Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри ПММ

_____

(підпис)

«___»_____20____ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»

на тему: **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ЗІ ШКІВОМ ЗМІННО-ГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ**

за освітньою програмою: Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини обладнання _____

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування _____

(шифр, назва)

Виконавець:

студент групи ПМ2221 _____ Гроза Є. С.

(група) (підпис) (ПІБ)

Керівник роботи _____ _____ Куроп'ятник О. С,

(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ _____ Посмітюха О. П.

(посада) (підпис) (ПІБ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень

з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ Гроза Є. С.

(підпис) (ПІБ)

Дніпро – 2024

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Faculty of Transport Engineering
Department of Applied Mechanics and Materials Science

EXPLANATORY NOTE

To Master Thesis

on the topic: **JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A VARIABLE MOMENT OF INERTIA PULLEY DRIVE**

according to educational curriculum: Lifting and transport, construction, road, reclamation machines and equipment

in the Specialty: 133 Industrial Engineering
(specialty and its code)

Done by:

student of the group ПМ2221 (group) Yehor HROZA (name, surname)

Scientific Supervisor Oleksii KUROPIATNYK (name, surname)

Normative controller Oleksandr POSMITIUKHA (name, surname)

Dnipro – 2024

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри ПММ

_____

(підпис)

«___»_____20____ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»

на тему: **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ЗІ ШКІВОМ ЗМІННОГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ**

за освітньою програмою: Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини обладнання _____

зі спеціальності: 133 Галузеве машинобудування_____

(шифр, назва)

Виконавець:

студент групи _____ _____ Гроза Є. С.

(група) (підпис) (ПІБ)

Керівник роботи _____ _____ Куроп’ятник О. С,

(посада) (підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер _____ _____ Посмітюха О. П.

(посада) (підпис) (ПІБ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень

з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ Гроза Є. С.

(підпис) (ПІБ)

Дніпро – 2024

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Faculty of Transport Engineering
Department of Applied Mechanics and Materials Science

EXPLANATORY NOTE

To Master Thesis

on the topic: **JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A VARIABLE MOMENT OF INERTIA PULLEY DRIVE**

according to educational curriculum: Lifting and transport, construction, road, reclamation machines and equipment

in the Specialty: 133 Industrial Engineering
(specialty and its code)

Done by:

student of the group ПМ2221 (group) — Yehor HROZA (name, surname)

Scientific Supervisor — Oleksii KUROPIATNYK (name, surname)

Normative controller — Oleksandr POSMITIUKHA (name, surname)

Dnipro – 2024

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій

Факультет «Транспортна інженерія»

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Освітня програма: Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини і обладнання

(назва освітньої програми)

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПММ

Сергій РАКША

(підпис)

«___»_____20___ р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»

студента групи _ПМ2221_ _____Гроза Єгор Сергійович_____

(номер групи) (ПІБ)

1 Тема роботи: ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИВОДУ ЗІ ШКІВОМ ЗМІННОГО МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ

Керівник роботи: _____ Куроп'ятник Олексій Сергійович, к. т. н., доцент

(ПІБ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора від «02» грудня 2022 р. № 1193.

2 Термін подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи: Маса вантажу 200кг, Кутова швидкість шківа 3,33 град/с, Модель шківа у SolidWorks.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки):

4.1 Аналітична частина: огляд і аналіз існуючих конструкцій канатних доріг

4.2 Основна частина: Постановка задач, опис методик дослідження, Теоретичне обґрунтування принципів роботи шківа змінного моменту інерції за допомогою побудови математичної моделі, та моделі у Solid Works;

Науково-дослідна частина: . Імітаційне моделювання динаміки зі шківом змінного моменту інерції. Аналіз результатів досліджень та надання рекомендації до застосування результатів досліджень.

5 Перелік графічного матеріалу: Демонстраційні матеріали за основними результатами роботи.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Примітки
Огляд і аналіз існуючих конструкцій канат-них доріг	29.03.2023	
Теоретичні дослідження динаміки шківа	29.09.2023	
Експериментальні дослідження динаміки шківа	31.10.2023	
Аналіз результатів досліджень	15.12.2023	
Рекомендації до застосування результатів досліджень	29.12.2023	
Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	08.01.2024	
Захист кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	23.01.2024	

Дата видачі завдання: «01» грудня 2022 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Олексій КУРОП'ЯТНИК

(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____ Єгор ГРОЗА

(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Кількість томів: 1

В записці всього 72 сторінок

Найменування роботи: Обґрунтування параметрів приводу зі шківом змінного моменту інерції.

Ілюстрації: рисунків 18;

графіків 25.

Ключові слова: канатна дорога, шків, інерція, жорсткість, розрахунок, дослідження, сила тертя, SolidWorks, моделювання, модель.

Текст реферату:

Метою кваліфікаційної роботи є обґрунтування пружних параметрів приводу зі шківом змінного моменту інерції, за яких обмежується негативний вплив резонансних явищ під час розгону та сповільнення.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі вирішений ряд завдань, основними з яких є наступні: виконаний огляд і аналіз відомих існуючих конструкцій канатних доріг, та виконаний аналіз відомих патентних рішень; виконаний проектний розрахунок приводу зі шківом змінного моменту інерції; теоретичне обґрунтування принципів роботи шківа змінного моменту інерції за допомогою побудови математичної моделі та моделі у SolidWorks.; отримані графіки переміщень вантажу; зроблені висновки та рекомендації за результатами виконання роботи.

ЗМІСТ

Вступ 8

1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КАНАТНИХ ДОРІГ 9

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ШКІВА 17

2.1 Постановка задачі 17

2.2 Опис конструкції шківа 18

2.3 Розробка методики визначення параметрів шківа 20

2.4 Теоретичне обґрунтування принципів роботи шківа змінного моменту інерції за допомогою побудови математичної моделі. 21

2.5 Обґрунтування критичної жорсткості пружинних блоків 26

3.ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ШКІВА 27

3.1 Постановка задачі 27

3.2 Опис експериментальної установки 28

3.3 Методика проведення експерименту 30

3.4 Зведення результатів експериментів 40

3.4.1 Експерименти без урахування тертя 40

3.4.2 Експерименти з урахування тертя 50

3.4 Аналіз результатів 67

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 69

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ 70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ 71

Вступ

Сучасний індустріальний розвиток вимагає вдосконалення приводів та передач, що забезпечують надійну та ефективну роботу різноманітних технічних систем. Однією з таких систем є приводи зі шківом змінного моменту інерції.

Метою даної магістерської роботи є обґрунтування раціональних пружних параметрів окремих елементів приводу зі шківом змінного моменту інерції, при яких забезпечується найбільша ефективність та обмежується негативний вплив резонансних явищ під час розгону та сповільнення системи. Це завдання є важливим у контексті забезпечення стабільності технічних систем, а також підвищення їхньої довговічності.

Ідея роботи базується на попередньому досвіді та результатах бакалаврської роботи, де була розроблена імітаційна модель та досліджено кінематику приводу зі шківом змінного моменту інерції. В даній магістерській роботі планується використовувати отриману 3D-модель для виконання багатоваріантного розрахунку для різних навантажень та частот обертання вихідного вала, що відповідає швидкостям руху вагонів канатної дороги. Окрім того, буде досліджено реакцію приводу на динаміку пуску та виявляти умови виникнення резонансу, включаючи конкретні значення пружних параметрів та сполучень вихідних даних.

В результаті цієї роботи планується розробити цінні рекомендації щодо вибору раціональних пружних параметрів окремих елементів приводу зі шківом змінного моменту інерції, що дозволить покращити ефективність та надійність технічних систем, а також уникнути потенційних проблем, пов'язаних із резонансними явищами. Ця робота спрямована на покращення функціонування технічної системи у сучасному технологічному середовищі.

1.ОГЛЯД БУДОВИ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ КАНАТНИХ ДОРІГ

Підвісні канатні дороги[1] є специфічним видом транспортних систем, при якому вантажі перевозяться в вагонетках, що рухаються по канатах на великі відстані. Цей вид транспорту дозволяє подолати значні пролети (500 м і більше) і подолати великі ухили (до 45%), що робить його практично незалежним від рельєфу місцевості[2].

Канатні дороги також забезпечують можливість перевозити вантажі по найкоротших маршрутах у гірських регіонах, через водні перешкоди, залізничні колії, автомобільні дороги та інші перешкоди. Один з важливих плюсів цих систем полягає в тому, що вони не потребують спорудження мостів та земельних робіт, і їх робота не залежить від снігопадів.

Крім того, канатні дороги [2] дозволяють автоматизувати процеси завантаження та розвантаження, що часто призводить до уникнення перевантаження, що характерне для інших видів транспорту без рейок або шляхів.

Існує два основних види підвісних канатних доріг [2]: двоканатні (рис. 1.1) і одноканатні (рис. 1.2). У двоканатних дорогах є два види канатів: несучі канати для ходових коліс вагонеток і тяговий канат, який використовується для переміщення вагонеток. Однак важливо зауважити, що це поділ на двоканатні і одноканатні дороги відноситься до різних типів тяги в цих системах.

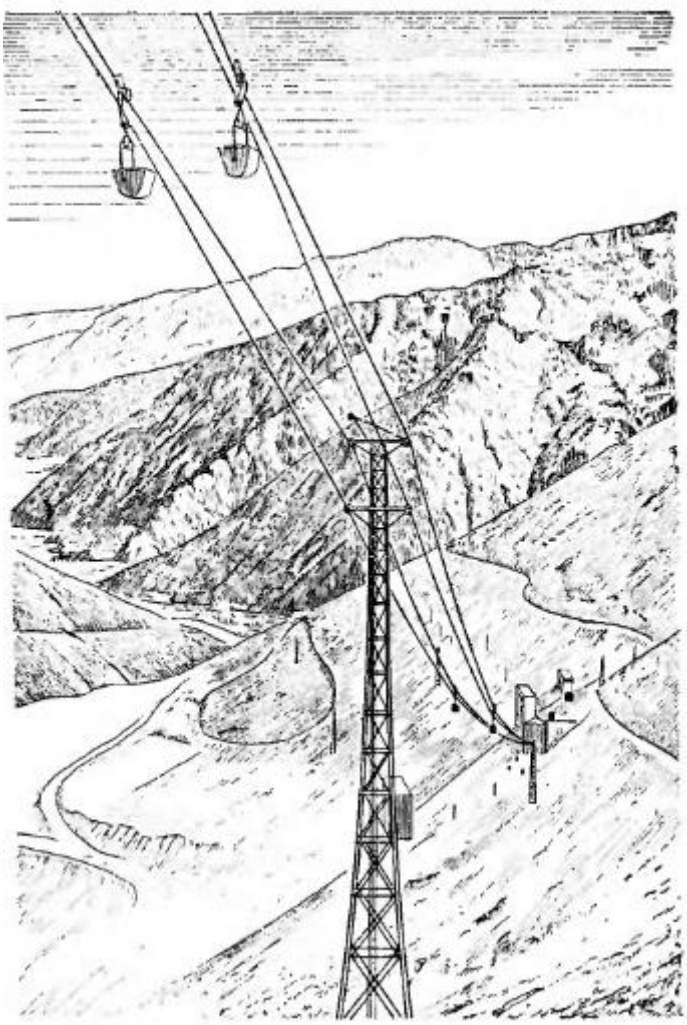


Рис 1.1 - Двоканатна дорога [1]

Канатні дороги - це надійний і ефективний спосіб транспортування вантажів на великі відстані та в умовах важкодоступного рельєфу. Вони є важливим елементом сучасної інфраструктури і знаходять широке застосування в різних галузях промисловості і транспорту.

Одноканатні підвісні дороги (рис. 1.2)[1] використовують лише один канат - тяговий, до якого вагонетки прикріплюються на станціях і переміщаються між кінцевими пунктами. В цьому випадку вагонетки переміщуються по підвісних рейкових шляхах на ходових колесах на станціях, а на лінії дороги вони висять на тяговому канаті, який рухається, що є переходовим етапом від підвісних доріг до канатних транспортерів.

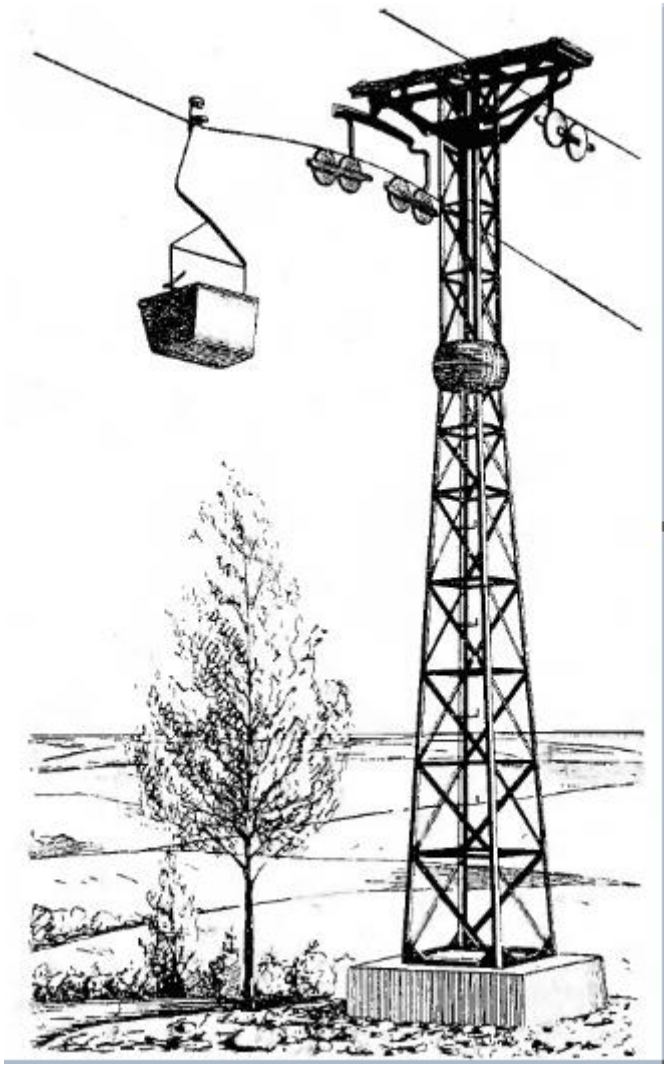


Рис 1.2 - Одноканатна дорога [1]

Як і двоканатні, так і одноканатні дороги можуть мати кільцевий рух, де вантажі перевозяться по одному напрямку, а повертаються порожніми по іншому напрямку, або маятниковий рух, коли дорога має одну вагонетку на кожній лінії, яка здійснює реверсивний рух між кінцевими пунктами. Маятниковий рух застосовується на коротких дорогах, де фіксоване закріплення вагонеток до тягового каната дозволяє підвищити швидкість руху.

Крім стаціонарних доріг, існують також переносні канатні дороги [1], які широко використовуються в будівництві та сільському господарстві. Вони можуть бути як двоканатними, так і одноканатними системами і є більш легкими в конструкції для зручності монтажу та перевезення.

Канатні дороги використовуються як для вантажних, так і для пасажирських перевезень, включаючи вантажно-пасажирські дороги. Пасажирські канатні дороги (рис. 1.3) можуть мати кільцевий, маятниковий або пульсуючий рух для перевезення пасажирів у рухомому складі.

Рис 1.3 - Пасажирська канатна дорога

Канатні дороги [1] мають ряд переваг порівняно з автомобільним та залізничним транспортом, зокрема:

1. Вони дозволяють уникнути необхідності спорудження мостів і значних земельних робіт, що дозволяє коротші маршрути та сприяє ефективності транспортування, особливо в гірських регіонах.

2. Робота канатних доріг не залежить від погодних умов і може використовуватися в суворих кліматичних умовах.

3. Канатні дороги дозволяють ефективно переміщати вантажі на різні висоти, розподіляючи їх у кінцевих та проміжних пунктах.

4. Канатні дороги мають гнучку конструкцію та вимагають менше місця для прокладання трас, що важливо для об'єктів з обмеженою площею.

Таким чином, канатні дороги є важливим елементом сучасної транспортної інфраструктури і знаходять широке застосування в різних галузях промисловості та транспорту, забезпечуючи ефективність і гнучкість вантажоперевезень і пасажирських перевезень.

Канатні транспортні системи мають численні переваги перед іншими видами транспорту, включаючи такі[1]:

- Екологічна чистота: Канатні дороги не викидають шкідливих речовин у навколишнє середовище, їх вплив на довкілля є мінімальним, схожим на тролейбус, і шумовий рівень під час руху аналогічний до електромобіля.
- Енергоефективність: Витрати енергії на переміщення в канатних системах значно нижчі (при швидкості 50 км/год) в порівнянні з сучасними автомобілями, на рівні 5-10 разів менше.
- Ефективне використання земельної площі: Для прокладання канатних трас потрібно набагато менше земельної площі, всього 0,03 га на кожний кілометр траси разом з інфраструктурою.
- Мінімізація впливу на ландшафт: Канатні дороги не вимагають будівництва мостів, тунелів, великих естакад, шляхопроводів та віадуків, що може порушити природний ландшафт і бути нестійким до стихійних лих, таких як землетруси, повені і зсуви.
- Економічна вигідність: Вартість будівництва канатних систем разом з інфраструктурою дешевше, ніж будівництво сучасних залізниць і автомобільних доріг. Також, ресурсомісткість транспортної системи (обсяг будівельних матеріалів, земельних робіт і витрати металу) мінімальна.
- Комфорт для пасажирів: Кабіни канатних доріг забезпечують комфорт для пасажирів на рівні сучасних автобусів.
- Висока безпека: Транспортні системи на основі канатів забезпечують високий рівень безпеки, схожий на авіапасажирські перевезення.

- Висока пропускна спроможність: Одна канатна дорога може перевозити до 7 тисяч пасажирів на годину.

Отже, ці переваги свідчать про перспективність канатних систем як головного виду транспорту для перевезення пасажирів і вантажів, особливо на гірських курортах і туристичних комплексах, а також у випадках, коли будівництво мостів і тунелів не економічно доцільне.

Вантажні підвісні канатні дороги (ДПКД) отримали найбільше поширення в гірських, перетнутих та важкодоступних місцях, де вони забезпечують ефективний транспорт на найкоротшій відстані та з мінімальними витратами. Вантажні підвісні канатні дороги є одним із видів промислового транспорту для переміщення сипких корисних копалин. Існують ряд факторів, які роблять ДПКД більш вигідними у порівнянні з іншими видами транспорту (такими як автомобільний, конвеєрний, залізничний, пневмоконтейнерний):

– Скорочення відстані: ДПКД пролягають коротшим маршрутом між пунктами при допустимому ухилі до 45°.

– Надійність у будь-яку погоду: Робота ДПКД не переривається через погодні умови (за винятком дуже сильного вітру).

– Економічність: Низькі капітальні та експлуатаційні витрати для будівництва і обслуговування ДПКД.

– Збереження природних ресурсів: Зменшення вирубки лісу та рідкісних земельних угідь.

– Розвиток гірських районів: Стимулювання розвитку високогірних територій.

– Екологічна чистота: Зниження забруднення навколишнього середовища.

– Зниження рівня шуму: Менше шуму від ДПКД порівняно з іншими видами транспорту.

– Довговічність: Експлуатаційний термін ДПКД може становити тридцять років і більше.

Нещодавно ДПКД стали серйозним конкурентом автомобільному транспорту в певних умовах. Крім традиційних канатних систем, існують нетрадиційні види, такі як повітряні канатно-монтажні транспортні системи та струнні транспортні системи.

Аеростатні канатно-монтажні транспортні системи призначені для перевезення великих обсягів вантажів (до 7,5 мільйонів тон на рік) зі швидкістю до 300 км/год.

Принцип дії пасажирських підвісних канатних доріг аналогічний принципу дії вантажних підвісних канатних доріг, але існують відмінності в конструкції рухомого складу та вимоги до безпеки.

Пасажирські підвісні канатні дороги можуть бути крісельними (зазвичай одноканатні кільцеві) або кабінними. Крісельні системи дозволяють пасажирам сідати та висідати під час руху, тоді як кабінні канатні системи використовуються для транспортування пасажирів як магістральні маршрути.

З урахуванням вимог до безпеки, швидкість руху кабінних канатних доріг з невідчепленими кабінами з кільцевим пульсуючим рухом груп 2-6 місних кабін не повинна перевищувати 4 м/с, і посадка та висадка пасажирів відбувається на станціях при зупиненому руху складу або з низькою швидкістю (0,2–0,5 м/с).

Кабіни канатних доріг кріпляться до каната за допомогою спеціальних затискачів, які можуть автоматично відчіплятися, і не потребують регулярного обслуговування. Під час входу на станцію, затискач відчіплюється від канату

Змінений шків буде відрізнятися від типового тим, що під час розгону та сповільнення приводу його момент інерції буде змінюватися. Такий шків будемо називати шківом змінного моменту інерції. [1]

Змінити момент інерції шківа можливо декількома способами[1]:

– за допомогою інерційних дисків, які вводяться в зачеплення зі шківом послідовно [3];

– шляхом використання додаткових вантажів на важелях, які відхиляються від вертикальної осі обертання системи під дією відцентрових сил під час розгону [4];

– за рахунок зміни радіуса інерції шляхом зміни вручну кута нахилу радіальних штанг, до кінців яких прикріплено вантажі [5];

– за рахунок зміни фізико-механічних властивостей феромагнітної рідини, у якій перебуває порожнистий диск з магнітом’якого матеріалу, під дією змінного магнітного поля [6];

– інші способи [7,8].

Такі способи мають ряд недоліків:

– суттєве збільшення маси та габаритів шківа;

– необхідність використання індивідуальних джерел енергії;

– складність виготовлення.

Дещо простіший та більш ефективний спосіб зміни моменту інерції реалізовано у конструкції шківа, схему та принцип дії якого захищено патентом на корисну модель [9]. Відповідно до цього патенту, шків змінного моменту інерції складається з базової конструкції, напрямних, уздовж яких переміщуються вантажі, які з’єднано з маточиною шківа за допомогою пружних блоків. Його принцип дії (реалізація зміни моменту інерції) полягає в наступному: під час розгону приводу вантажі під дією сил інерції рухаються від маточини до ободу, за рахунок чого підвищується радіус інерції, а отже, й момент інерції шківа.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ШКІВА

2.1 Постановка задачі

Обґрунтування параметрів приводу зі шківом змінного моменту інерції [1] визначається в рамках постановленої задачі як знаходження раціональних значень жорсткості пружин розробленого шківа у бакалаврській роботі.

Задачі роботи включають в себе огляд будови та принципу роботи приводу, представлення приводу як динамічної системи та виділення її пружних параметрів, розробку математичної моделі динаміки аналіз їх впливу.

Ідея роботи полягає в розширенні бакалаврської роботи, використовуючи отриману 3D-модель приводу. Дослідження передбачає багатоваріантний розрахунок для різних умов та динамічних навантажень, а також вивчення реакції системи на динаміку пуску та умови виникнення резонансу.

Об’єкт дослідження – динамічні процеси розгону та сповільнення приводу зі шківом змінного моменту інерції, а предмет дослідження – параметри шківа змінного моменту інерції як частини приводу.

2.2 Опис конструкції шківа

3D-модель приводу (рис 2.1) складається з електродвигуна, втулочно-пальцевої муфти, редуктора, відкритої конічної зубчатої передачі, зубчатої муфти, шківа змінного моменту інерції разом з його валом, а також з підшипникових опор цього валу та рами [1].

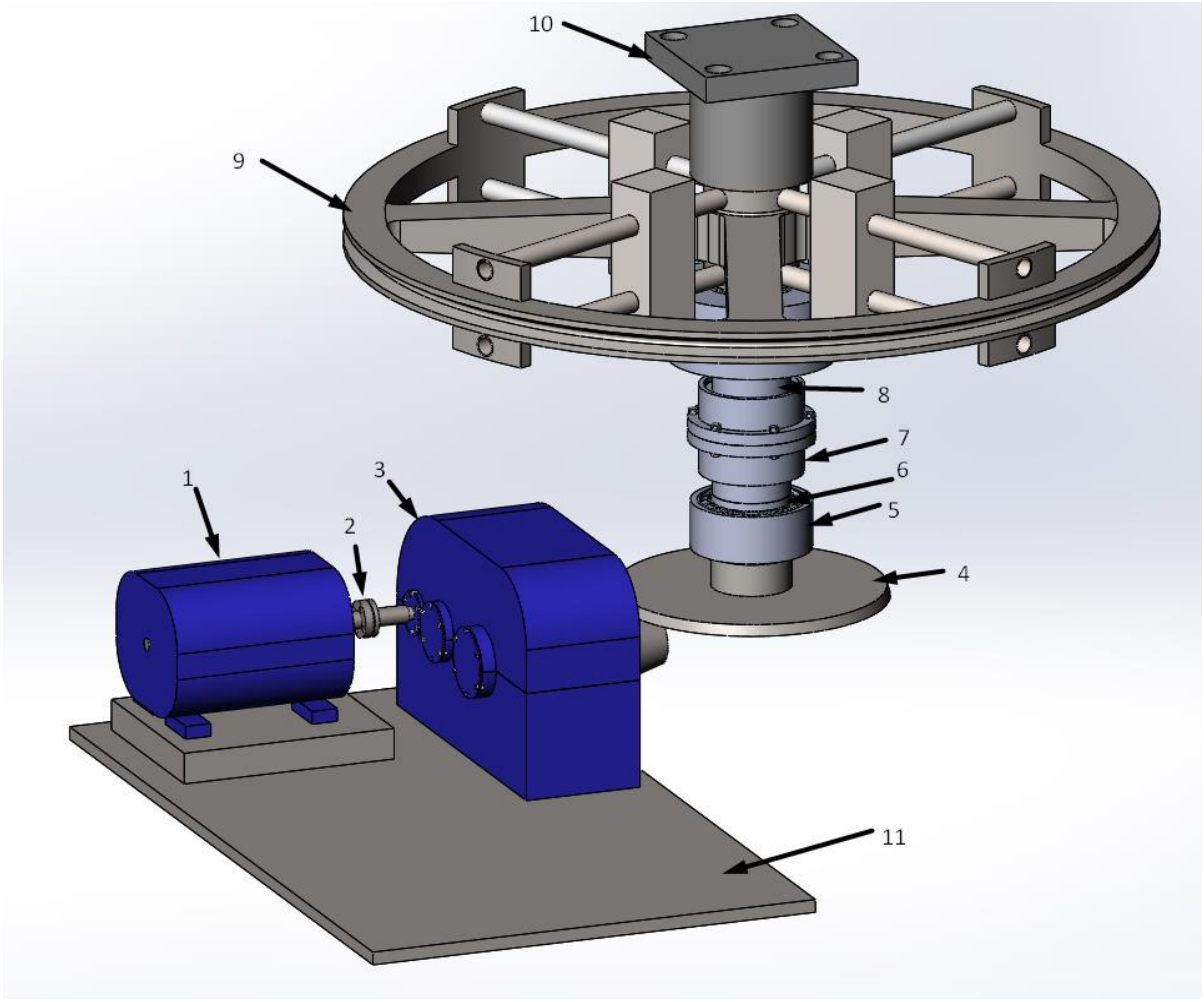


Рис 2.1. – Загальний вид 3D-моделі приводу

1 – електродвигун; 2 – муфта пружна втулочно-пальцева; 3 – редуктор; 4 – відкрита зубчата конічна передача; 5 – підшипниковий вузол відкритої зубчатої конічної передачі; 6 – вал зубчатого конічного колеса; 7 – зубчата муфта; 8 – вал шківа змінного моменту інерції; 9 – шків змінного моменту інерції;10 – верхня опора шківа змінного моменту інерції; 11 – рама

Для 3D-моделей шківа приводу канатної дороги в зборі було розроблено імітаційну модель у середовищі Solidworks Motion, яка дозволяє моделювати кінематику шківа впродовж періоду «розгін – рух з усталеною швидкістю – сповільнення».

На рис. 2.2 [11] подано дерево моделювання кінематики шківа. Функція «лінійна пружина» – це імітація пружини, яка повертає вантаж до маточини під час сповільнення шківа. За допомогою такого підходу було виконано спрощення розрахункової моделі з одночасним забезпеченням можливості врахування пружних властивостей системи без використання додаткових модулів програми Solidworks (таких як SW Simulation).

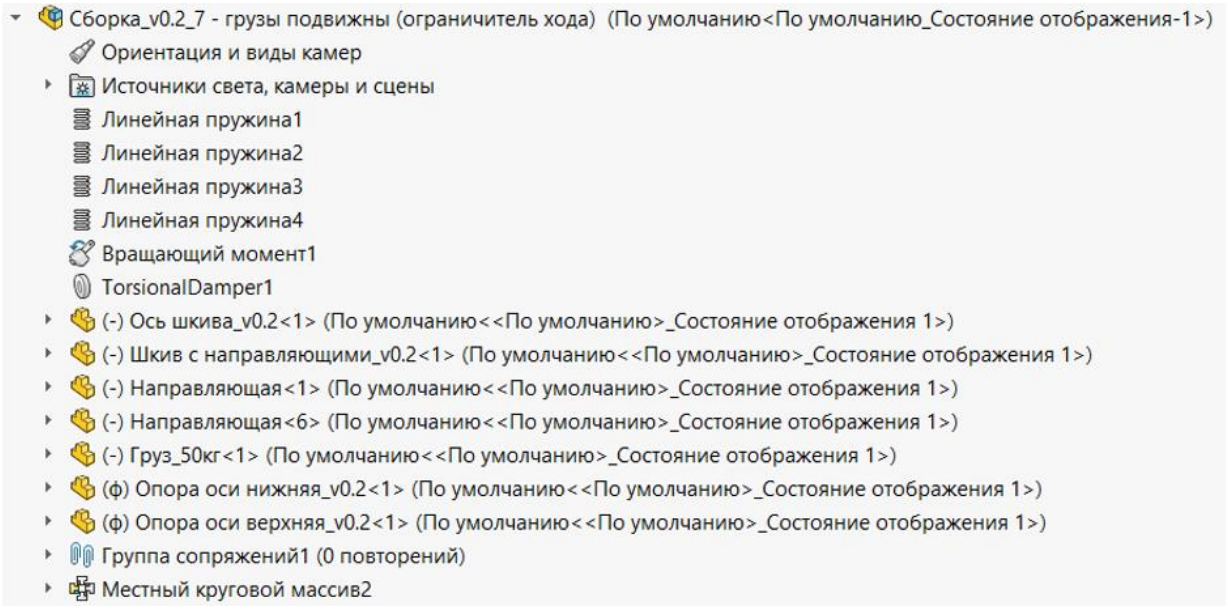


Рис. 2.2 - Дерево моделювання кінематики шківа

Поєднання функцій «крутний момент» та «демпфер» використано з метою більш точного налаштування зміни частоти обертання шківа з урахуванням обертального моменту, що є прямопропорційним до кутового переміщення шківа; при цьому коефіцієнтом пропорційності виступає коефіцієнт дисипації – один із параметрів функції «демпфер».

2.3 Розробка методики визначення параметрів шківа

Процес розробки методики визначення параметрів шківа пройшов кілька етапів для забезпечення раціональності його конструкції. Початковий етап включав вивчення впливу параметрів шківа на його функціональні характеристики. Другий включав в себе розробку та застосування багатоваріантних методів для визначення раціональних значень параметрів таких як вага вантажу, жорсткість пружин коефіцієнт тертя і т. п. В результаті використання комп'ютерних програм, зокрема SolidWorks із додатком Motion та математичної моделі котра буде описана далі, буде розраховано та вибрано раціональні значення параметрів шківа. Зокрема було визначено що підбором раціональної жорсткості вантажу можна досягти раціональної роботи приводу. Раціональна робота приводу розуміє під собою відсутніх ударних навантажень вантажів об шків оскільки це впливатиме як на динамічні так і втомні параметри. Також різкий перехід вантажів до обода не ефективно покращує параметри шківа. А занадто висока жорсткість (це жорсткість при якій планується спостерігати коливання другої ділянки та вантажі не досягають ободу шківа) надалі закритична призведе до так само малого впливу на роботу приводу. Далі у формулі 2.22 буде наведено рівняння для визначення критичної жорсткості – це жорсткість при якій очікується отримати раціональні параметри шківа. Як вже зрозуміло докритична жорсткість це жорсткість менша за критичну при котрій будуть погіршуватись властивості шківа. Тому попередньо можна передбачити що ідеальною жорсткість буде та при котрій буде одночасно закінчуватись етап розгону та вантаж досягати обода. Розроблена методика дозволила ефективно визначити параметри шківа, раціоналізуючи його конструкцію з урахуванням вимог до маси, міцності та стійкості в різних умовах експлуатації.

2.4 Теоретичне обґрунтування принципів роботи шківа змінного моменту інерції за допомогою побудови математичної моделі.

У будь-який час кожен з вантажів шківа перебуває під дією системи сил, серед яких є сили інерції ($\overline{F}_{\text{ін}}$), сили опору руху вантажу ($\overline{F}_{\text{оп}}$) та пружні сили пружинних блоків ($\overline{F}_{\text{пр}}$)[13]. В залежності від того, на якому етапі руху перебуває вантаж (розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення), напрямки дії цих сил можуть бути різними (рис. 2.4).

Умови стану рівноваги окремого вантажу під час неусталеного руху шківа можна представити так[13]:

$$\overline{F}_{\text{ін}} + \overline{F}_{\text{оп}} + \overline{F}_{\text{пр}} = 0. \qquad (2.1)$$

Скалярні форми цього векторного рівняння для кожного з етапів руху шківа мають вигляд:

– для етапу розгону

$$F_{\text{ін}} = F_{\text{оп}} + F_{\text{пр}}; \qquad (2.2)$$

– для етапу сповільнення

$$F_{\text{ін}} + F_{\text{оп}} = F_{\text{пр}}. \qquad (2.3)$$

Слід відмітити, що під час усталеного руху (обертання шківа з постійною швидкістю) сили опору руху вантажу $F_{\text{оп}} = 0$, а сили інерції врівноважуються пружними силами ($\overline{F}_{\text{ін}} = -\overline{F}_{\text{пр}}$)[13].

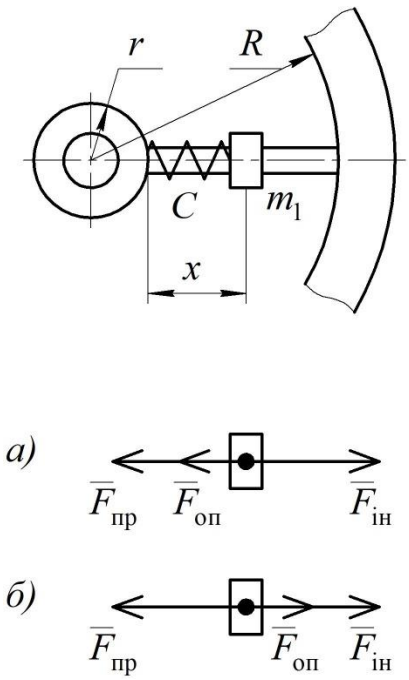


Рис. 2.3 Системи сил, що діють на вантаж:

а) під час розгону приводу; б) під час сповільнення приводу

Кожна зі складових рівнянь (2), (3) визначається так[13]:

$$F_{ін} = m_1\ddot{x}(t) = m\omega^2(t)[x(t) + r]; \quad F_{оп} = fm_1g; \quad F_{пр} = Cx(t), \qquad (2.4)$$

де m_1 – маса вантажу; f – коефіцієнт тертя у парі «вантаж – напрямні»; C – жорсткість пружинного блока; r – радіус маточини; $x(t)$ – узагальнена координата – переміщення вантажу вздовж осі x; $\ddot{x}(t)$ – друга похідна за часом від узагальненої координати; $\omega(t)$ – кутова швидкість обертання шківа.

При цьому величини $x(t), \ddot{x}(t), \omega(t)$ змінюються в часі за певними законами. Закон зміни $\omega(t)$ є відомим – це пускова характеристика двигуна, що є вихідними даними для моделювання. Інші функції треба встановити.

Підставивши (4) у (2) та виконавши необхідні математичні перетворення, отримуємо для етапу розгону [13]:

$$x(t) = \frac{\omega(t)^2 \cdot r - g \cdot f}{k^2 - w(t)^2}. \qquad (2.5)$$

Для етапу сталого руху:

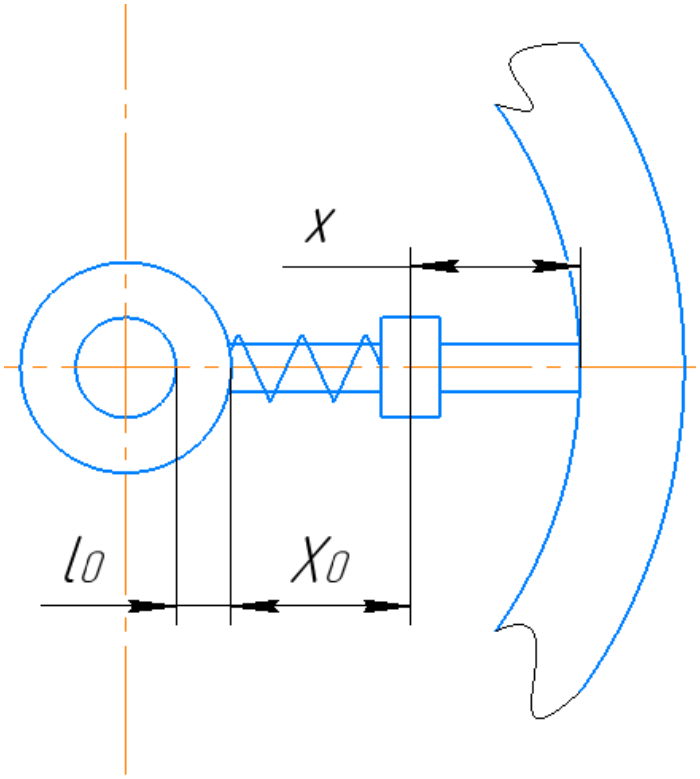


Рис. 2.4 – Геометричні розміри шківа

Нейтральне положення відносно маточини дорівнює l_0, котру можна опридiлити з рівняння:

$$m(l_0 + x_0)\omega^2 = cx_0. \quad (2.6)$$

Стійкість цього стану залежить від значення кутової швидкості шківа.

З цього рівняння можна отримати рівняння руху вантажу:

$$x_0 = \frac{ml_0\omega^2}{c - m\omega^2}. \quad (2.7)$$

Приймемо обертання системи за відносне обертання., тоді рух вантажу буде рахуватись відносним. Позначимо додаткове подовження пружини через X, в довільний момент часу залишимо переносну силу інерції $m(l_0 + X_0 + x)\omega^2$; тоді диференціальне рівняння відносного руху вантажу прийме вид [13]:

$$m\ddot{x} = -c(x_0 + x) + m(l_0 + x_0 + x)\omega^2.$$

При в рахуванні () рівняння:

$$m\ddot{x} = -cx_0 - cx + m(l_0 + x_0)\omega^2 + mx\omega^2.$$

Шляхом математичних перетворень отримаємо:

$$m\ddot{x} = -cx_0 - cx + cx_0 + mx\omega^2. \quad (2.8)$$

Тоді перетворивши рівняння 2.8 отримаєм:

$$m\ddot{x} = -cx + mx\omega^2 = -x(c - m\omega^2);$$

$$m\ddot{x} + (c - m\omega^2)x = 0;$$

$$\ddot{x} + \left(\frac{c}{m} - \omega^2\right)x = 0;$$

$$\ddot{x} + (k^2 - \omega^2)x = 0. \quad (2.9)$$

При цьому k – власна частота шківа, знак «–» у знаменнику відповідає етапу розгону, а знак «+» – етапу сповільнення [13];

$$k = \sqrt{\frac{C}{m_1}}. \quad (2.10)$$

Зробимо деякі математичні перетворення:

$$k_0^2 = k^2 - \omega^2; \quad (2.11)$$

$$k_0 = \sqrt{|k^2 - \omega^2|}. \quad (2.12)$$

Тоді рівняння 2.9 прийме вид:

$$\ddot{x} + k_0^2 x = 0. \quad (2.13)$$

Про диференціювавши ці рівняння2.13 отримаємо систему рівнянь з двома невідомими будуть отриманні константи [13]:

$$x_2 = x + A_1 \cdot \sin(k_0 + \alpha). \quad (2.14)$$

Формули констант були отримані з умов що координата вантажу $x=x_2$ в момент часу t_2, де:

$$A_1 = \frac{x}{t_2 \cdot k_{0_1} + k_0}; \quad (2.15)$$

$$k_{0_1} = \frac{\text{signum}(k^2 - \omega^2) \cdot \omega \cdot b}{\sqrt{|k^2 - \omega^2|}}; \quad (2.16)$$

$$b = \frac{\omega_{max}}{t_2}; \quad (2.17)$$

t_2 – час початку другої ділянки;

$$\alpha = \pi - k_0 \cdot t_2; \quad (2.18)$$

Для етапу сповільнення[13]:

$$x_3 = \frac{x(t)}{x(t_2)} \cdot (x(t_2) + A_2 \cdot \sin(k_0 t + \alpha_2)); \quad (2.19)$$

Формули констант були отримані з умов що координата вантажу x_3=x_2 в момент часу t_3, де[13]:

$$A_2 = \frac{1000 \cdot r \cdot \omega^2(t_2)}{\sin(\alpha + t_3 \cdot k) \cdot \left(\omega^2(t_2) - \frac{c}{m}\right)}; \quad (2.20)$$

$$\alpha_2 = \arcsin\left[\frac{1000 \cdot r \cdot \omega(t_2)^2}{A_2 \cdot (\omega(t_2)^2 - \frac{c}{m})}\right] - k \cdot t_3. \quad (2.21)$$

де:

t_3 – час початку третьої ділянки;

$r = l_0 + x_0$ – відстань від осі обертання до вантажу.

Аналізуючи цю залежність, можна виділити способи регулювання моменту інерції шківа певної базової конструкції (за умов незмінної геометрії шківа):

– зміна жорсткості пружинних блоків C (вплив через власну частоту шківа k);

- добір різних співвідношень $C - k_{тер}$.

2.5 Обґрунтування критичної жорсткості пружинних блоків

В цьому розділі вирішуються завдання, пов'язані з визначенням раціональних параметрів жорсткості пружин блоків для максимізації її продуктивності. Важливим аспектом є обґрунтування вибору конкретних значень жорсткості пружин, які забезпечують раціональні умови для роботи шківа змінного моменту інерції в різних режимах.

Виходячи з формули 2.9 можна зробити висновки що при деяких конфігураціях в яких виконується умова: $(\mathrm{k}^2 - \omega^2) = 0$, можна отримати критичне елемента дужки. Так як цікавим значенням для експерименту буде жорсткість саме її критичне значення буде визначено. Отже критична жорсткість набуватиме такого виразу[13]:

$$(\mathrm{k}^2 - \omega^2) = 0;$$

$$\left(\frac{\mathrm{c}}{\mathrm{m}} - \omega^2\right) = 0;$$

$$c_{crit} = \frac{m}{\omega^2}; \tag{2.22}$$

Отже знаючи масу вантажів та кутову швидкість обертання можна визначити критичне значення жорсткості яке повинно показувати перехід синусоїдального процесу у гіперболічний. Іншими словами кажучи значень в якій мають зникати коливання системи та система досягає раціональних значень своїх параметрів.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ШКІВА

3.1 Постановка задачі

Процес експериментальних досліджень динаміки шківа передбачав послідовне вирішення ряду завдань для отримання достовірних результатів. Початковим етапом була чітка постановка задачі, в якій визначалися основні параметри та характеристики, які слід виміряти. Це включало в себе визначення параметрів руху шківа, таких як швидкість обертання, амплітуди коливань, та інші динамічні величини.

Далі був етап розробки методики проведення експерименту, де визначалися засоби проведення експерименту за допомогою математичної моделі та середовища SolidWorks [13], методика вимірювання параметрів. Також розроблялася схема експерименту та план дій для визначення необхідної кількості досліджень.

На відзначеному етапі проводились самі експериментальні дослідження за допомогою математичної моделі та середовища SolidWorks. Була врахована взаємодія шківа з іншими елементами системи та зовнішніми факторами.

Завершальним етапом була обробка отриманих даних, включаючи аналіз результатів, порівняння з теоретичними моделями та визначення відхилень. Всі ці етапи дозволили здійснити комплексне експериментальне дослідження динаміки шківа та отримати об'єктивні результати для подальшого вдосконалення його конструкції.

3.2 Опис експериментальної установки

Опис експериментальної установки є етапом у розкритті деталей проведення досліджень та отримання надійних результатів. У даному розділі роботи детально розглядається структура та функціоналізація використовуваної установки, її основні компоненти та технічні характеристики. Важливо висвітлюються обрані методики та їх переваги, що створює базу для ретельного вивчення експериментальних даних у наступних частинах роботи.

Шків відрізнятися від типового тим, що під час розгону та сповільнення приводу його момент інерції буде змінюватися.

В якості апарату для моделювання буде використовуватись імітаційне моделювання, що полягає у відтворенні процесу «розгін – рух з усталеною швидкістю – сповільнення» в системі автоматизованого моделювання та проектування SolidWorks із застосування додатку SW Motion.

Під час розробки 3D-моделі шківа змінного моменту інерції будемо орієнтуватися на його схему (рис.2.1)[1].

Також відомі інші види зміни моменту інерції шківів наприклад такі як:

– за допомогою інерційних дисків, які вводяться в зачеплення зі шківом послідовно [3];

– шляхом використання додаткових вантажів на важелях, які відхиляються від вертикальної осі обертання системи під дією відцентрових сил під час розгону [4];

– за рахунок зміни радіуса інерції шляхом зміни вручну кута нахилу радіальних штанг, до кінців яких прикріплено вантажі [5];

– за рахунок зміни фізико-механічних властивостей феромагнітної рідини, у якій перебуває порожнистий диск з магнітом’якого матеріалу, під дією змінного магнітного поля [6];

– інші способи [7,8].

Такі способи мають ряд недоліків:

– суттєве збільшення маси та габаритів шківа;

– необхідність використання індивідуальних джерел енергії;

– складність виготовлення.

Дещо простіший та більш ефективний спосіб зміни моменту інерції реалізовано у конструкції шківа, схему та принцип дії якого захищено патентом на корисну модель [9]. Відповідно до цього патенту, шків змінного моменту інерції складається з базової конструкції, напрямних, уздовж яких переміщуються вантажі, які з'єднано з маточиною шківа за допомогою пружних блоків. Його принцип дії (реалізація зміни моменту інерції) полягає в наступному: під час розгону приводу вантажі під дією сил інерції рухаються від маточини до ободу, за рахунок чого підвищується радіус інерції, а отже, й момент інерції шківа.

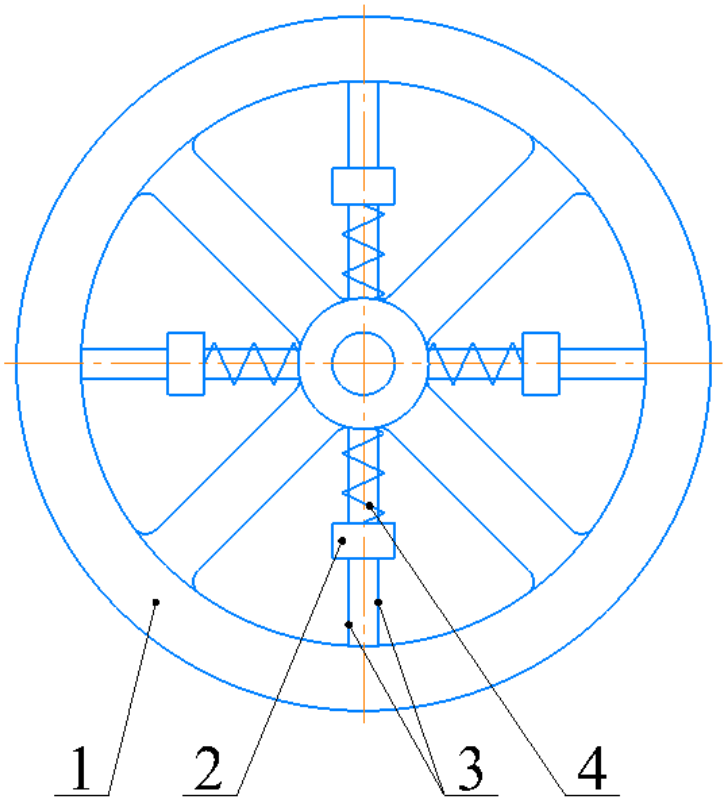


Рис. 3.1 - Схема шківа змінного моменту інерції

1 – шків; 2 – вантаж; 3 – напрямні; 4 – пружинний блок.

У якості змінних були взяті наступні параметри: жорсткість пружин, врахування тертя, коефіцієнт тертя.

3D-модель шківа змінного моменту інерції буде складатися з ободу, направляючих, вантажів див. рис. – 3.2.

Як можна зрозуміти принцип роботи[11] даного шківа ґрунтується на використанні змінного моменту інерції, що надає йому унікальні динамічні властивості. Перш за все, конструкція враховує специфіку руху та обертання шківа в умовах великих навантажень. Головний принцип полягає у здатності шківа адаптуватися до змінного навантаження та раціоналізувати свою динаміку для ефективного функціонування в різних умовах.

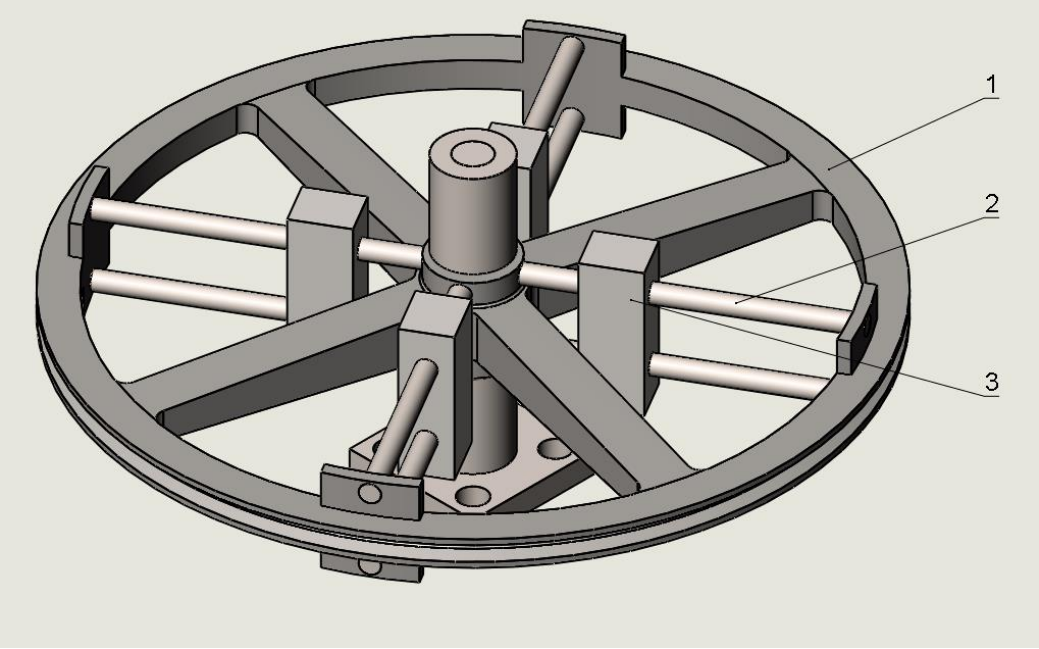


Рис 3.2 – Загальний вид 3D-моделі приводу [1]

1 – обод; 2 – направляюча; 3 – вантаж

Важливо також відзначити, що принцип роботи цього шківа базується на врахуванні не лише статичних, а й динамічних аспектів взаємодії з навантаженням. Такий підхід відкриває нові перспективи у сфері ефективності шківа зі змінним моментом інерції.

3.3 Методика проведення експерименту

Як вже було вище зазначено в якості апарату для моделювання буде використовуватись імітаційне моделювання, що полягає у дослідженні руху графічному моделюванні руху моделей зборки. Дослідження руху не змінюють модель зборки або її властивості. Вони моделюють та анімують рух, вказаний для моделі. Можна використовувати сполучення SOLIDWORKS для обмеження руху компонентів у складанні при моделюванні руху моделі.

При виконанні дослідження руху можна використовувати Motion Manager, інтерфейс на базі тимчасової шкали, що включає наступні інструменти дослідження руху[13].

- Анімація. Функцію Анімація можна використовувати для анімації руху збірок.
  - Додайте двигуни, щоб створювати рух для однієї або кількох деталей у збиранні.
  - Призначайте позиції для компонентів збирання в різні моменти часу за допомогою ключових точок. При анімації використовується інтерполяція визначення руху компонентів складання між ключовими точками.
- Базовий рух [13]. Базовий рух можна використовувати для створення зразкових ефектів двигунів, пружин, контактів та сили тяжіння у зборках. Basic Motion враховує масу під час розрахунку руху. Basic Motion розраховується досить швидко, щоб ця функціональність могла використовуватись для створення презентаційних анімацій на основі фізичного моделювання.
- Аналіз руху [13]. Аналіз руху можна використовувати для точного моделювання та аналізу ефектів руху елементів (включаючи сили, пружини, демпфери та тертя) у складанні. Аналіз руху використовує потужні програми кінематичного розрахунку та враховує у розрахунках

властивості матеріалів, а також масу та інерцію. Також можна використовувати Аналіз руху для створення епюри результатів моделювання для подальшого аналізу.

Аналіз руху для даного типу досліджень підходить найбільше оскільки використання Аналіз руху для запуску потужного кінетичного моделювання, яке враховує фізику руху. Цей інструмент найбільше покладається на розрахунок із трьох існуючих інструментів. Чим точніше Ваше розуміння фізики необхідного руху, тим точнішим буде Ваш результат. Можна використовувати Аналіз руху для запуску аналізу впливу для кращого розуміння реакції компонентів різні типи сил.

Отже, функція Аналізу руху служить для точного моделювання та аналізу руху в зборці з урахуванням впливу елементів дослідження руху (включаючи сили, пружини, демпфери та тертя).

У дослідженні аналізу руху об'єднуються елементи дослідження руху зі сполученнями у розрахунках руху. Тому обмеження руху, властивості матеріалу, маса та контакти компонентів включаються до обчислення кінематичної вирішальної програми SOLIDWORKS Motion.

При аналізі руху також розраховуються навантаження, які можна використовувати визначення схем навантаження у структурному аналізі.

На рисунку 3.3 наведено дерево моделювання шківа змінного моменту інерції, на я кому можна такі властивості як Обертальний двигун [13], Контакт твердих тіл та лінійна пружина.

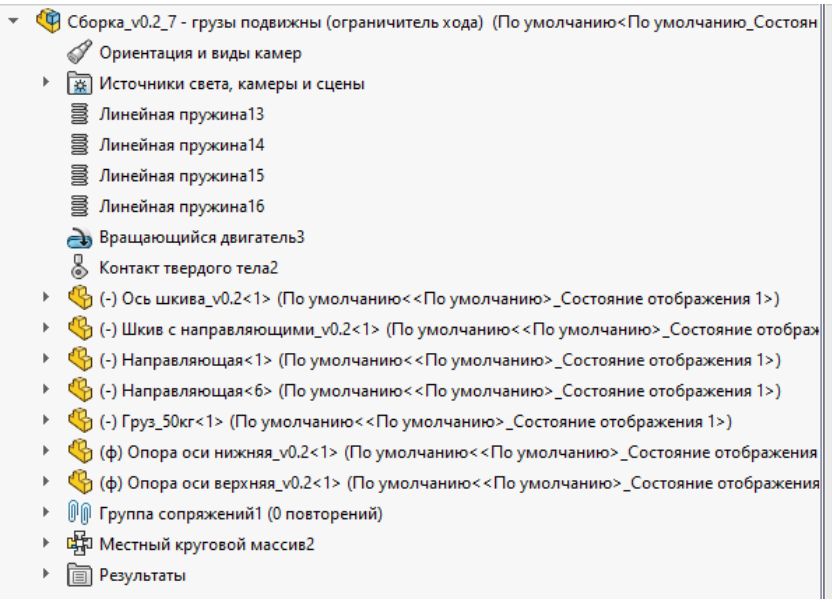


Рис. 3.3 Дерево побудови Аналізу руху

У даному досліджені були відтворенні процесу «розгін – рух з усталеною швидкістю – сповільнення» в системі автоматизованого моделювання та проектування SolidWorks із застосування додатку SW Motion.

Рух шківа задавався властивість двигун. Двигуни є елементами дослідження руху, які рухають компоненти у збиранні, шляхом моделювання ефектів різних типів двигунів .Типи двигунів [13] представленні на рис. 3.4.

Рис. 3.4 Типи двигунів в додатку SW Motion

Для даного дослідження був використана властивість Обертальний двигун в налаштуванні якого рух задавався точками даних. Весь період руху було розбито на три ділянки «розгін – рух з усталеною швидкістю – сповільнення», перед та після них були додані так званні ділянки спокою тривалістю десять секунд для того аби продемонструвати що на шків немає ніякого впливу в момент спокою. Обраною сталою швидкістю 3.33 рад./сек. була взята з кваліфікаційної роботи[1]. Графік всіх ділянок наведено на Рис. - 3.5.

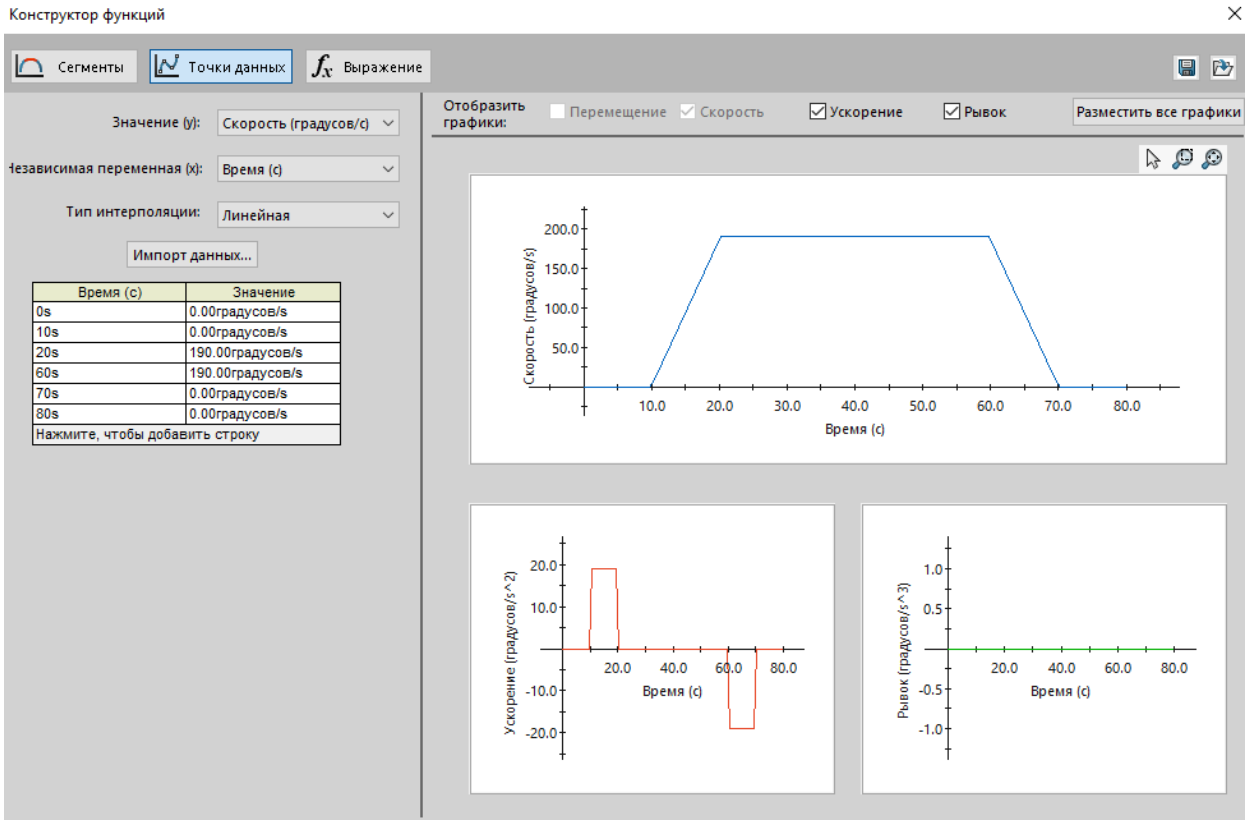


Рис. 3.5 Налаштування Обертального двигуна

Для плавності роботи на шків були встановлені пружини жорсткість яких в подальшому буде змінюватись. Пружини є елементами моделювання, які рухають компоненти у складанні шляхом моделювання ефектів різних типів пружин.

Лінійний демпфер. Представляє сили, що діють між двома компонентами на відстані та у певному напрямку. Можна вказати розташування демпфера двох деталях. Аналіз руху:

- Розраховує сили демпфування на основі відносної швидкості розташування двох деталей
- Застосовує чинну силу до першої обраної деталі – тілу дії.
- Застосовує рівну і протилежно спрямовану силу реакції лінії видимості до другої обраної деталі – тілу протидії.

На рис. 3.6 наведено а місця встановлення пружин. Функція «лінійна пружина» – це імітація пружини, яка повертає вантаж до маточини під час сповільнення шківа. За допомогою такого підходу було виконано спрощення розрахункової моделі з одночасним забезпеченням можливості врахування пружних властивостей системи без використання додаткових модулів програми SolidWorks (таких як SW Simulation)[11].

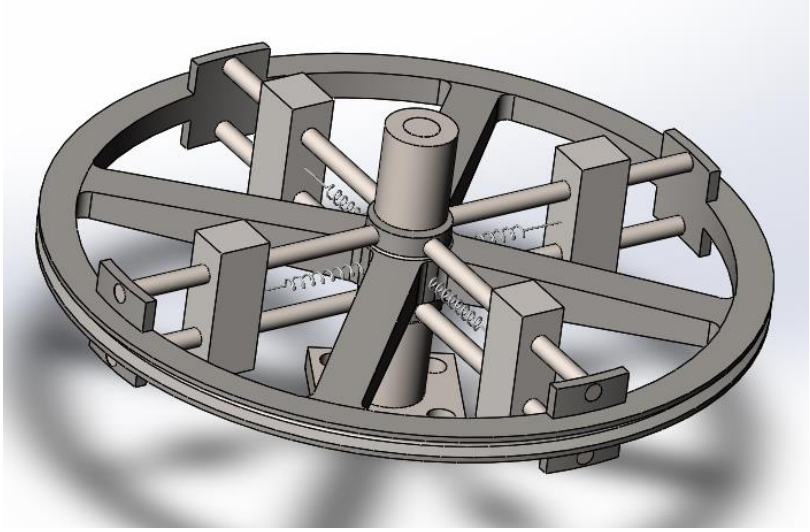


Рис. 3.6 - 3D-модель шківа з умовним вказанням пружин

Пружина має наступні налаштування (рис. 3.7):

- відображення вливають лише на відображення пружини;

- демпфер – демпфує коливання вантажу та робить його рух більш плавним;

- в налаштуваннях пружини є необхідний параметр це жорсткість k пружини.

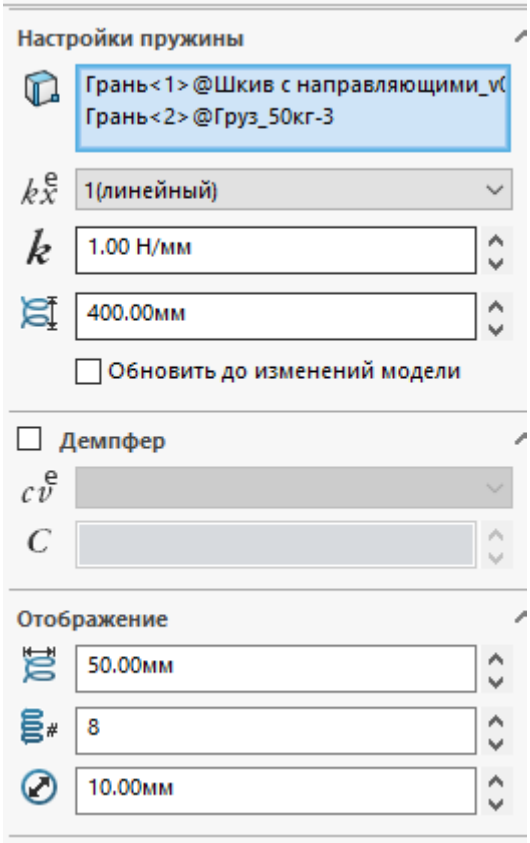


Рис 3.7 Налаштування властивостей лінійної пружини

Для того аби визначити переміщення вантажів був використаний контакт твердих тіл [13]. Ця команда дозволяє як враховувати тертя між тілам так і задати програмі те що один об’єкт не може проникнути в інший.

Оскільки було виконано два великі масиви досліджень один з яких є тертя. Тертя (Тільки в Аналізі руху) - властивості статичного або динамічного тертя, застосованого для розрахунку контакту, визначається властивостями матеріалу, якщо не очищено параметр Матеріал. Немаловажним аспектом буде є те, які налаштування були встановлені. Це робилось за допомоги вище

зазначеної функції “Контакт твердих тіл”. При проведенні цих досліджень було використано два коефіцієнти тертя, котрий змінювався способом змінення матеріалу груп, що труться. Приклади налаштувань коефіцієнтів тертя [13] наведені на Рис. 3.8.

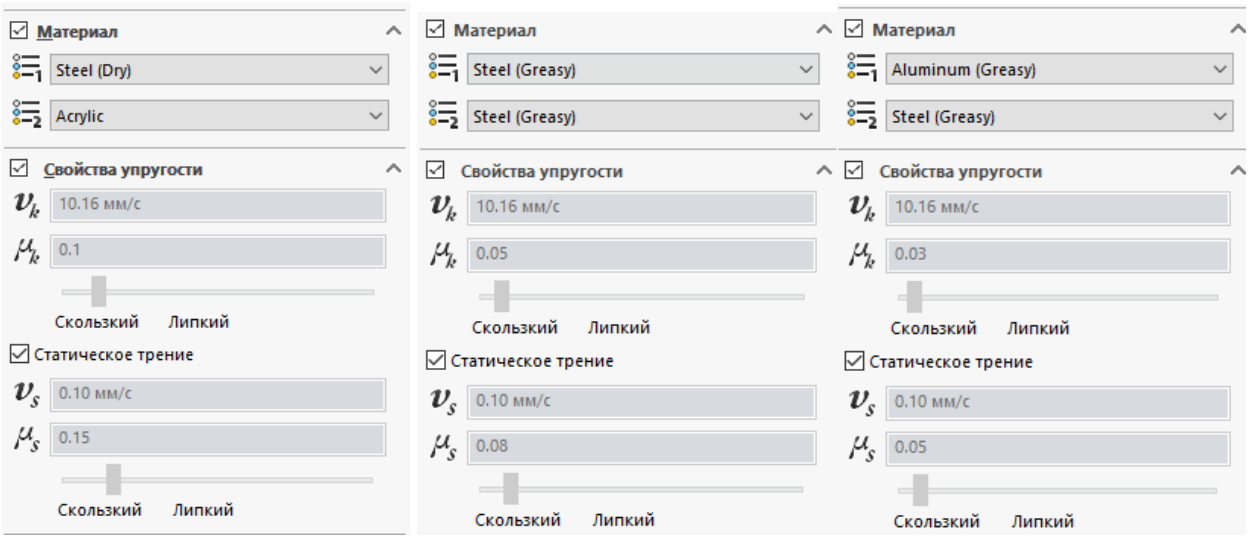


Рис. 3.8 – Налаштування коєфіцієнта тертя у функції “Контакт твердих тіл”

На рис 3.9 наведено розтлумачення символів.

	Трение	Включает динамическое трение в расчет контакта.
v_k	**Скорость динамического трения**	Определяет скорость, при которой динамическое трение становится постоянным.
μ_k	**Коэффициент динамического трения**	Определяет константу, используемую для расчета сил, вызываемых динамическим трением.
	Статическое трение	Включает статическое трение в расчет контакта.
v_s	**Скорость статического трения**	Определяет скорость, при которой преодолевается сила статического трения, и статичный компонент начинает двигаться.
μ_s	**Коэффициент статического трения**	Определяет константу, используемую для расчета силы, необходимой для преодоления сил между двумя касающимися телами в состоянии покоя.

Рис. 3.9 – розтлумачення символів

Також ця функція була прописана в усіх групах експериментів для вантажів та шківа для запобігання проникнення одних в інші. Налаштування цієї функції наведено на Рис. 3.10

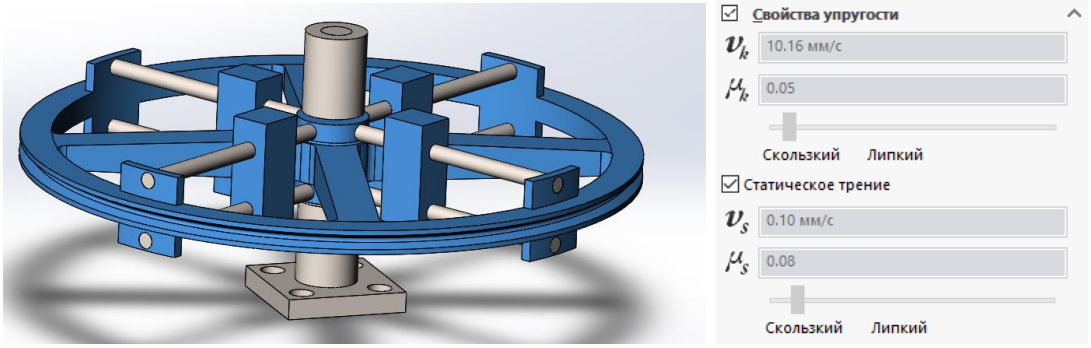


Рис. 3.10 – Налаштування параметрів функції “Контакт твердих тіл” для контакту ступиця-вантажі

Можна розрахувати та створити епюру результатів Аналізу руху, таких як сили або переміщення, в PropertyManager [13] Результати. Для даного дослідження використовувався один датчик котрий встановлювався на одному з вантажів та вказував його лінійне переміщення відносно осі обертання шківа. На рис. 3.11 наведено налаштування властивості Результати та грань на якій розташовується датчик.

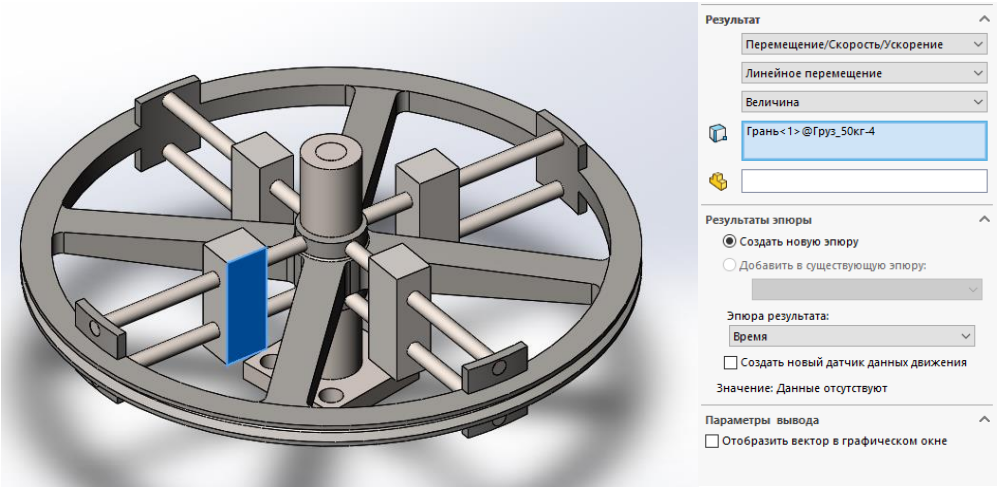
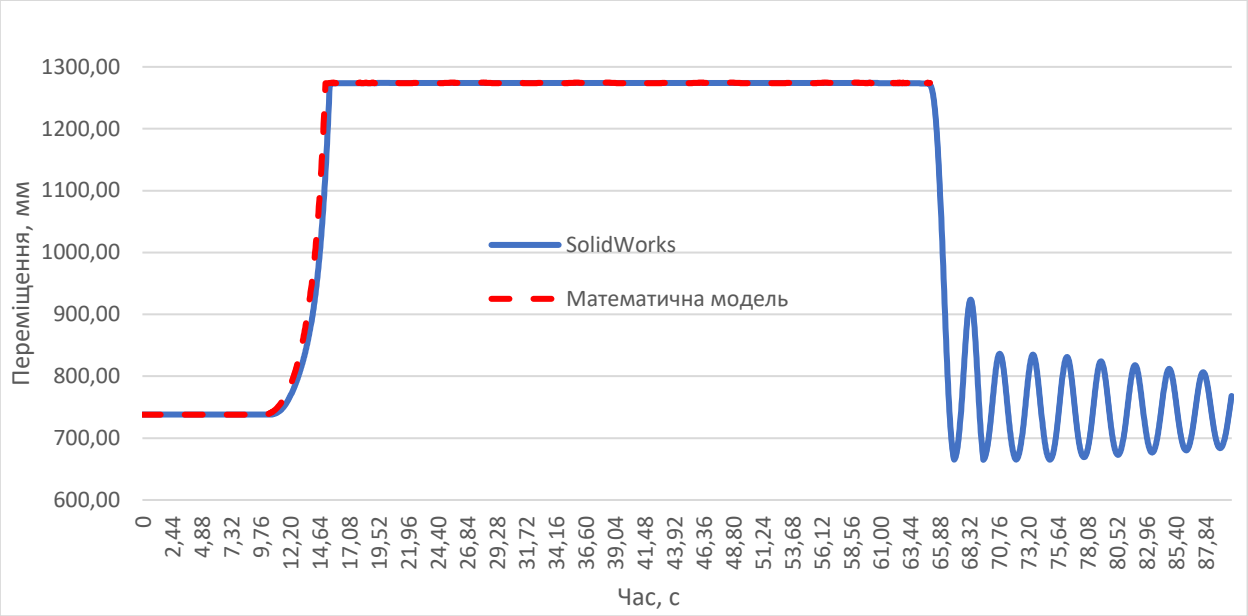


Рис. 3.11 Місцерозташування таналаштування датчика

3.4 Зведення результатів експериментів

3.4.1 Експерименти без урахування тертя

У цьому пункті наведено результати експериментальних досліджень, проведених за методикою, описаною в п. 3.3 та 2.3. Результати представлено графічно з додатковими коментарями. В описі до кожного графіка подано зіставлення результатів, отриманих теоретично (за математичною моделлю) та експериментально, з вказанням відхилення у відсотках.



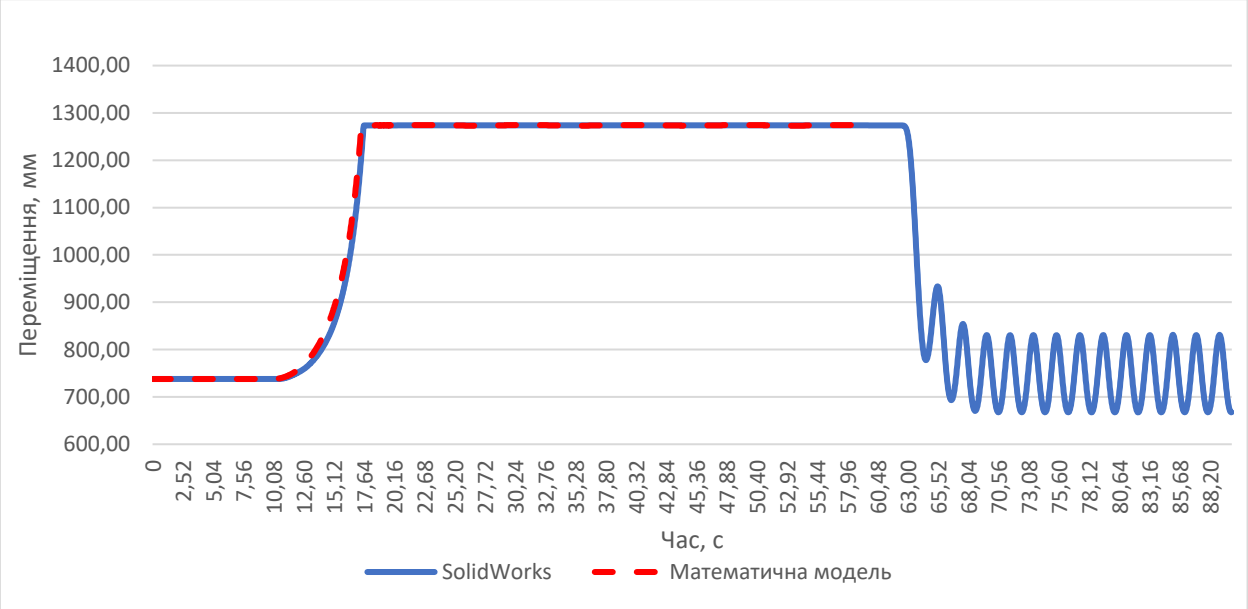
Граф. 3.1 – Дослід з використанням жорсткості 1000 Н/м

Графік 3.1 та наступні будуть розбити на три основні ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення та надалі графіки будуть описуватись по ділянкам:

- Розгін(0-16 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий майже миттєво досягає обода шківа (приблизно об 16 секунді), а отже вплив змінення моменту інерції

шківа відбувається нераціонально. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

- Рух з усталеною швидкістю (16-64 с): друга ділянка проходить без коливають та прямолінійно. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - 0,34. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (64-80 с): третя ділянка починається різким нахилом кривої та затухаючими коливаннями. Вони затухаючі через те, що під час цих коливань вантаж б'ється об маточину шківа та спостерігається ударне демпфування.



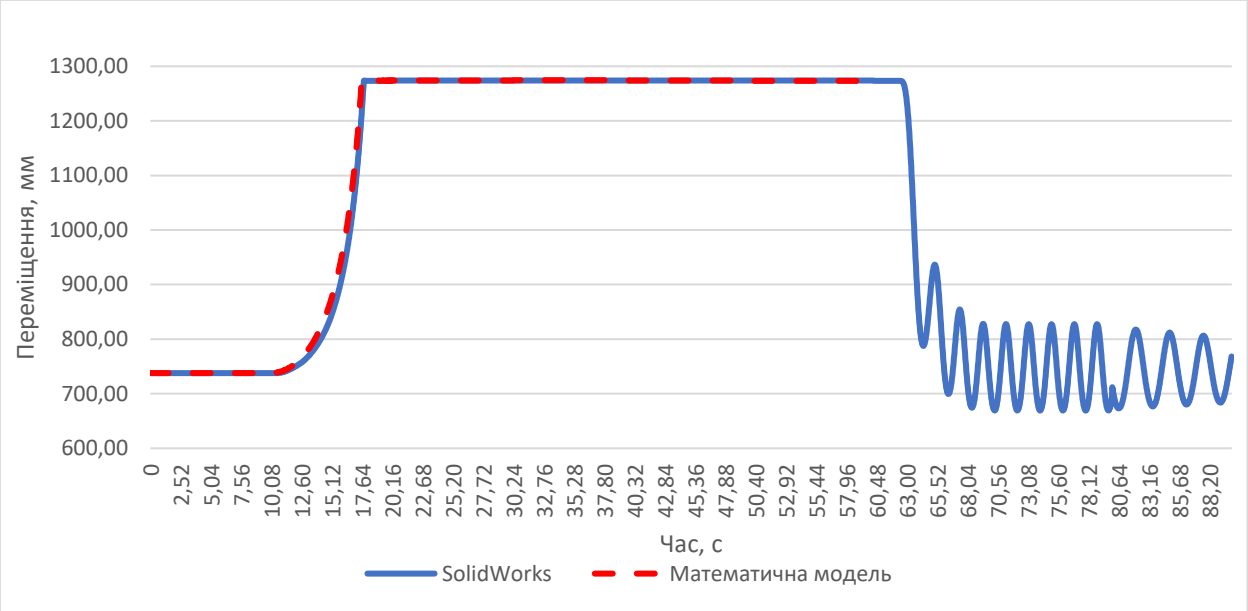
Граф. 3.2 – Дослід з використанням жорсткості 2100 Н/м

Графік 3.2 показує експеримент з жорсткістю пружин 2100 Н/м:

- Розгін(0-17 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода

шківа (приблизно об 17 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

- Рух з усталеною швидкістю (17-63 с): друга ділянка проходить без коливають та прямолінійно. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - 0,54. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – менше 5%;
- Сповільнення (63-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та коливаннями. Ці коливання гармонічні отже це свідчить про те, що вантаж перестав торкатися маточини.

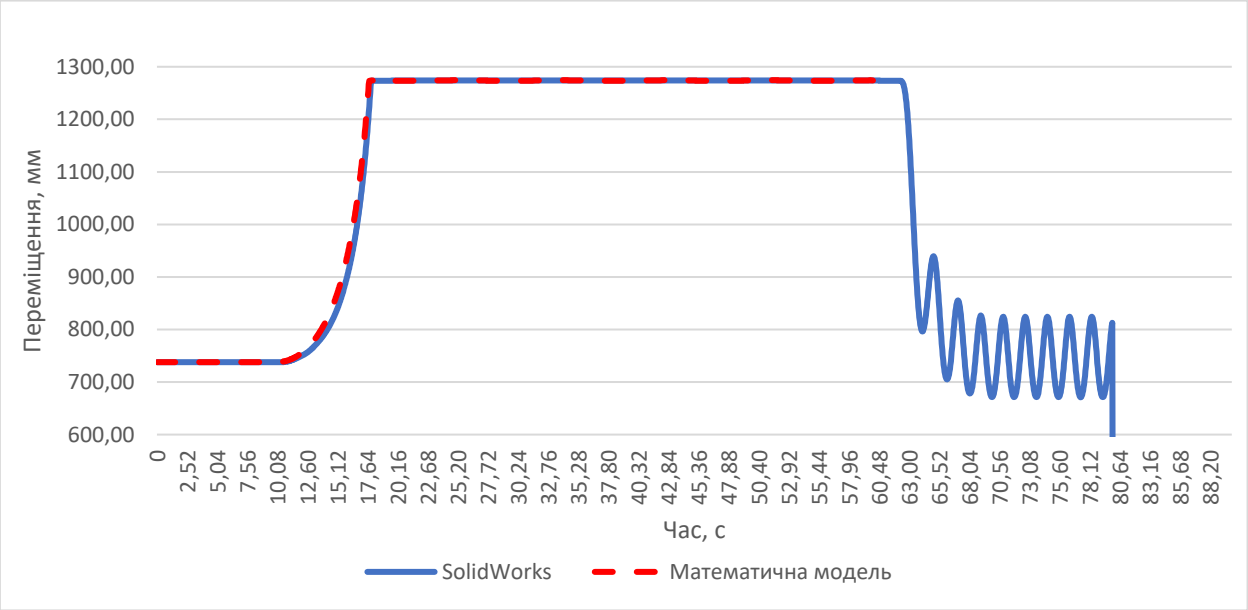


Граф. 3.3 – Дослід з використанням жорсткості 2200 Н/м

Графік 3.3 показує експеримент з жорсткістю пружин 2200 Н/м:

- Розгін(0-18 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода шківа (приблизно об 18 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

- Рух з усталеною швидкістю (18-63 с): друга ділянка проходить без коливають та прямолінійно. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - 0,54. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (63-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та гармонічні коливаннями. Отже це свідчить про те, що вантаж перестав торкатися маточини. У 80 секунду можемо спостерігати що вантаж зачепився об маточину чи направляючу та коливання стали затухати.



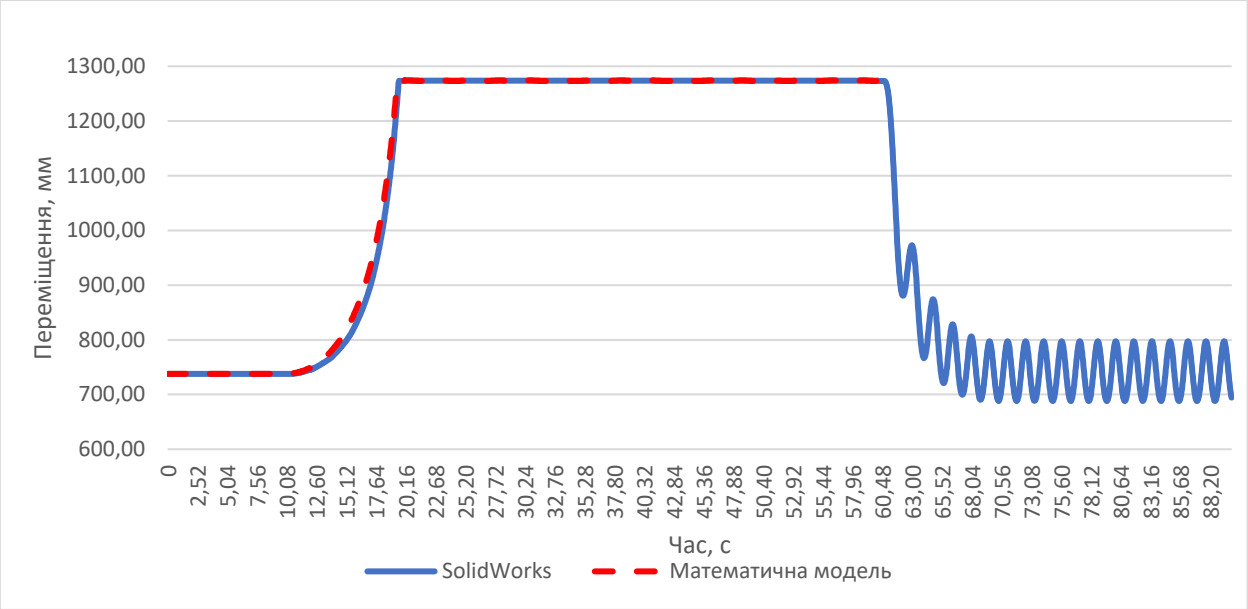
Граф. 3.4 – Дослід з використанням жорсткості 2300 Н/м

Графік 3.4 показує експеримент з жорсткістю пружин 2300 Н/м:

- Розгін(0-17 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода

шківа (приблизно об 17 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

- Рух з усталеною швидкістю (17-62 с): друга ділянка проходить без коливають та прямолінійно. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - 0,54. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (62-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та затухаючими та гармонічні коливаннями. Отже це свідчить про те, що вантаж перестав торкатися маточини. У 80 секунду можемо спостерігати що вантаж зачепився об маточину чи направляючу та коливання припинились, дослід проводився декілька разів та ефект не змінився.



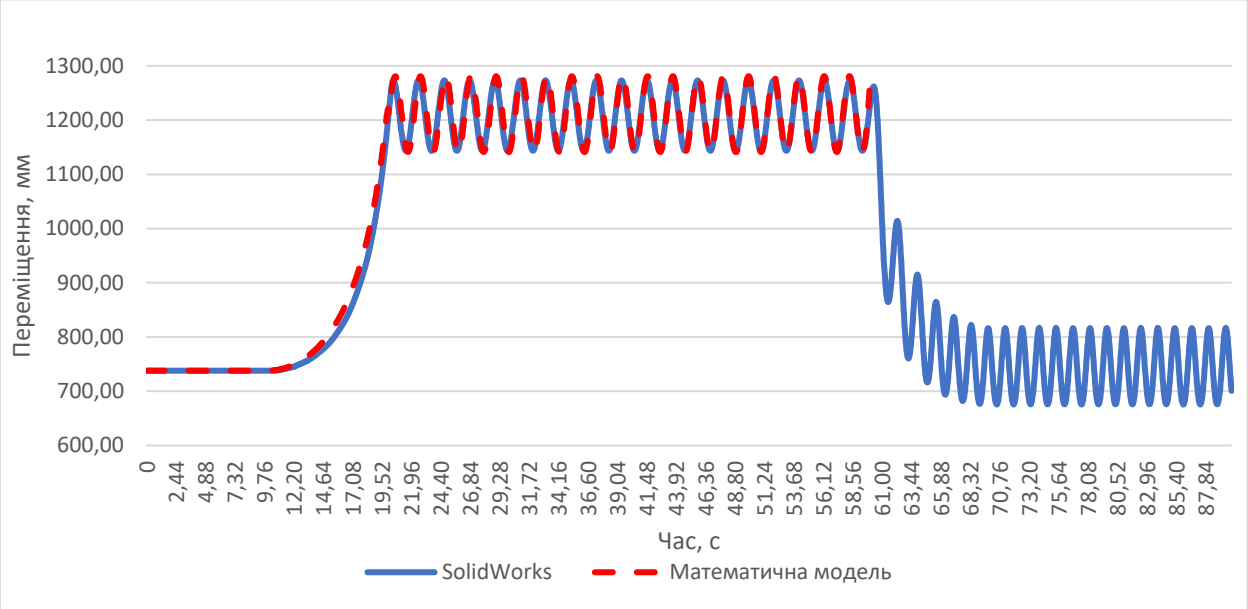
Граф. 3.5 – Дослід з використанням жорсткості 3400 Н/м

Графік 3.5 показує експеримент з жорсткостями пружин 3400 Н/м:

- Розгін(0-18 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу

рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода шківа (приблизно об 18 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

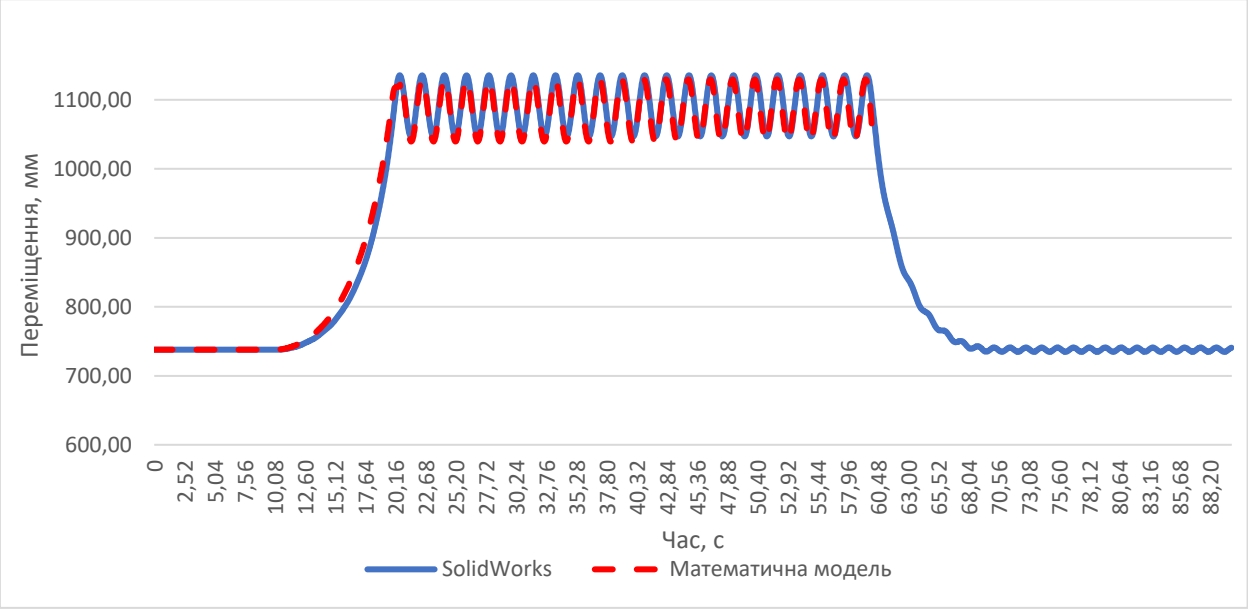
- Рух з усталеною швидкістю (18-60 с): друга ділянка проходить без коливають та прямолінійно. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - 0,54. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (60-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та затухаючими коливаннями. Отже це свідчить про те, що вантаж перестав торкатися маточини. У 80 секунду можемо спостерігати що вантаж зачепився об маточину чи направляючу та коливання припинились, дослід проводився декілька разів та ефект не змінився.



Граф. 3.6 – Дослід з використанням жорсткості 4000 Н/м

Графік 3.6 показує експеримент з жорсткостями пружин 4000 Н/м:

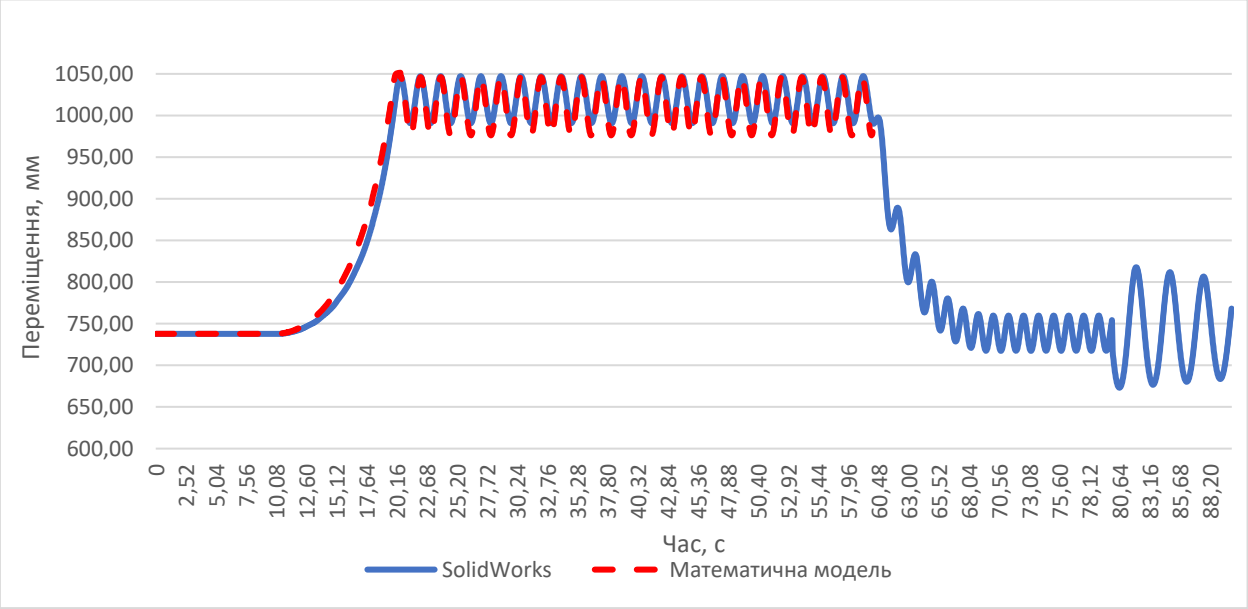
- Розгін(0-20 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода шківа (приблизно об 17 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Рух з усталеною швидкістю (20-60 с): друга ділянка виділяється наявністю гармонічних коливань, вантаж продовжує торкатись обода. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - -70. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (20-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та затухаючими коливаннями. Вони затухаючі через те, що під час цих коливань вантаж б'ється об маточину шківа та спостерігається ударне демпфування.



Граф. 3.7 – Дослід з використанням жорсткості 4500 Н/м

Графік 3.7 показує експеримент з жорсткістю пружин 4500 Н/м:

- Розгін(0-20 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода шківа (приблизно об 20 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Рух з усталеною швидкістю (20-60 с): друга Характеризується збільшенням амплітуди гармонічних коливань. Вантаж перестав торкатись ободу та виходить лише на 1125мм. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює - -45. Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;
- Сповільнення (60-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та гармонічними коливаннями коливаннями.



Граф. 3.8 – Дослід з використанням жорсткості 5000 Н/м

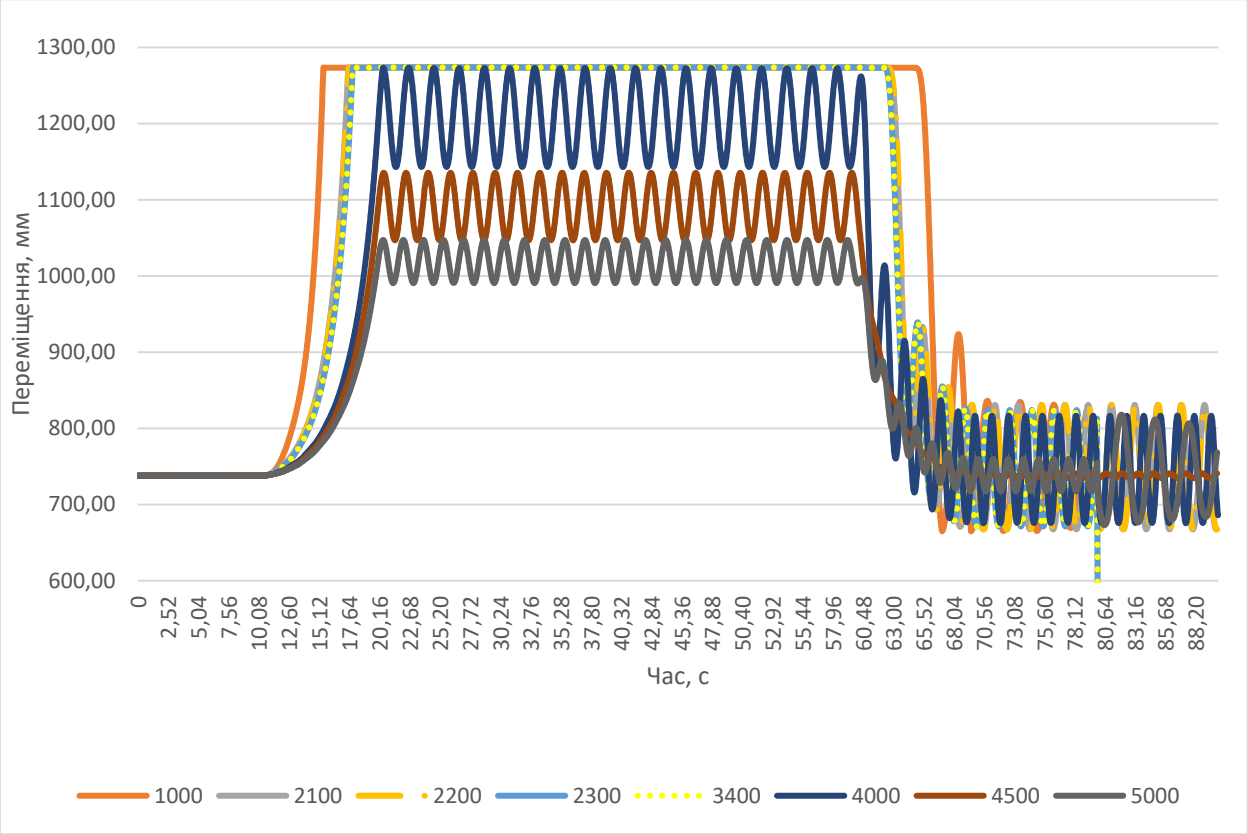
Графік 3.8 показує експеримент з жорсткістю пружин 5000 Н/м:

- Розгін(0-20 с): Від 0 до 10 секунд шків не рухається, що й можна спостерігати на графік о 10-й секунді починається рух шківа й одразу

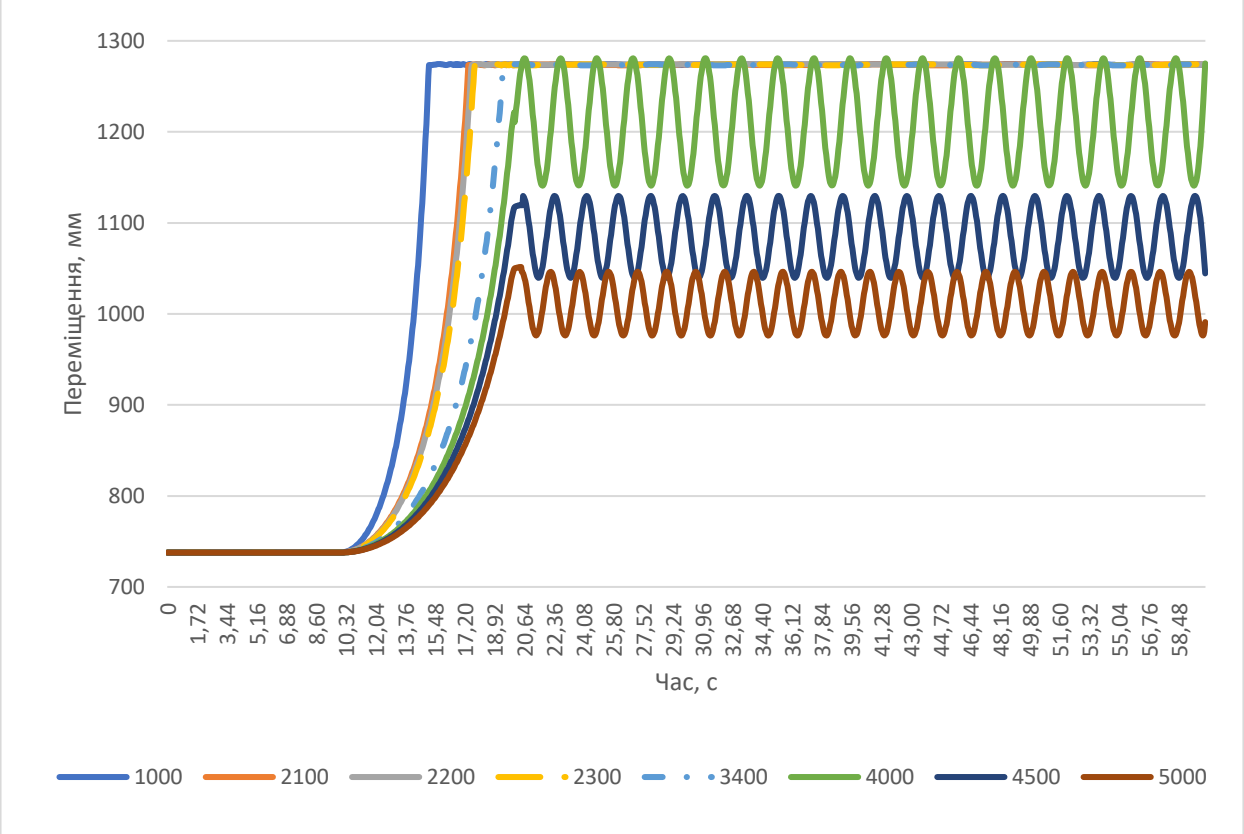
рухається вантаж котрий більш плавно ніж попередній досягає обода шківа (приблизно об 20 секунді). Розбіжність між теоретичними та експериментальними значеннями – 5%;

- Рух з усталеною швидкістю (20-60 с): друга Характеризується збільшенням амплітуди гармонічних коливань. Вантаж перестав торкатись ободу та виходить лише на 1050. Масштабний коефіцієнт котрий використовувався для теоретичного випробування дорівнює --45. Похибка між математичною моделлю та SolidWorks менше 5%;
- Сповільнення (60-80 с): третя ділянка починається більш плавним нахилом кривої ніж попередня та гармонічними коливаннями.

Отже проведені експерименти були зведені у два графіки Граф. 3.9 і 3.10. Опираючись на ці дані можна зробити висновок про те, що при низьких жорсткостях момент часу, коли вантаж торкається ободу майже миттєвий. Збільшення жорсткості показує що рух від маточини до ободу стає більш плавним це явище впливатиме на роботу приводу позитивно оскільки зменшуються ударні навантаження, що з’являються в разі удару вантажу об обід. Також при деяких закретичних значеннях жорсткості можна спостерігати гармонічні коливання амплітуда яких зменшується зі збільшенням її. На третій ділянці, на всіх графіках спостерігаються коливання. При жорсткості 1000 Н/м і менше спостерігаються затухаючі коливання через ударне тертя, при жорсткостях 2100 і вище коливання стають гармонічними. Експерименти показали те що на двох останніх ділянках будуть коливання, що малоймовірно. Тому, сили тертя будуть гасити їх, отже наступні експерименти будуть приведенні для цих самих жорсткостей але з урахуванням коефіцієнта тертя.



Граф. 3.9 – Зведений графік експериментів у SolidWorks



Граф. 3.10 – Зведені теоретичні графіки

3.4.2 Експерименти з урахування тертя

Випробування з урахуванням тертя виконувались для наступних жорсткостей пружин : 1000, 2100, 2200, 2300, 3400, 4000, 4500, 5000 Н/м. Також використовувались наступні коефіцієнти тертя: 0,1, 0,05, 0,03. Графіки для більшої компактності було зведено по двом категоріям: однакова жорсткість пружин та однаковий коефіцієнт тертя. На наступних графіках як і на попередніх можна спостерігати дві так звані ділянки спокою це перші та останні 10 сек., під час цих ділянок шків не здійснює ніякого руху.

Отже на графіку 3.11 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

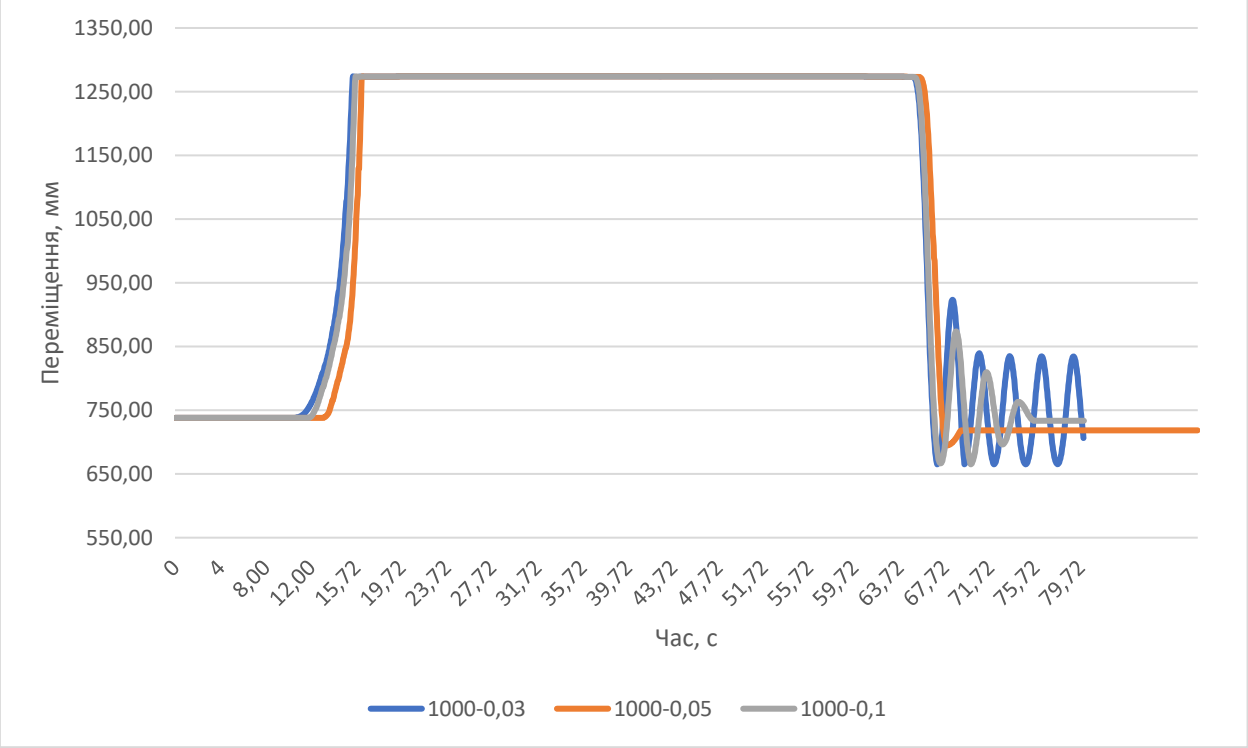
- Розгін: Під час етапу розгону можна спостерігати підвищення крутизни кривої по рівняно з експериментом без тертя. Найбільш ймовірно це явище пов’язане з тим, що силі інерції необхідно долати силу тертя. Також ділянка часу між початком руху вантажу та виходом на максимальну відстань від цапфи значно зменшилась. При коефіцієнті тертя 0,03 крива має найбільш пологу траєкторію а при 0,1 та 0,05 має невеликі ривкоподібні скачки. При коефіцієнтах 0,03 та 0,1 початок руху вантажу починається приблизно об 10с. та закінчується об 17с. та при коеф. 0,05 починається приблизно об 14с. та закінчується об 18с.
- Рух з усталеною швидкістю: Ділянка при коеф. 0,1 та 0,03 починається та закінчується приблизно однаково об 17с. та 63с. відповідно коеф. 0,05 має наступні часові рамки 18с. початок та 64с кінець. На кривих 0,03 та 0,05 можна спостерігати невеликі коливання.
- Сповільнення: Оскільки третя ділянка при різних коефіцієнтах має кардинально різний вигляд розглядатися вони будуть окремо:

  0,03 – При цьому коефіцієнті тертя на третій ділянці спостерігаються , що крива має такий самий кут нахилу як і інші та незатухаючі коливання. Якщо характер графіку вибивався з загальної картини такий дослід

проводився повторно, отже при даній комбінації параметрів на графіку можна спостерігати явище малоймовірне у нормальному середовищі.

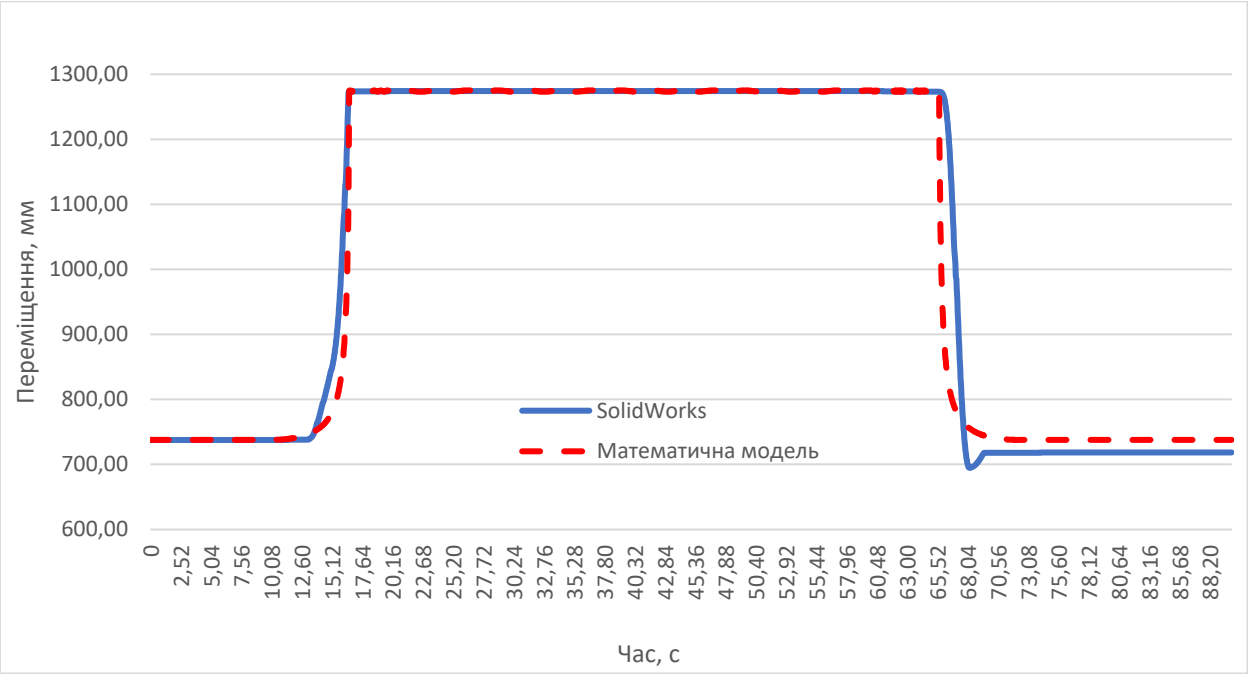
0,05 – крива має такий самий кут нахилу як і інші також можна спостерігати що є невелике коливання в момент коли вантаж повертається в початкове положення та воно майже миттєво згасає.

0,1 - крива має такий самий кут нахилу як і інші також можна спостерігати затухаючі коливання а також, що вантаж не повертається в початкове положення.



Граф. 3.11 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 1000 Н/м

На графіку 3.12 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 1,57%, найбільша – 31,86%, що пояснюється врахуванням SolidWorks більшої кількості змінних параметрів приводу ніж теоретична модель наприклад такого явища як ривкоподібний рух вантажу.



Граф. 3.12 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 1000Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

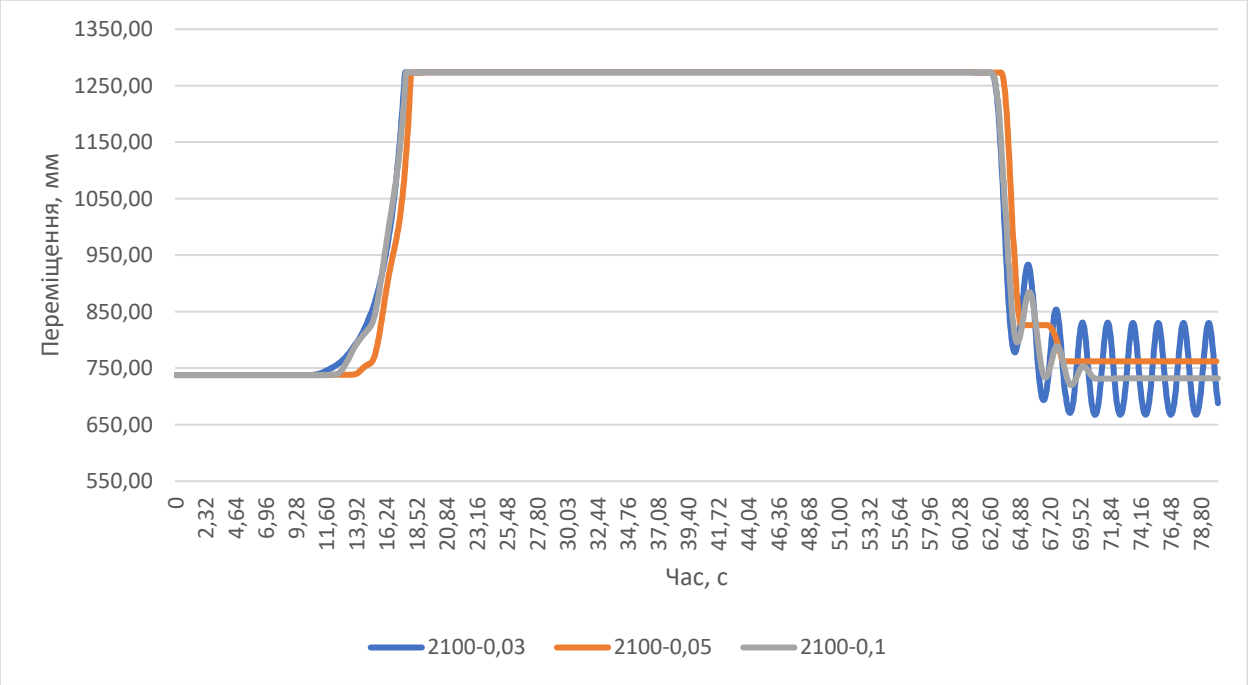
На графіку 3.13 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

- Розгін: Для жорсткості 2100 Н/м характер кривих не змінився але порівняно з ним же можна спостерігати що рух вантажів став більш плавним;
- Рух з усталеною швидкістю: Ділянка при коеф. 0,1 та 0,03 починається та закінчується приблизно однаково об 18с. та 63с. відповідно коеф. 0,05 має наступні часові рамки 19с. початок та 63,5с кінець. На кривих 0,03 та 0,05 можна спостерігати що коливання зникли. Проміжок між закінченням ділянки між різними коефіцієнтами зменшився;
- Сповільнення: Оскільки третя ділянка при різних коефіцієнтах має кардинально різний вигляд розглядатися вони будуть окремо:

  0,03 – Характер кривої не змінився;

  0,05 – Характер кривої не змінився.

0,1 - Характер кривої не змінився. При даній жорсткості можна спостерігати на відмінну від попереднього досліду вантаж зіпнився ближче то маточини шківа порівняно з початковим положенням.



Граф. 3.13 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 2100Н/м

На графіку 3.14 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 3,8%, найбільша – 36,26 %,.

Граф. 3.14 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 2100Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

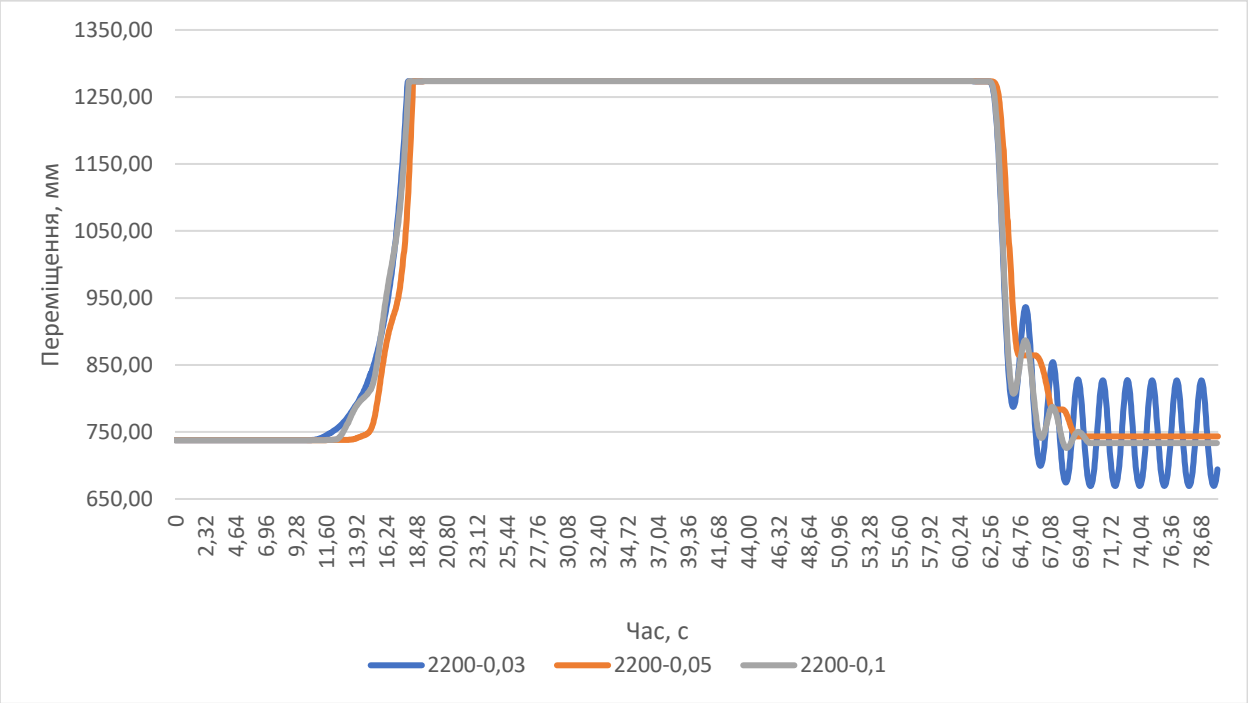
На графіку 3.15 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

- Розгін: Характер кривих не змінився. Можна спостерігати невеликі коливання при коефіцієнтах 0,05 та 0,1;
- Рух з усталеною швидкістю: характер ділянки схожий на попередній, ділянка починається та закінчується приблизно в один час для всіх коефіцієнтів.
- Сповільнення: Оскільки третя ділянка при різних коефіцієнтах має кардинально різний вигляд розглядатися вони будуть окремо, нахил кривих має однаковий кут:

0,03 – Характер кривої не змінився, амплітуда коливань зменшилась на відміну від попереднього досліду;

0,05 – Крива не змінює характеру, спостерігається зменшення амплітуди коливань та збільшення періоду періоду.

0,1 – Крива має схожий характер як і в усіх інших кривих спостерігається зменшення амплітуди.



Граф. 3.15 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 2200Н/м

На графіку 3.16 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 2,21%, найбільша – 36,42%,.

Граф. 3.16 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 2200Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

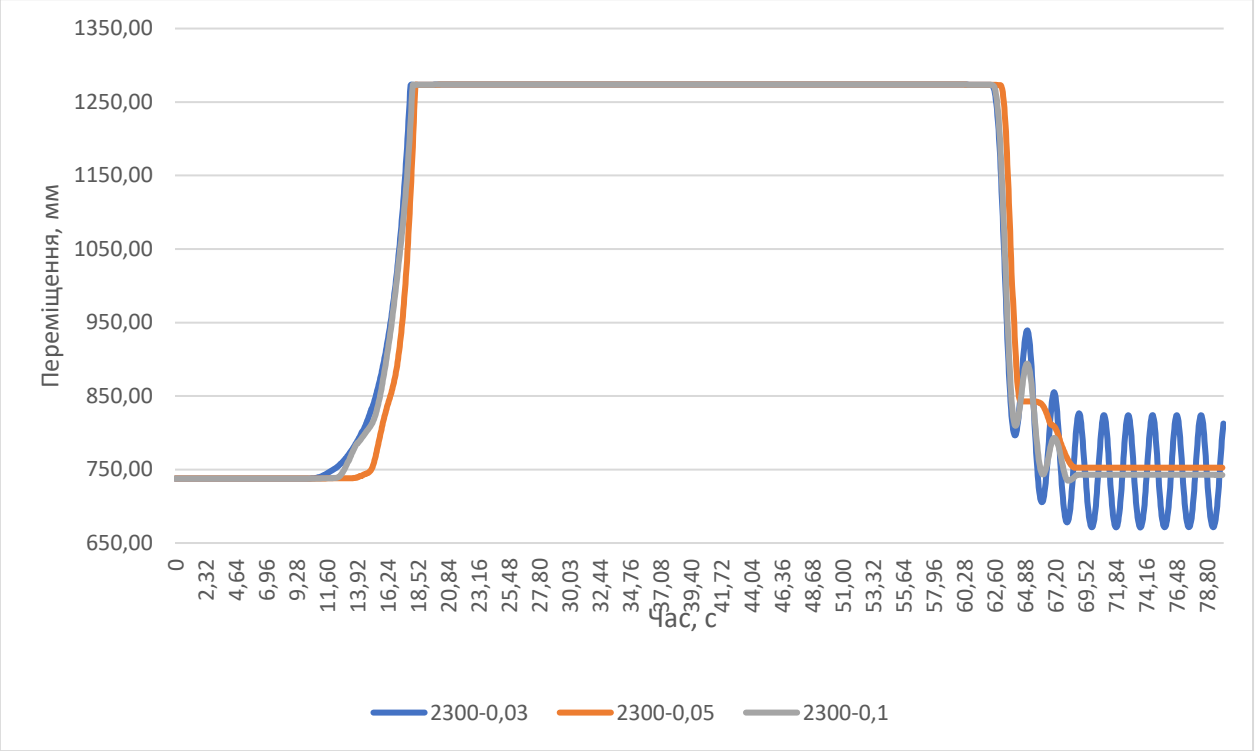
На графіку 3.17 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

- Розгін: Характер кривих не змінився. Можна спостерігати невеликі коливання на початку руху при коефіцієнтах 0,05 та 0,1;
- Рух з усталеною швидкістю: характер ділянки схожий на попередній, ділянка починається та закінчується приблизно в один час для всіх коефіцієнтів.
- Сповільнення: Оскільки третя ділянка при різних коефіцієнтах має кардинально різний вигляд розглядатися вони будуть окремо, нахил кривих має однаковий кут:

  0,03 – Характер кривої не змінився, амплітуда коливань зменшилась на відміну від попереднього досліду;

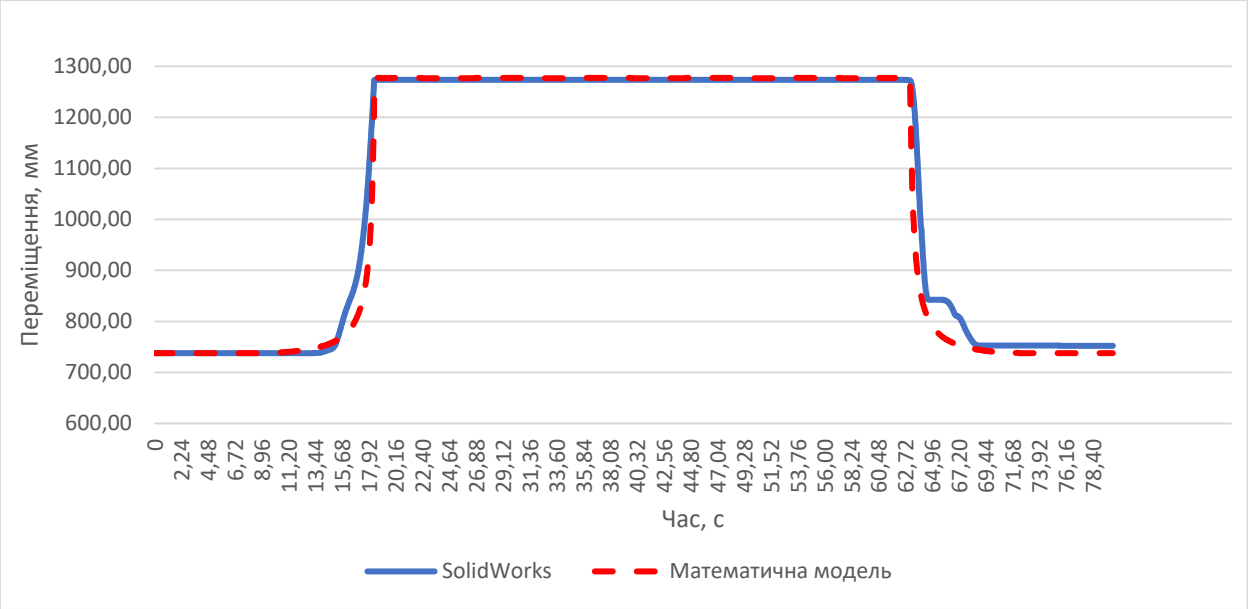
  0,05 – Крива не змінює характеру, спостерігається зменшення амплітуди коливань та збільшення періоду.

0,1 – Крива має схожий характер як і в усіх інших кривих спостерігається зменшення амплітуди.



Граф. 3.17 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 2300Н/м

На графіку 3.12 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 1,35%, найбільша – 15%,



Граф. 3.18 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 2300Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

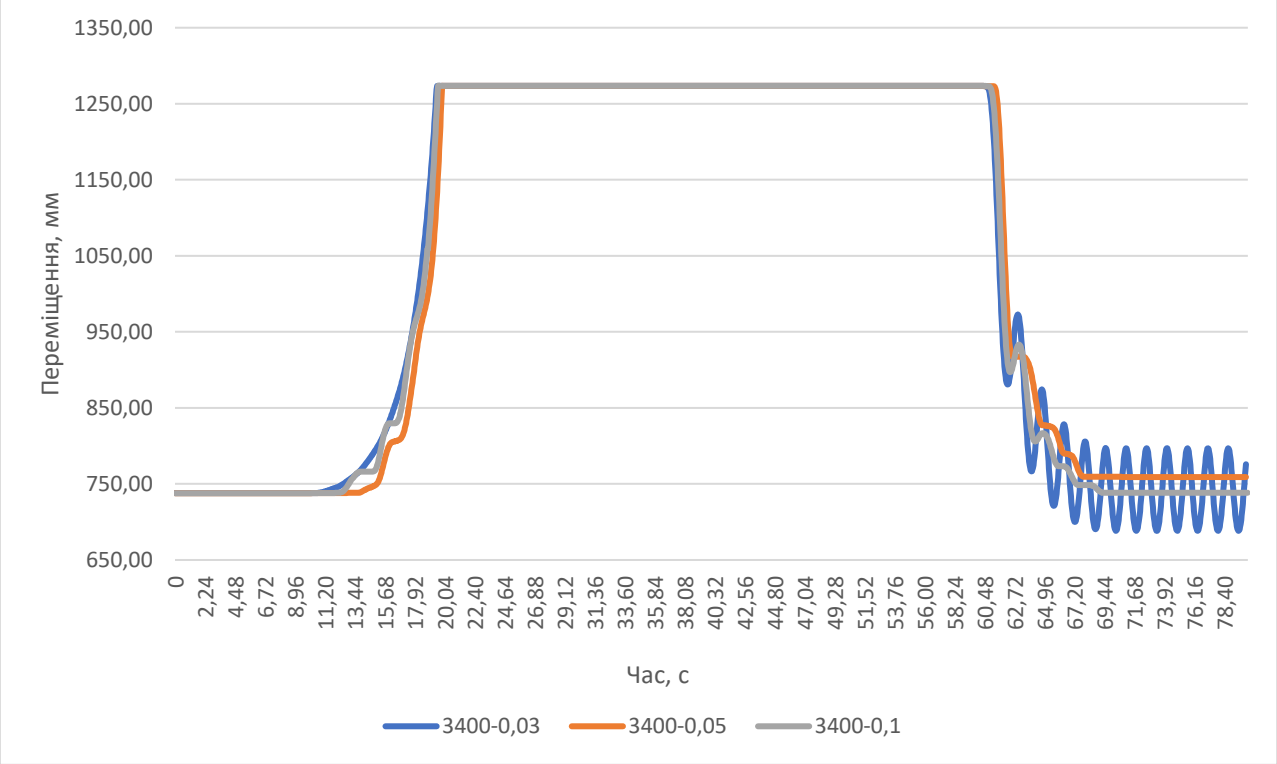
На граф. 3.19 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

- Розгін: Характер кривих не змінився. Можна спостерігати збільшення коливань на початку руху при коефіцієнтах 0,05 та 0,1;
- Рух з усталеною швидкістю: характер ділянки схожий на попередній, ділянка починається та закінчується приблизно в один час для всіх коефіцієнтів.
- Сповільнення: Оскільки третя ділянка при різних коефіцієнтах має кардинально різний вигляд розглядатися вони будуть окремо, нахил кривих має однаковий кут:

  0,03 – Характер кривої не змінився, амплітуда коливань зменшилась на відміну від попереднього досліду;

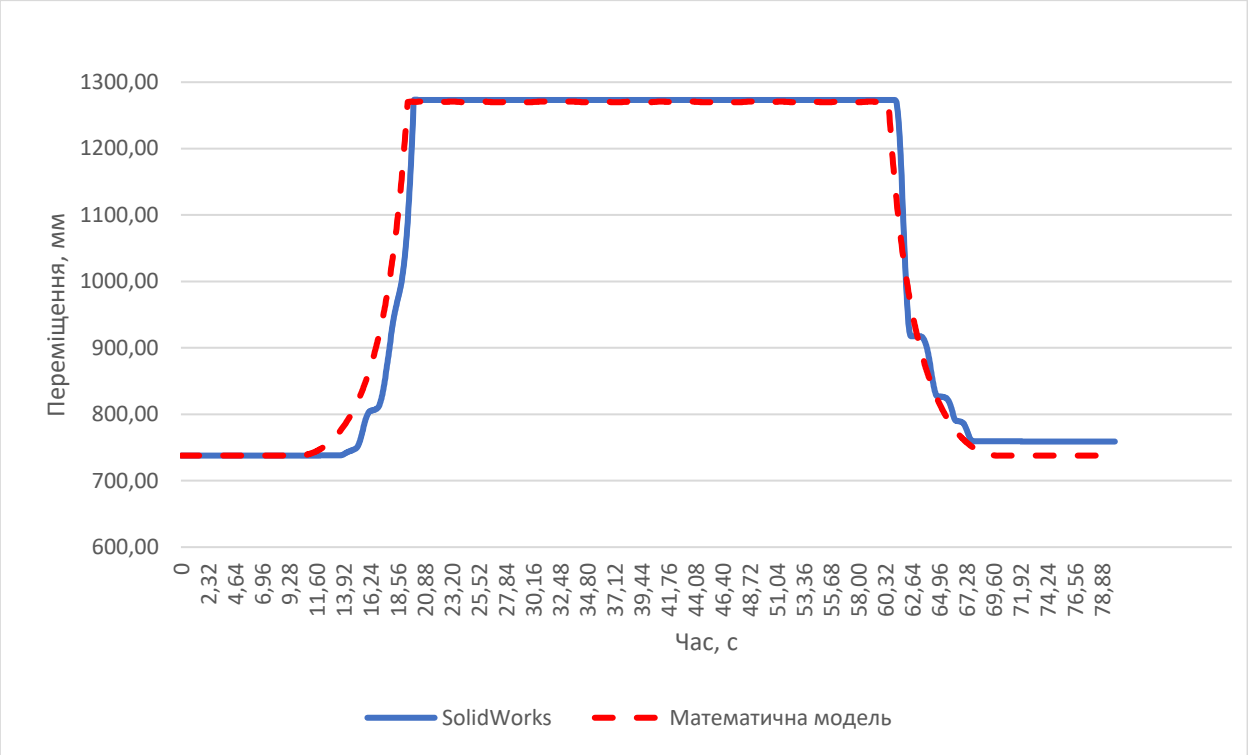
0,05 – Крива не змінює характеру, спостерігається зменшення амплітуди коливань та збільшення періоду. Точка початку коливань піднялась.

0,1 – Крива має схожий характер як і в усіх інших кривих спостерігається зменшення амплітуди та коливання починаються раніше.



Граф. 3.19 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 3400Н/м

На графіку 3.12 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 1,72%, найбільша – 16,9%,

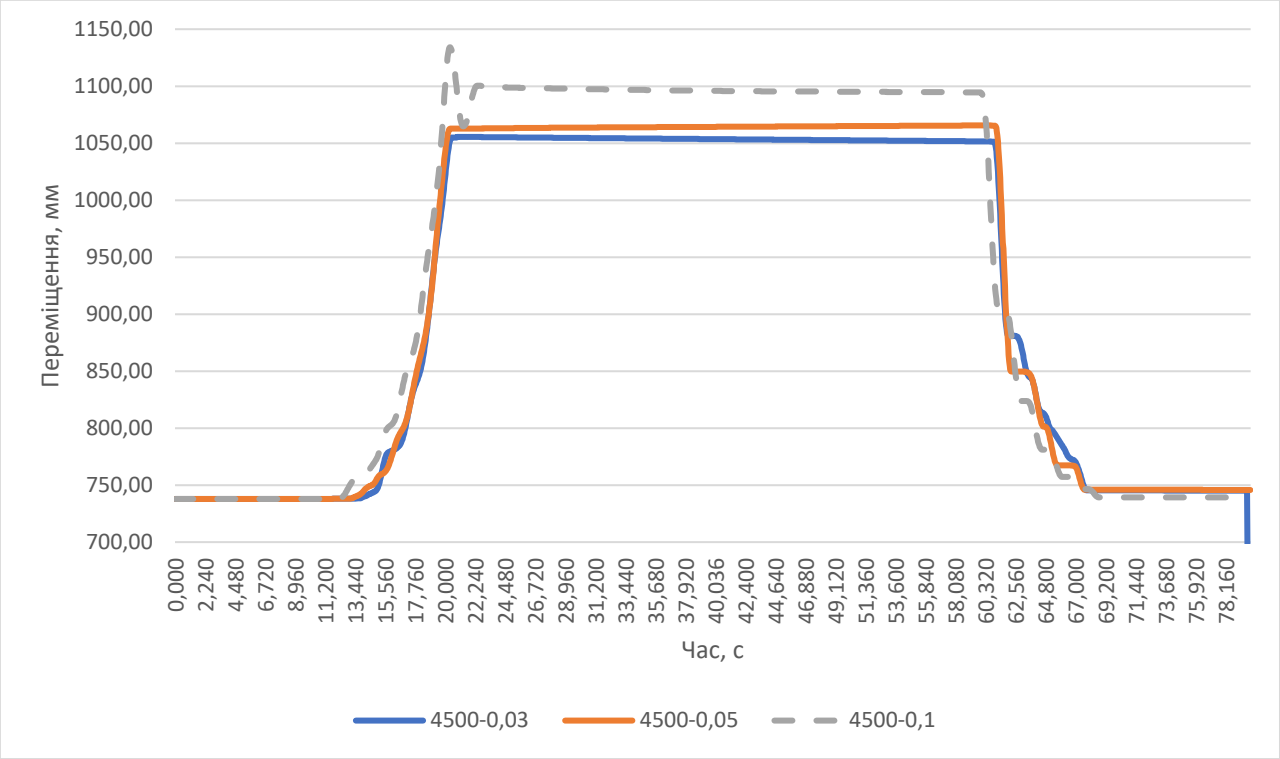


Граф. 3.18 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 3400Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

На граф. 3.19 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

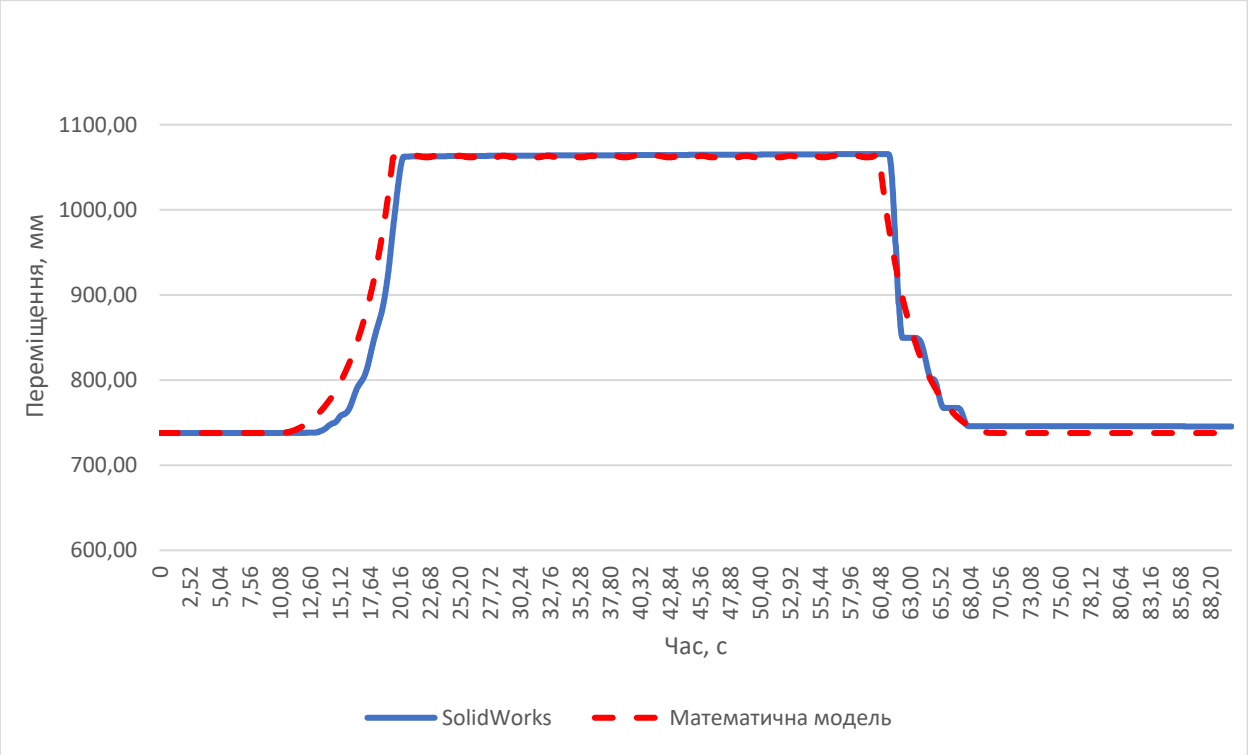
- Розгін: Характер кривих не змінивсяу на протязі усієї ділянки але під кінець можна спостерігати те, що при різних значеннях коефіцієнта тертя вантаж відходить на різну відстань від маточини шківа. Також вантажі перестали торкатися ободу;
- Рух з усталеною швидкістю: Для коефіцієнта 0,1 на початку ділянки можна спостерігати затухаючі коливання також можна спостерігати що ділянка має певний кут нахилу. Для коефіцієнта 0,05 можна спостерігати що ділянка знаходиться під кутом та має невеликі коливання. Для коефіцієнта 0,03 можна спостерігати що ділянка знаходиться майже горизонтально та має незначні коливання;

- Сповільнення: При даній жорсткості пружин можна спостерігати що коливання майже зникли при всіх коефіцієнтах та мають однаковий характер, нахил кривих має однаковий кут.



Граф. 3.19Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 4500Н/м

На графіку 3.12 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 2%, найбільша – 10,035%,

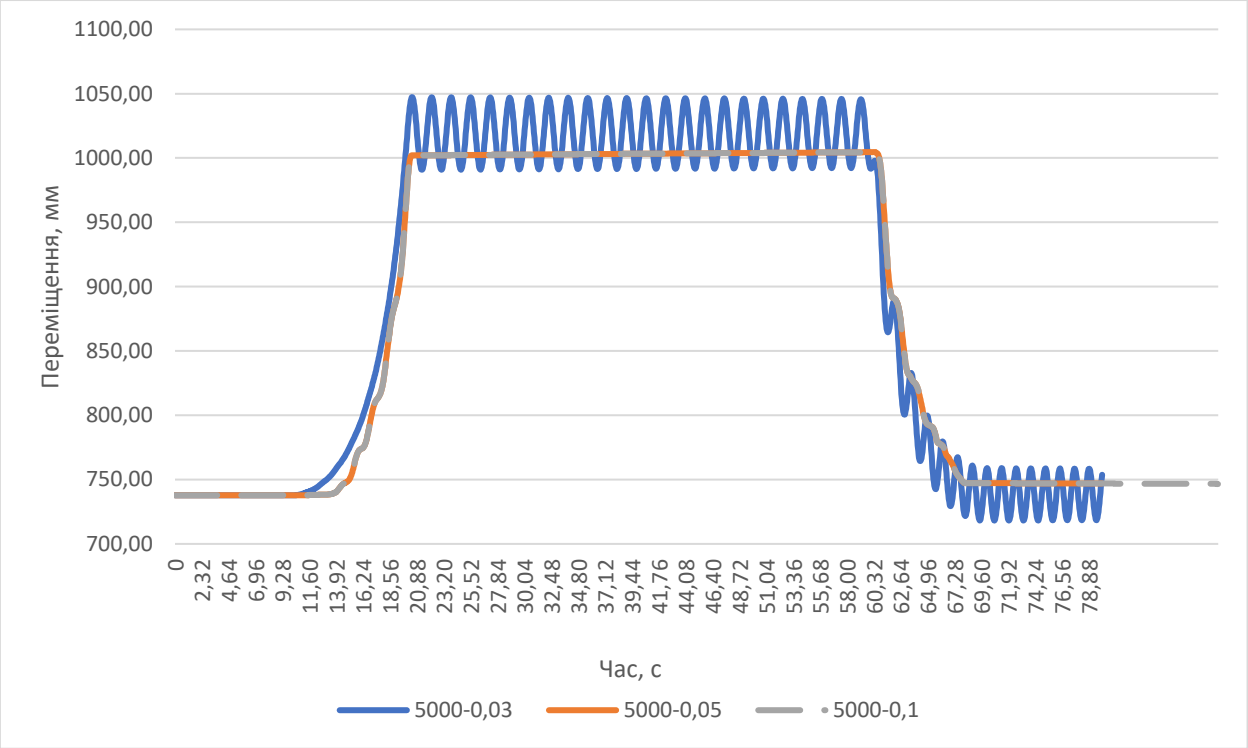


Граф. 3.20 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 4500Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

На граф. 3.21 наведено три кривих котрі для більшої зручності поділимо на три ділянки: розгін, рух з усталеною швидкістю, сповільнення.

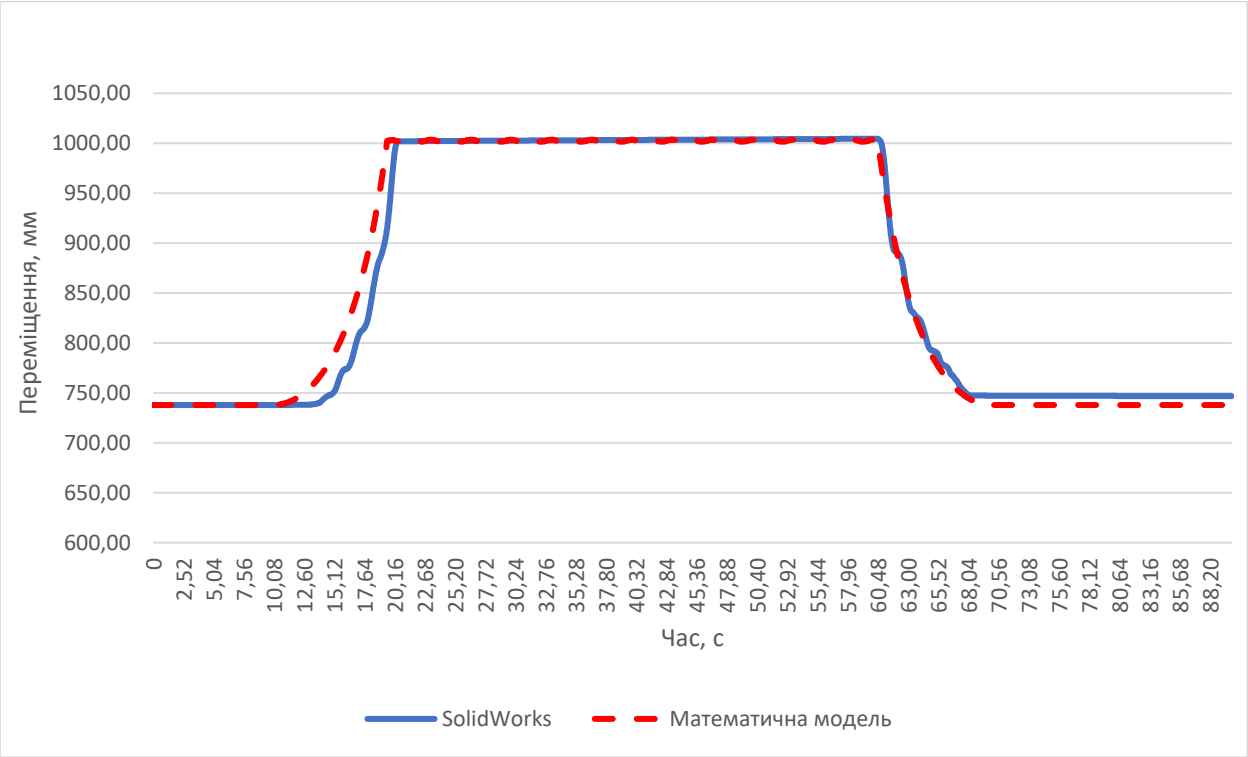
- Розгін: Характер кривих не змінивсяу на протязі усієї ділянки але під кінець можна спостерігати те, що при коефіцієнт 0,03 перша ділянка закінчується при більших значеннях вильоту вантажу. Вантажі продовжують не торкатись ободу;
- Рух з усталеною швидкістю: Для коефіцієнта 0,1 на ділянці можна спостерігати незатухаючі коливання також можна спостерігати що ділянка має певний кут нахилу. Для коефіцієнта 0,05 та 0,03 можна спостерігати що ділянка прямолінійна. Ділянки починаються та закінчуються приблизно однаково;

- Сповільнення: При даній жорсткості пружин та коефіцієнтах 0,1 та 0,05 можна спостерігати що коливання майже зникли при всіх коефіцієнтах та мають однаковий характер, нахил кривих має однаковий кут. Для коефіцієнту 0,03 спостерігаються коливання на протязі усієї ділянки.



Граф. 3.21 Графіки переміщення ватажу з урахуванням коефіцієнтів тертя та при жорсткості пружин 5000Н/м

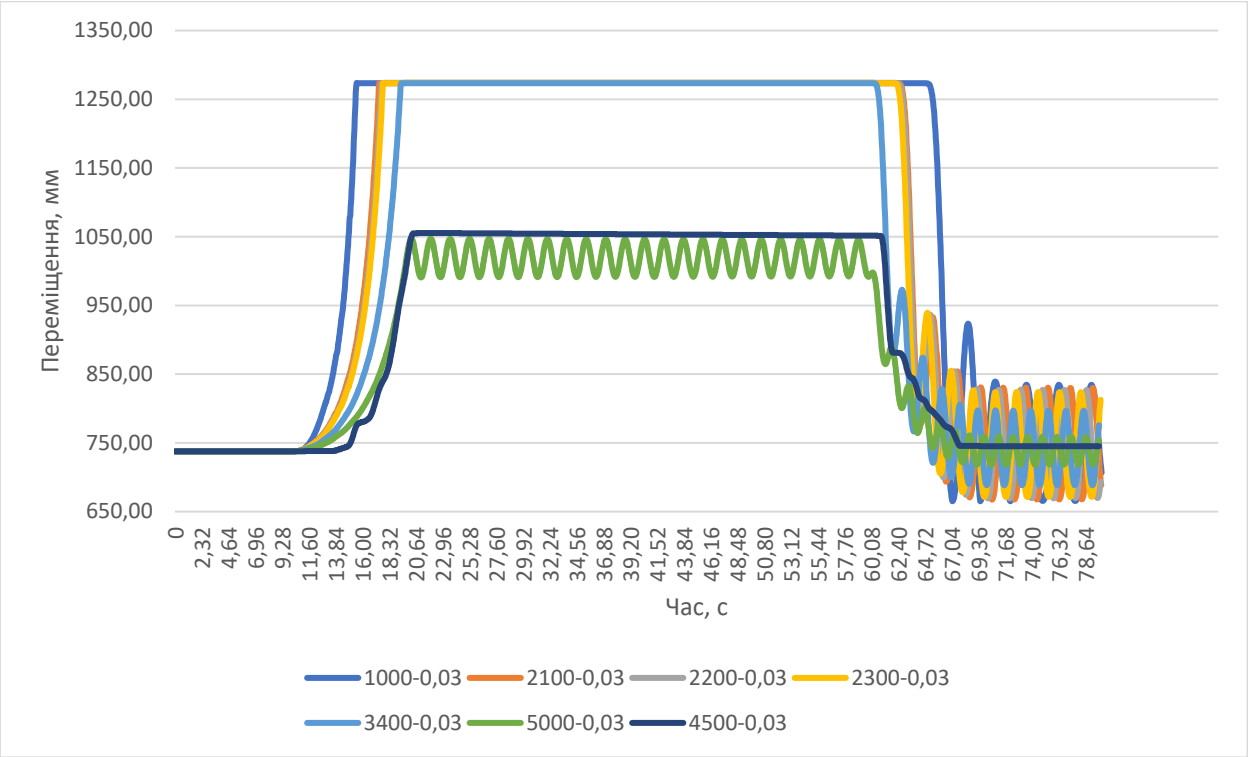
На графіку 3.12 наведено порівняння двох моделей з використанням коефіцієнту тертя – 0,05 , середня похибка досягає 0,89%, найбільша – 9,54%.



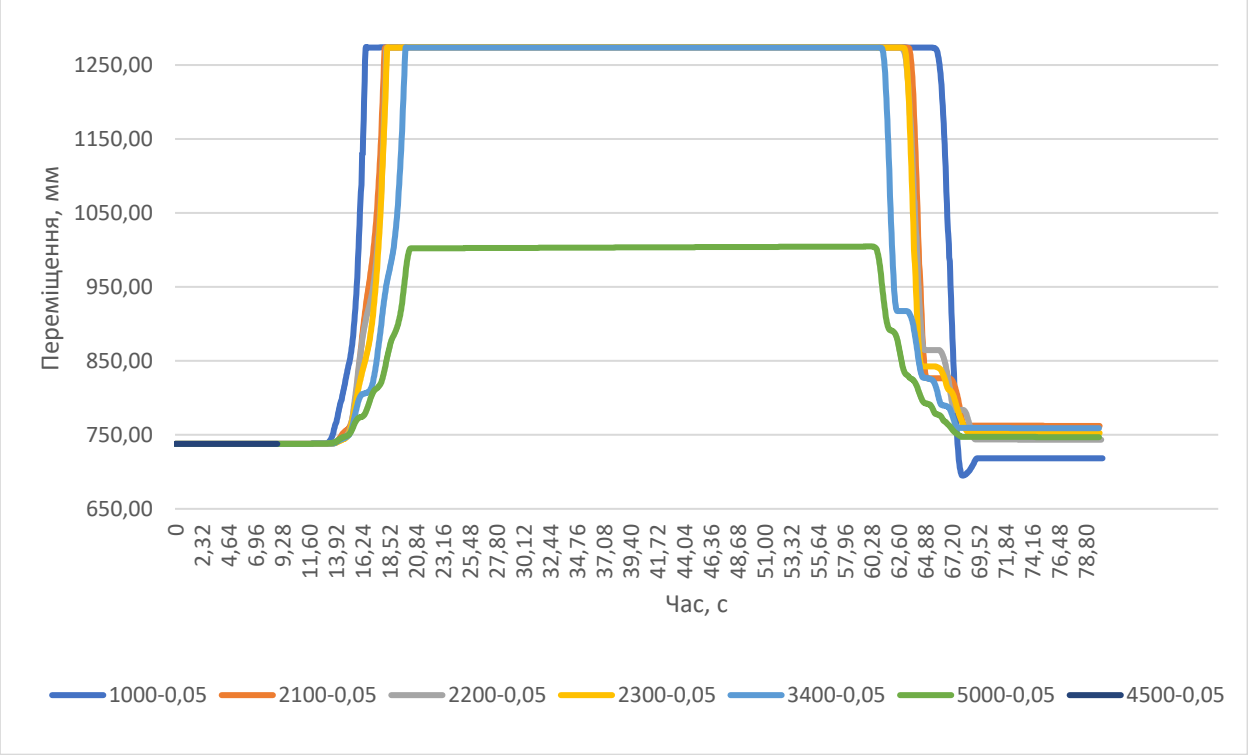
Граф. 3.22 Порівняння математичної моделі з SolidWorks при жорсткості пружин 5000Н/м (коефіцієнт тертя – 0,05)

На графіках 3.23, 3.24, 3.25 приведенні криві з різними жорсткостями пружин вантажів та однаковим коефіцієнтом тертя. В загальному випадку вони відрізняються третьою ділянкою. А саме характером коливань:

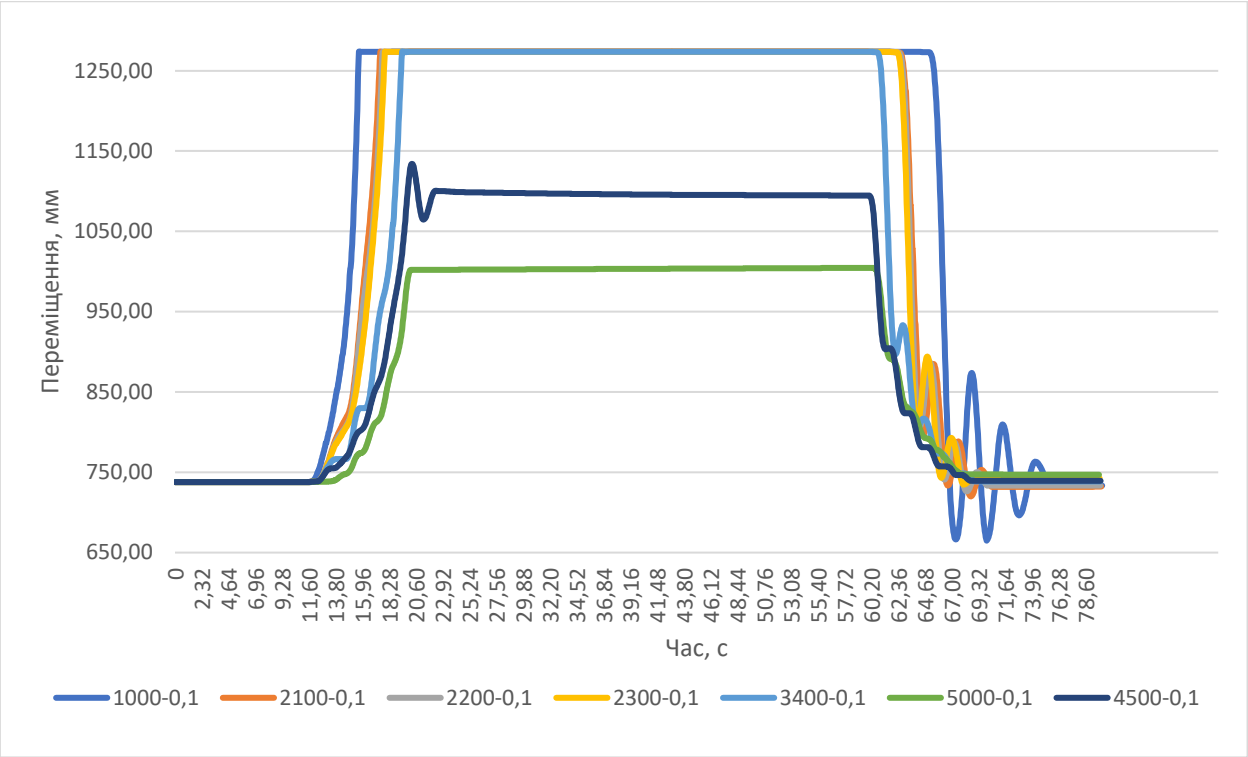
- для коефіцієнта 0,03 – це незатухаючі коливання котрі при збільшенні жорсткості пружин вантажів мають тенденцію починатися раніше.
- для коефіцієнта 0,05 – це затухаючи коливання котрий ймовірно виникають через тертя вантажу об обід і він так би мовити робить переривчасті рухи. При збільшенні жорсткості пружин вантажів мають тенденцію починатися раніше
- для коефіцієнта 0,1 – має яскраво виражені затухаючі коливання. При збільшенні жорсткості пружин вантажів мають тенденцію починатися раніше



Граф. 3.23 Зведений графік для усіх жорсткосте при коефіцієнті тертя 0,03



Граф. 3.24 Зведений графік для усіх жорсткосте при коефіцієнті тертя 0,05



Граф. 3.25 Зведений графік для усіх жорсткосте при коефіцієнті тертя 0,1

3.4 Аналіз результатів

Аналіз проводиться з урахуванням різних значень жорсткості пружин та тертя [14]. Досліджується, як зміна пружних параметрів може впливати на динамічну стабільність системи та частоти власних коливань. Результати аналізу допомагають визначити раціональні значення пружних параметрів для досягнення кращої ефективності та надійності приводу.

Як було сказано дослідження проводились двома методами та поділяються на дві великі підгрупи з урахуванням тертя та без. Дослідження включають два методи [10] отримання графіків руху вантажів це Solid Works Motion та математична модель. В групі досліджень без тертя було використано наступні жорсткості пружин: 1000, 2100, 2200, 2300, 3400, 4000, 4500, 5000, та з тертям були використані ті самі жорсткості та наступні коефіцієнти тертя: 0,03, 0,05, 0,1.

Опираючись на проведені дослідження можна впевнено сказати що дослідження без коефіцієнта тертя не дають реалістичних результатів оскільки в загальному випадку спостерігаються незгасаючі коливання, котрі не можуть бути присутніми в реальному середовищі.

Можна підкреслити доволі точний збіг математичної моделі та середовища SolidWorks менше ніж 5%. Але необхідно підкреслити що експерименти без тертя використовували коригувальні коефіцієнти в розрахунку, тому аби доволі точно передбачати графіки руху вантажу необхідно розрахунки підкріпляти великою базою експерименті та апроксимувати для варіювання параметрів системи.

Опираючись на проведені експерименти з тертям можна зробити наступні висновки: коефіцієнт 0,03 занадто великий оскільки при його використанні незатухаючі коливання не зникають. При до критичних значеннях жорсткості пружини спостерігається занадто швидкий рух вантажів який ймовірніше всього приводитиме до ударних навантажень обода що

негативно вливатиме на динамічні та втомні характеристики шківа. При за критичних жорсткостях спостерігається покращення характеристик приблизно 3400 Н/м, а саме плавність ділянки розгону покращується, вантаж виходить на максимальний виліт, ділянка сповільнення також полога та має меншу частоту коливань. Отже, можна зробити висновок. Що найбільш ідеальною жорсткістю не критична жорсткість, а жорсткість приблизно на 50% більша за критичну.

Найбільш ефективним коефіцієнтом є коефіцієнт 0,05 оскільки при ньому спостерігається найбільш плавна робота шківа без яскраво вироджених коливань.

4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Опираючись на одержані результати, можна надати наступні рекомендації:

- для вибору кращої жорсткості, треба опиратись на таку характеристику, як критична жорсткість. При різних параметрах вантажів шківа та швидкості обертання приводу вона буде набувати різних значень. Проведенні дослідження показали, що жорсткість досягає раціональних значень при значеннях більших критичної жорсткості, приблизно в два рази. Саме при цих значеннях шків набуває кращої плавності ходу та зменшується вплив ударних навантажень на обід шківа.
- Опираючись на проведенні дослідження, кращий коефіцієнт тертя набуває значень 0,05. Оскільки саме при ньому можна спостерігати плавність ходу вантажів та мінімізацію ударних навантажень.

Отже, отримавши такі результати, можна впевнено сказати, що нароблену базу експериментальних даних варто підтверджувати реальною відмаштабованою моделлю. Оскільки під час теоретичних досліджень спостерігається велика кількість статистичних викидів. Але варто зазначити, що математична модель та середовище SolidWorks дають похибку менше 10%, а це дає змогу попередньо з більш-менш задовільною точністю передбачати результати реального експерименту.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи, базуючись на кваліфікаційній роботі [1], була розроблена експериментальна модель у середовищі SolidWorks, а також розроблено математичну модель. У розділі "Теоретичні дослідження динаміки шківа" була висвітлена постановка задачі, побудова приводу, а також розроблено математичну модель.

Експериментальні дослідження динаміки шківа були детально описані в розділі "Експериментальні дослідження". Тут була представлена інформація про експериментальну установку, методику та налаштування досліджень, а також зведені та описані усі графіки, отримані під час експериментів.

У розділі "Рекомендації до застосування результатів досліджень" були сформульовані висновки на основі проведених експериментів, а також надані рекомендації для застосування отриманих результатів.

Отже, на основі проведених досліджень можна впевнено стверджувати, що математична модель та середовище SolidWorks продемонстрували прийнятну точність, де похибка між ними варіюється до 10%. Це є задовільним для попереднього проектування. Однак виявилася потреба в реальних випробуваннях для підтвердження кореляції теоретичних експериментів та реальної установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Кваліфікаційна робота: Двоканатна підвісна вантажна дорога з кільцевим рухом. комплексний проект. імітаційне моделювання динаміки приводу зі шківом змінного моменту інерції; Гроза Є.С. 2022р 56с.
2. Дукельский А. И. Підвісні канатні дороги та кабельні крани. Москва – Ленінград: Машинобудування, 1966. 484 с.
3. Привод машины : пат. 2016292: F16H 25/00. № 4933587/28 ; заявл. 06.03.1991 ; опубл. 15.07.1994.
4. Спосіб збільшення гіроскопічного моменту та пристрій для його здійснення: пат. 2009106963: F16H 33/00. № 2009106963/11 ; заявл. 27.02.2009 ; опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25. 2 с.
5. Спосіб перетворення напрямку та величини кутової швидкості обертання та реверсивна електромеханічна передача: пат. 2451321: F16H33/04. № 2009115402/07 ; заявл. 27.04.2009 ; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14. 6 с.
6. Маховик змінного моменту інерції: пат. 2435084: F16F 15/31. № 2010125545/11 ; заявл. 21.06.2010 ; опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33. 6 с.
7. Маховик : пат. 59946 Україна : F16F 15/30. № u201012559 ; заявл. 25.10.2010 ; опубл. 10.06.2021. Бюл. № 11. 2 с.
8. Маховик : пат. 42107 Україна : F16F 15/30. № u200900044 ; заявл. 05.01.2009 ; опубл. 25.06.2009. Бюл. № 12. 3 с.

9. Привід зі шківом змінного моменту інерції : пат. 100668 Україна : F16F 15/31. № u201412899; заявл. 02.12.2014 ; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 15. 5 с.
10. Дослідження кінематики приводу канатної дороги зі шківом змінного моменту інерції. Гроза Є. С., керівник доц. Куроп'ятник О. С, УДУНТ 2023р.
11. Алямовский А. А. Solidworks Simulation.. СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
12. Пановко Я.Г. Введення в теорію механічних коливань; видання третє 1991р 253с.
13. Козяр М.М., Фещук Ю.В., Парфенюк О.В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks. Україна, Гельветика, 2020р. 252с.
14. Ракша С. В., Горячев Ю. К., Куроп'ятник О. С. Застосування частотних діаграм для вивчення динаміки приводів підвісних канатних доріг. Подъемно-транспортная техника. 2014. № 3 (43). С. 38–53.
15. Довідни по будівельній техніці – режим доступу: https://budtehnika.pp.ua.
16. Учбові Матеріали для студентів і школярів України – режим доступу: http://um.co.ua/14/14-6/14-66241.html.