l \cdot \sin \varphi + W = F_{EY\Phi}; \\ \ddot{x} \cdot \cos \varphi + \ddot{\varphi} \cdot l + g \cdot \sin \varphi = 0. \end{cases}$$

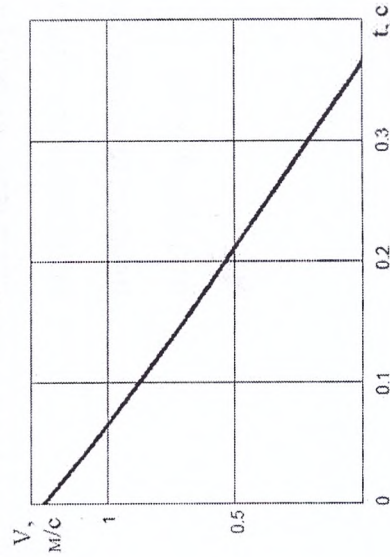
пружинний буфер



гідравлічний буфер



пружинно-гідравлічний буфер



Аналізуючи результати досліджень, приходимо до висновків:

- Гідравлічні буфери повинні бути обладнані пристроєм для регулювання (зміни) гідравлічного опору;

- Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери;

- При спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини.

- Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери, і при спрацьовуванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини, яку можна замінити на пневмoeлемен із змінною жорсткістю. Тому доцільно буде дослідити характеристики пневмогідравлічного буфера.

Щоб підвищити надійність роботи мостового крана, запропонована будова гідро-пневматичного буфера

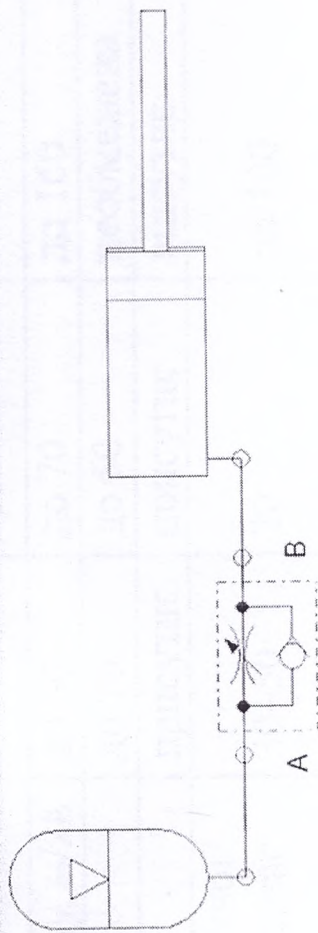


Схема комбінованого гідро-пневматичного буферу

На схемі наведено гідроциліндр односторонньої дії з одностороннім штоком, гідропневмоакумулятор та регульований дросель із зворотнім клапаном.

Коли кран зупиняється об тупиковий упор, буферна тяга з поршнем починає рухатися і нагнітає робочу рідину через дросель у порожнину пневмоаккумулятора. В результаті потрапляння рідини до пневмоаккумулятора, відбувається стиснення об'єму газу, що міститься в його порожнині пневмогідроаккумулятора. Відповідно тиск газу в акумуляторі зростає, і опір повітря зростає.

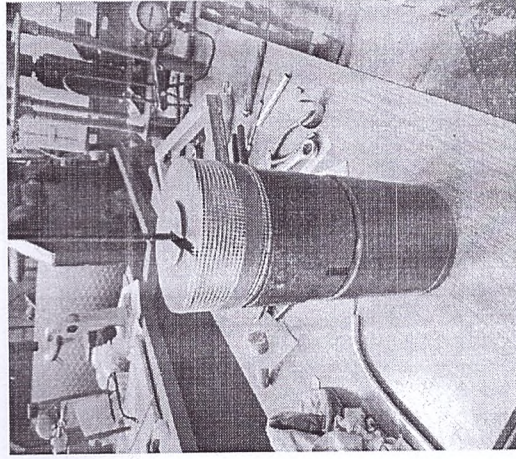
за основними показниками ефективності

Параметр	Значення параметра для типу буфера			
	гумовий	пружинний	гідралічний	гідро-пневматичний
Швидкість наїзду, м/хв	до 60	до 70	до 160	до 120
Маса крана, т	до 70	до 50	необмежена	до 200
Явище віддачі	присутнє	присутнє	відсутнє	Відсутнє
Відсоток кінетичної енергії, яку поглинає буфер, %	30–50	20	до 100	до 100
Скорочення зони обслуговування крана	немає	є	немає	Немає
Уповільнення крана, м/с ²	> 40	> 4	> 4	до 4

На основі аналізу досліджень встановлено:

- гідро-пневмобуфери мають значні переваги майже за всіма робочими параметрами.
- щоб зменшити ударні навантаження від важких кранів, необхідно збільшити гальмівний шлях, тим самим зменшуючи уповільнення крана.
- для досягнення максимальної ефективності під час роботи гідро-пневмобуфера гідралічний опір повинен становити 40% від сили удару на початку гальмування, а пневматичний опір повинен бути 55%.

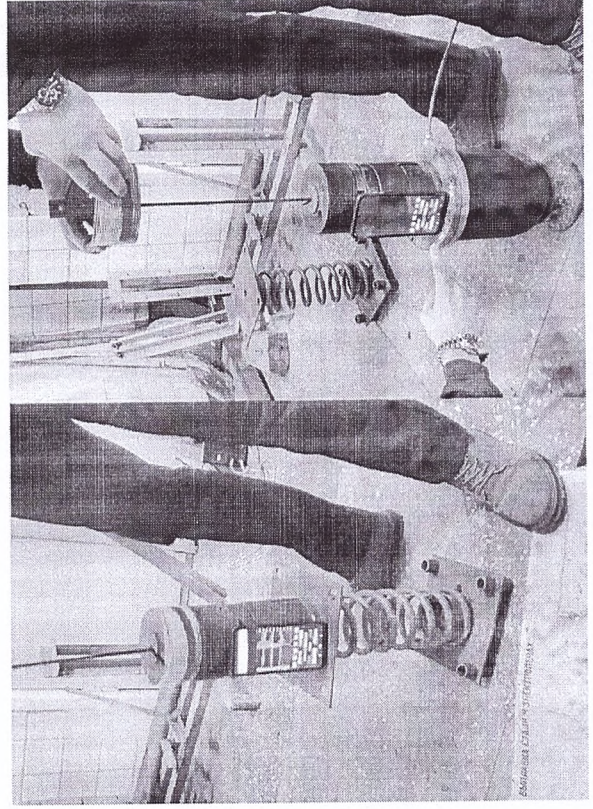
Особливо слід відзначити переваги використання гідро-пневмобуферів для захисту великих кранів.



Набір тягарців на штанзі

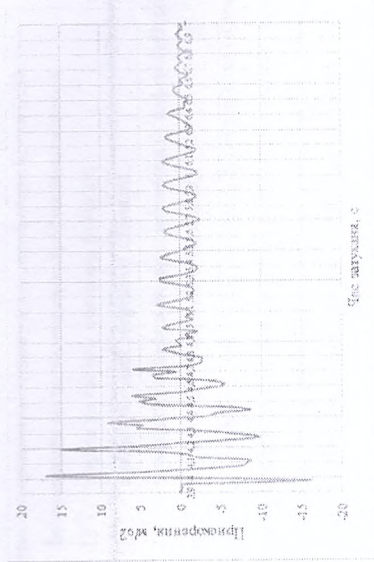


Підготовка тягарців до проведення експериментальних досліджень

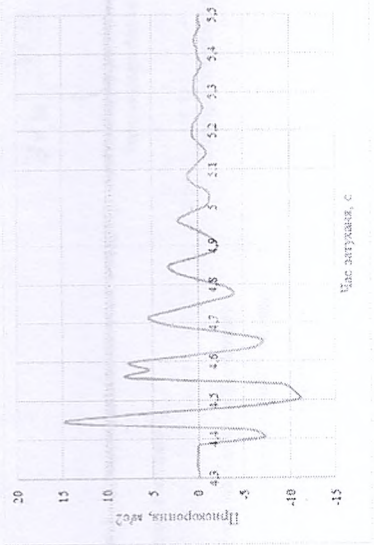


Процес зняття діаграм
затухання

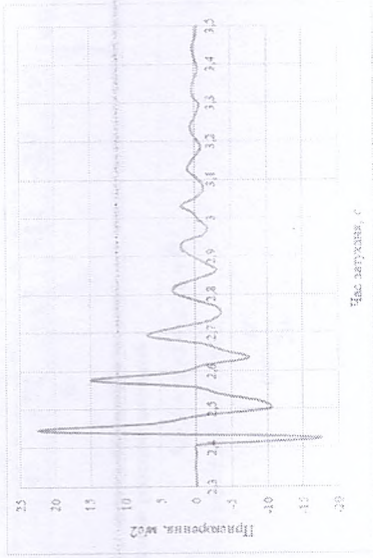
(експериментальне вібропоглинання)



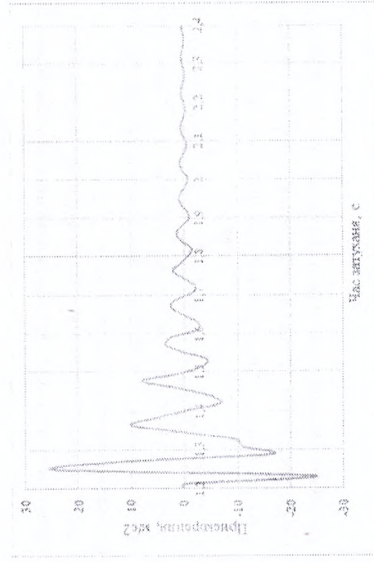
Експериментально визначений процес затухання коливань у металевому пружного елементу



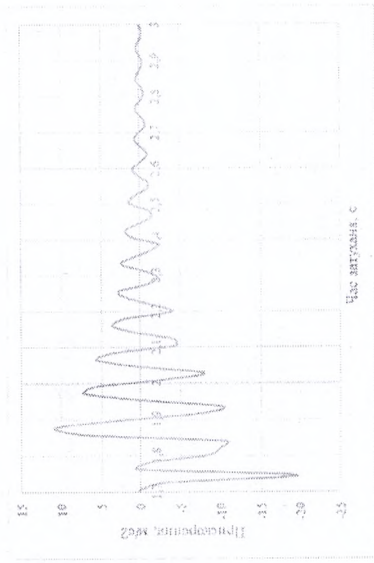
Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елементу (РБ=0,5 атм)



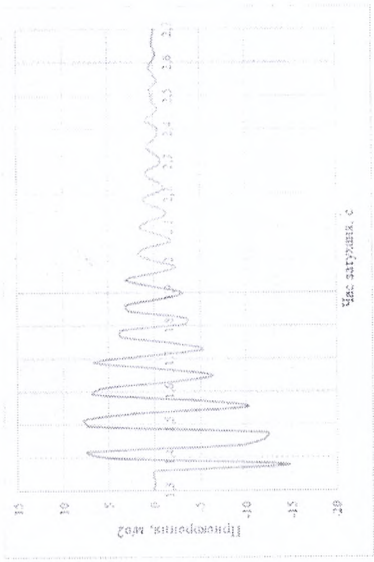
Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елементу (РБ=1 атм)



Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елементу (РБ=1,5 атм)



Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елементу (РБ=2 атм)



Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елементу (РБ=2,5 атм)

Для отримання диференціальних рівнянь, які описують процес затухання коливань у пружних елементах використано методику д.т.н. професора Крота О.Ю.

За отриманими експериментальними графіками визначимо:

- 1) період та частоту коливань вантажу;
- 2) логарифмічний декремент коливань;
- 3) коефіцієнт в'язкого опору середовища (у диференціальному рівнянні коливань);
- 4) жорсткість "с" пружного елемента;
- 6) отримаємо (і числовими значеннями коефіцієнтів) рівняння затухаючих коливань вантажу.

Для прикладу приведено визначення рівняння для пневматичного пружного елемента при $P_{\text{ж}}=1$ атм. На відміну п'яти попередніх шкелів коливань укладається приблизно 5 періодів шкелів. І поділяв $-0,1$ с. Отже, умовний період затухаючих коливань, с, дорівнює

$$T_i = \frac{2,91 - 2,43}{5} = 0,096. \quad (0.1)$$

Кругова частота, $\frac{P_{\text{ж}}}{c}$

$$k = \frac{2\pi}{T_i} \quad (0.2)$$

$$k = \frac{2 \cdot 3,14}{0,096} = 65,45 \quad (0.3)$$

Визначимо логарифмічний декремент коливань (декремент затухання)

На натуральній логарифм відношення амплітуд, що відбуваються один за одним через період T_i , починається логарифмічним декрементом загасання.

Цяк розкладемо і час, протягом якого амплітуда A зменшиться в e разів ($e=2,718$)

Отже, логарифмічний декремент затухання δ (в рівнянні декремент використовують в рівні літера, наприклад, δ) є фізична величина, зворотно числу коливань, після яких численні вихід амплітуда зменшиться в e разів.

При певному коефіцієнті затухання відбувається не тільки менше зменшення амплітуди, але і помітно збільшується період коливань. Коли опір довічноє припинило, то кругова частота обертається на нуль, а компоненти згасають. Тимий процес називається апериодичним.

Амплітуди коливань на п'яти періодах (рис. 3.28)

a_i, b_i	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4	a_5	b_5
м/с ²	-17,07	21,91	-10,38	14,89	-7,47	6,72	-3,5	3,12	-2,9	1,97

Логарифмічний декремент

$$\delta = \ln \left(\frac{\frac{a_1}{a_2} + \frac{b_1}{b_2} + \frac{a_2}{a_3} + \frac{b_2}{b_3} + \frac{a_3}{a_4} + \frac{b_3}{b_4} + \frac{a_4}{a_5} + \frac{b_4}{b_5}}{8} \right) \quad (0.4)$$

$$\delta = \ln \left(\frac{-17,07 + 21,91 - 10,38 + 14,89 - 7,47 + 6,72 - 3,5 + 3,12}{-10,38 + 14,89 - 7,47 + 6,72 - 3,5 + 3,12 + 2,9 + 1,97} \right) = 0,545 \quad (0.1)$$

Загальний вигляд диференціального рівняння коливань

$$m \cdot \ddot{x} + \alpha \cdot \dot{x} + c \cdot x = 0. \quad (0.2)$$

Використовуємо позначення прикладі вантажу m в кг

$$n = \frac{\alpha}{2m}. \quad (0.3)$$

$$k_i = \sqrt{k^2 - n^2}. \quad (0.4)$$

$$k_i = \sqrt{65,45^2 - 5,68^2} = 65,696. \quad (0.5)$$

Власна частота коливань системи

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (0.6)$$

Тоді

$$n = \frac{\delta}{T_i}. \quad (0.7)$$

$$n = \frac{0,545}{0,096} = 5,68 \frac{1}{c} \quad (0.8)$$

Тоді коефіцієнт в'язкого опору, $\frac{Hc}{m}$

$$\alpha = 2mn. \quad (0.9)$$

$$\alpha = 2 \cdot 4 \cdot 5,68 = 45,436. \quad (0.10)$$

Оскільки на координаті $t=0$ кут нахилу дотичної до кривої $x(t)$ (тобто швидкість зміни прискорення) є невеликим, то вважаємо, що початкова швидкість зміни прискорення дорівнює нулю ($v_0 \approx 0$).

Рівняння затухаючих коливань для системи що розглядається матиме вигляд:

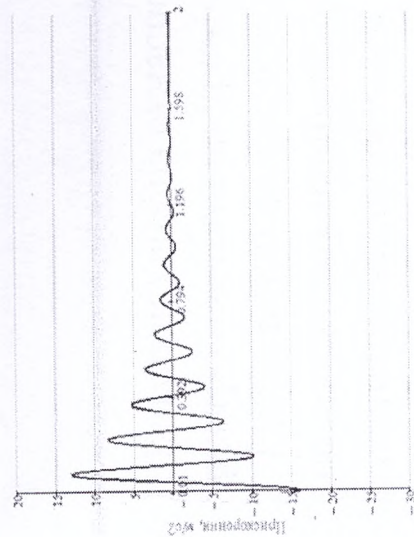
$$x(t) = e^{-nt} \left(X_0 \cdot \cos k_i t + \frac{v_0 + n \cdot X_0}{k_i} \cdot \sin k_i t \right) \quad (0.11)$$

Після проведення розрахунків отримаємо:

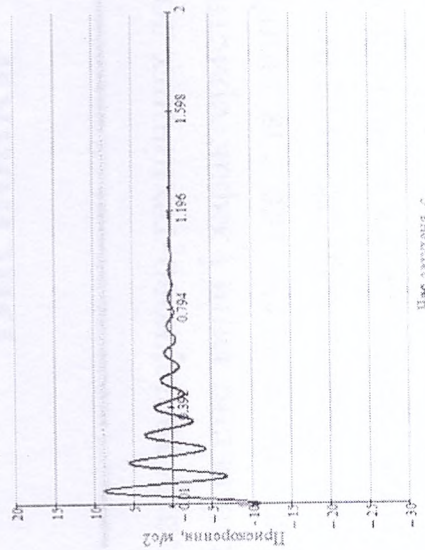
$$x(t) = e^{-5,68t} (-17,07 \cdot \cos 65,45 \cdot t - 5,94 \cdot \sin 65,696 \cdot t) \quad (0.12)$$

Отриманий вираз (0.12) є диференціальним рівнянням затухаючих коливань отриманих експериментальним шляхом.

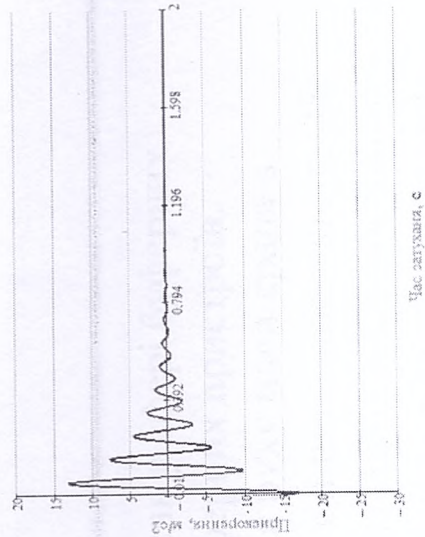
(експериментальне вібропоглинання)



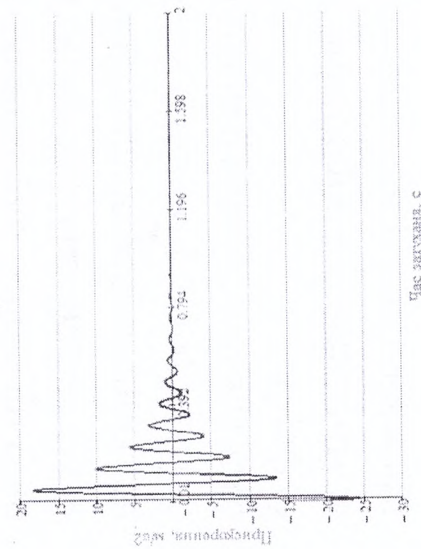
Математично визначений процес затухання коливань металевого пружного елемента



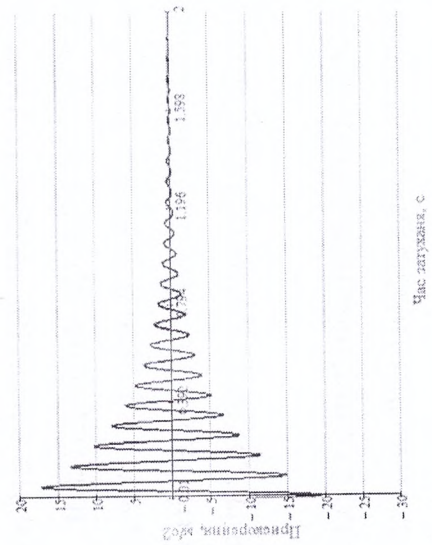
Математично визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елемента ($PB=0.5$ атм)



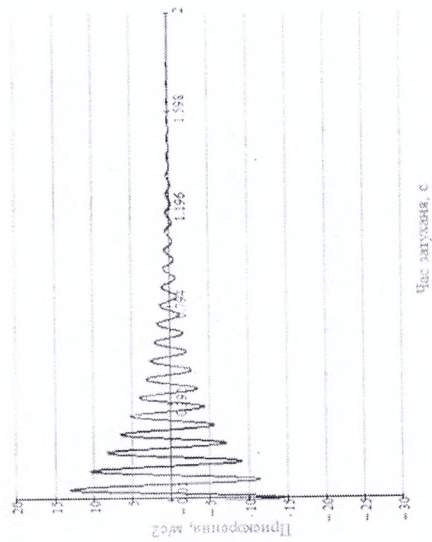
Математично визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елемента ($PB=1$ атм)



Математично визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елемента ($PB=1.5$ атм)



Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елемента ($PB=2$ атм)



Експериментально визначений процес затухання коливань у пневматичного пружного елемента ($PB=2.5$ атм)

Висновки

1. Виконано аналіз сучасного стану та науково-технічних досягнень у сфері буферних пристроїв мостових кранів. Досліджено типи і характеристик буферних пристроїв.
2. Проведений аналіз наукових праць, показав, що для запобігання руху маси крана в протилежному напрямку необхідно будувати буферні пристрої зі змінною жорсткістю. Це забезпечує максимальний коефіцієнт поглинання кінетичної енергії при наїзді мостового крана на буферний пристрій і значно знижує динамічні навантаження на металлоконструкцію крана, підвищуючи тим самим надійність і довговічність.
3. Найбільш ефективними є пружинно-гідравлічні буфери, і при спрацюванні підпружиненого гідравлічного буфера спочатку спрацьовує гідравлічне гальмування, а потім опір пружини, яку можна замінити на пневмоелемен із змінною жорсткістю.
4. На основі аналізу теоретичних досліджень кранових буферних пристосувань встановлено, що гідро-пневмобуфери мають значні переваги майже за всіма робочими параметрами.
5. Підібрано, уточнено й описано обладнання та програмне забезпечення для експериментального дослідження робочих процесів пружинного та пневматичних елементів буферів.
6. Виконано та оброблено комплекс експериментальних дослідження робочих процесів пружинного і пневматичних елементів, які показали, що процес затухання коливань у пневматичному пружному елементі при всіх досліджуваних тиска відбувається майже втричі швидше ніж у металевому пружному елементі.

Дякую за увагу!