

Міністерство освіти і науки України  
Луцький національний технічний університет

---

Факультет транспорту та механічної інженерії

---

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

---

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»  
**РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА  
КОРЕКЦІЇ ПЕРЕКОСУ КРАНА ЗА ДОПОМОГОЮ  
Matlab Simulink**

спеціальність 131 Прикладна механіка  
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»  
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ІМ(МОРВС)-42  
Циммербаум Сергій Сергійович

---

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент  
Валецький Богдан Петрович

---

(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.  
к.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
Придальний Борис Іванович

---

(підпис)

Луцьк - 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Перший (бакалаврський) рівень

Освітня програма: «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПМіМ

\_\_\_\_\_ Р. РЕДЬКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЦИММЕРБАУМ Сергія Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема *кваліфікаційної роботи бакалавра*: «Розробка системи визначення та корекції перекосу крана за допомогою Matlab Simulink», керівник роботи Валецький Богдан Петрович доцент, к.т.н. затверджені наказом вищого навчального закладу від «31» грудня 2024 р. № 910/01-07.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 01.06.2025 р
3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація по спеціальних верстатах, креслення вузлів верстатів-аналогів, конструкторська документація, нормативні дані.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Дослідження конструкції кранів, вибір датчиків та схеми системи керування, 2. Технічна частина. 3. Реалізація моделі привода крана в Matlab Simulink. 4. Охорона. Загальні висновки. Список посилань. Додатки
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Ієрархічна та структурна схеми крана – 1 л, Схеми встановлення камер та далекомірів – 1 л., Моделі крана, приводу у Matlab Simulink – 1л, Графіки параметрів моделі – 1л



## АНОТАЦІЯ

ЦИММЕРБАУМ С.С. Розробка системи визначення та корекції перекосу крана за допомогою Matlab Simulink. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

У цій роботі розглядається методика виявлення та коригування перекосу мостового крана шляхом використання зовнішніх датчиків та удосконалення механізму його переміщення. Основною метою дослідження є математичний опис явища перекосу, побудова моделі в середовищі Matlab Simulink, а також розробка системи управління, яка буде коригувати перекіс шляхом змінювання швидкості приводів.

В рамках дослідження було обрано конструкцію мостового крана та визначені його параметри для моделювання в Matlab Simulink. Аналіз літературних джерел дозволив знайти та реалізувати спосіб математичного опису процесу перекосу. На його основі побудована модель руху крана та впроваджена система управління, яка ефективно парирує виникаючий перекіс. Окремо було розроблено експериментальне вимірювальне пристрою та проведено його тестування, що підтвердило працездатність, надійність та стабільність. Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення системи керування та дослідження явища перекосу на різних моделях мостових кранів.

### ПЕРЕКОС КРАНА, МЕХАТРОНІКА, MATLAB SIMULINK

					<i>040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Розробка системи визначення та корекції перекосу крана за допомогою Matlab Simulink</i> <i>Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Циммербаум С.С.</i>					<i>д</i>	<i>з</i>	
<i>Перевірив</i>	<i>Валецький Б.П.</i>					<i>ЛНТУ, ФТІМІ, КАФ. ПМІМ,</i> <i>ГР. ІМ(МОРВС)-42</i>		
<i>Н.контр.</i>	<i>Валецький Б.</i>							
<i>Затв.</i>	<i>Редько Р.Г.</i>							

## ABSTRACT

TSYMMERBAUM S.S. Development of a system for detecting and correcting crane skew using Matlab Simulink. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP "Metalworking equipment and robotic production systems" specialty 131 Applied mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

This work considers the method of detecting and correcting the skew of a bridge crane by using external sensors and improving its movement mechanism. The main purpose of the study is a mathematical description of the skew phenomenon, building a model in the Matlab Simulink environment, as well as developing a control system that will correct the skew by changing the speed of the drives.

As part of the study, the design of a bridge crane was selected and its parameters were determined for modeling in Matlab Simulink. Analysis of literary sources allowed finding and implementing a method for mathematically describing the skew process. On its basis, a crane motion model was built and a control system was implemented that effectively counteracts the arising skew. Separately, an experimental measuring device was developed and its testing was carried out, which confirmed its operability, reliability and stability. The results obtained open up prospects for further improvement of the control system and research into the skew phenomenon on various models of bridge cranes.

CRANE SKEW, MECHATRONICS, MATLAB SIMULINK

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ЗМІСТ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КРАНІВ, ВИБІР ДАТЧИКІВ ТА СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	8
1.1 Пристрої та конструкція крана.....	8
1.2 Загальна конструкція мостового крана.....	8
1.3 Датчики.....	12
1.4 Впровадження системи у кран.....	16
Висновок до розділу 1.....	21
РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	22
2.1 Визначення можливих перекосів.....	22
2.2 Розрахунковий опис крана в Matlab.....	24
2.2 Моделювання приводу.....	28
Висновки до 2 розділу.....	32
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ПРИВОДА КРАНА В MATLAB SIMULINK.....	33
3.1 Модель приводу.....	33
3.2 Модель крана.....	34
3.3 Система керування.....	39
3.4 Моделювання всієї системи.....	41
Висновок до розділу 3.....	43
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища.....	44
4.2 План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій в цеху.....	46
4.3 Засоби захисту від ураження електричним струмом.....	47
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

									Арк.
									6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ				

## ВСТУП

Мостові крани та вантажопідйомні механізми різних типів використовуються у світі вже кілька століть. Сучасна промисловість немислима без мостового крана як основного засобу транспортування матеріалів. Вони широко застосовуються в металургії, будівництві та транспортній сфері, знаходячи своє місце в портах, на заводах, виробничих цехах і складах. Простота конструкції, різноманітність характеристик і універсальність забезпечують стабільний попит на ці механізми протягом століть.

Однією з ключових проблем у конструкції мостових кранів є контроль перекосу несучої металоконструкції під час руху рейковими шляхами. Це явище має безліч причин: нерівномірне зношування коліс, дефекти рейок, нерівності колії, неточне встановлення упорів, відхилення в роботі приводів, а також нерівномірне навантаження кінцевих балок крана. Наслідки такого перекосу можуть бути різними – від поступового зношування деталей ходового механізму до катастрофічного руйнування крана через накопичені втомні пошкодження металоконструкції.

Колеса мостових кранів бувають двобортними або однобортними. При виникненні перекосу реборди починають тертися об рейки, що спричиняє їхній знос і підвищене навантаження через тертя, що, у свою чергу, ще більше поглиблює перекіс балки. У найкращому випадку колеса й рейки поступово стиратимуться, у гіршому – можливий схід крана з рейок з подальшим руйнуванням конструкції. Окрім того, збільшене тертя під час руху створює додаткове навантаження на приводи, що може призвести до їхнього передчасного виходу з ладу.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1

# ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ КРАНІВ, ВИБІР ДАТЧИКІВ ТА СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

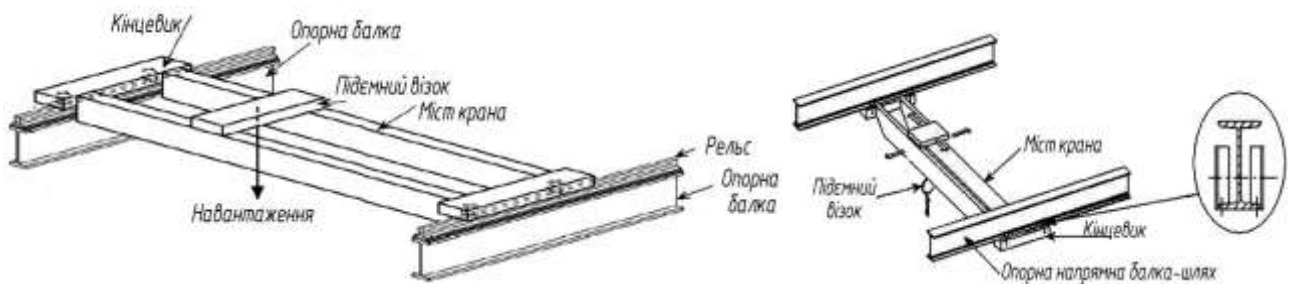
### 1.1 Пристрої та конструкція крана

Крани мостового типу мають схожі конструктивні особливості, але їх виконання може відрізнятися залежно від умов експлуатації на різних підприємствах.

### 1.2 Загальна конструкція мостового крана

Розрізняють три основні типи мостових кранів: підвісний, опорний і козловий. Їх головною відмінністю є розташування несучої балки та напрямних шляхів. У козловому крані напрямні шляхи знаходяться на ґрунті, а несуча балка встановлена на опорах. У мостовому крані напрямні підняті над рівнем землі, і несуча балка переміщується по них. В опорному мостовому крані балка розташована над напрямними шляхами, а в підвісному – під ними.

Пролітні балки мостових кранів можуть виготовлятися з прокатного профілю або бути зварними з різних типів металопрокату. Конструкція мостових кранів передбачає однобалкове та багатобалкове виконання залежно від вимог вантажопідйомності та умов роботи.



а) Опорний мостовий кран

б) Підвісний мостовий кран

Рисунок 1.1 – Види кранів

Рисунок 1.2 містить структурне представлення ієрархії вузлів і компонентів мостового крана, що дозволяє систематично визначити функціональні зв'язки між елементами конструкції [2].

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





Розгін електродвигунів має бути поступовим, оскільки різке прикладення пускового моменту може спричинити пробуксовку ходових коліс на рейках. Ефективне керування роботою мостового крана реалізується за допомогою кількох типів електроапаратури:

1. Релейно-контактна установка – використовується в системах управління кранів, хоча є вже морально застарілою. Попри це, вона залишається в експлуатації, оскільки добре працює при низьких температурах. Недоліками є швидке зношування реборд коліс та підвищене навантаження на електродвигуни. При використанні такого методу двигуни з фазним ротором підключаються через регульовані активні опори (реостати), що поступово збільшує пусковий момент до необхідного рівня.
2. Дросельно-пускове обладнання – більш технологічне рішення, що використовує три однофазні котушки з сердечником, які включаються в роторну мережу асинхронного двигуна. Такі котушки мають активно-індуктивний опір, величина якого залежить від частоти струму в роторній мережі.
3. Частотний перетворювач – найсучасніше рішення для управління приводами крана, що забезпечує плавний розгін і гальмування, а також точне регулювання швидкості. Загальна схема роботи частотного перетворювача включає такі етапи:
  - Вхідний каскад випрямляє синусоїдальну напругу, що подається від мережі.
  - Після згладжування за допомогою індуктивно-ємнісного фільтра отримане напруження живить керований інвертор.
  - Інвертор формує імпульсний сигнал відповідно до команд цифрового управління.
  - Імпульсний сигнал створює синусоїдальні струми в обмотках статора, забезпечуючи необхідний режим роботи електродвигуна.

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ				

### 1.3 Датчики

Розроблювана система повинна містити певні датчики, які забезпечуватимуть отримання даних про положення крана в просторі та передачу їх керуючому вузлу.

Попередня оцінка. Для реєстрації положення балки відносно напрямних шляхів можуть застосовуватися такі пристрої:

- камери,
- лідари,
- ультразвукові датчики,
- лазерні далекоміри.

З погляду економічної доцільності використання лідара є досить затратним. Останнім часом з'явилися твердотільні лідарні датчики, але навіть вони роблять систему дорогою та складною в реалізації. Протилежна ситуація спостерігається з ультразвуковими датчиками — вони дешеві та доступні, але мають малу дальність дії. Оскільки робочий хід крана може перевищувати 300 метрів, застосування ультразвукових датчиків стає неможливим.

Таким чином, з початково розглянутих варіантів залишаються камери та лазерні далекоміри. Вони мають прийнятну вартість і дозволяють забезпечити необхідну точність вимірювань.

Камери. Для спрощення реалізації програмної частини доцільно використовувати камери в поєднанні з маркерами, які можна розпізнавати за допомогою методів сегментації. Це дозволить визначати положення моста крана відносно напрямних шляхів.

Можливі способи використання камер із маркерами:

1. Встановлення двох камер по краях моста крана. Маркери розміщуються на бокових стінах цеху або на колонах, до яких кріпляться напрямні (рис. 1.4, а).

2. Встановлення однієї камери в центрі моста крана та маркерів на одній зі стін уздовж напрямку руху (рис. 1.4, б).

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

3. Встановлення однієї камери в центрі протилежної стіни, а маркерів — на самому мосту крана (рис. 1.4, в).

4. Монтаж камери з системою fish-eye або камери з приводом на стелі цеху над краном. Це забезпечить оцінку положення крана у всьому діапазоні його руху (рис. 1.4, г).

5. Встановлення камери на мосту крана, спрямованої на стелю або на підлогу, де нанесено пряму лінію, паралельну напрямку руху (рис. 4д).

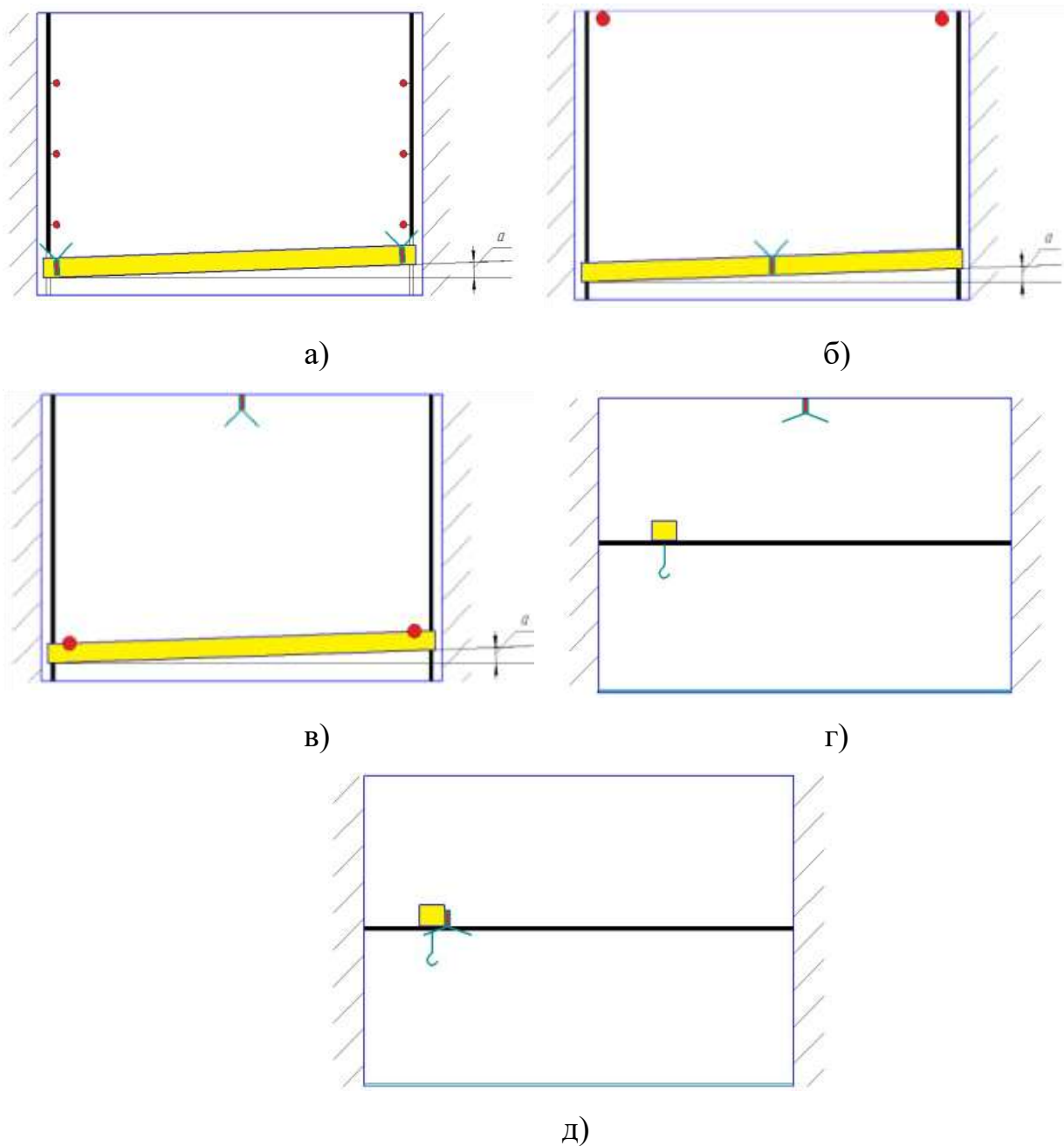


Рисунок 1.4 - Схеми встановлення камер

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Кожен із запропонованих способів має свої переваги та недоліки.

Основний недолік способів, де камера встановлена на крані – передача вібрації від працюючого механізму на оптичну систему, що може знижувати точність вимірювань. Водночас їхній головний плюс – відсутність проблеми передачі даних з камери на рухомий кран, оскільки вся система залишається в межах одного вузла.

Монтаж камери на стелі також має суттєву проблему – складність установки та подальшого технічного обслуговування, що може вимагати додаткових ресурсів та спеціалізованого обладнання.

Оптимальним варіантом з точки зору простоти реалізації програмного забезпечення та встановлення є останній запропонований спосіб (рис. 4д). У цій конфігурації камера оцінює кут відхилення прямої лінії у кадрі від вертикалі, що дозволяє точно визначати положення крана.

Головна проблема такого рішення – труднощі нанесення прямої лінії в умовах промислової будівлі. Вона має бути безперервною, лежати в одній площині та підтримуватися в чистому стані, що може ускладнити експлуатацію.

У всіх випадках для більш точної оцінки положення доцільно використовувати камери із змінним фокусним відстанню або з широким кутом огляду, що допоможе компенсувати можливі похибки у вимірюваннях.

#### Лазерні далекоміри

Широкий вибір та доступність лазерних далекомірів роблять реалізацію системи на їх основі відносно простою. Існує два основних варіанти їх розміщення:

1. Монтаж двох далекомірів по краях несучої балки (рис. 1.5, а).
2. Монтаж двох далекомірів на стіні будівлі вздовж напрямку руху крана (рис. 1.5, б).

У першому випадку лазерні далекоміри вимірюють відстань від точки їх встановлення до передньої стіни, а в другому – від передньої стіни до крана.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Отримуючи різницю між показниками правого та лівого далекоміра, можна визначити кут відхилення балки відносно вектора руху.

При першому варіанті можливі певні труднощі: при значному відхиленні балки лазерний промінь може почати відбиватися не від передньої стіни, а від бічної, що спричинить значні похибки у вимірюваннях. Через це кращим варіантом є другий спосіб встановлення, який забезпечує більш стабільне вимірювання без ризику некоректного відбиття лазерного сигналу.

У будь-якому випадку навпроти лазерного далекоміра повинен знаходитися відбивний екран. Це необхідно для компенсації можливих нерівностей поверхні стіни чи несучої балки крана та забезпечення точності вимірювань.

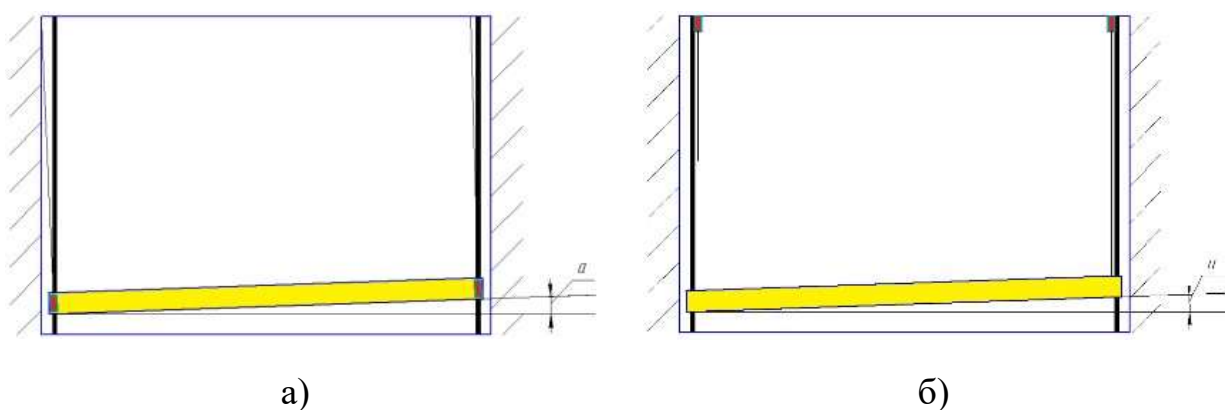


Рисунок 1.5 – Схеми встановлення далекомірів

Вибір датчика. На основі аналізу запропонованих варіантів найбільш надійним способом є встановлення двох лазерних далекомірів на одній зі стін, перпендикулярній до напрямку руху крана. Обов'язковою умовою є використання двох відбивних екранів, що забезпечить точність вимірювань та розрахунків.

Застосування лазерних далекомірів спрощує програмну реалізацію, порівняно з використанням камер. Однак залишається невирішеною проблема передачі розрахункових даних на сам кран, де розташовані приводи.

Похибка вимірювання далекоміра може становити близько двох міліметрів. Це обґрунтовується тим, що стандартний рівень обгону однієї

сторони крана відносно іншої варіюється в межах 10 см, а в окремих випадках, зокрема для мостового крана з гнучкою опорою, обгін може досягати 1,5 м.

Як приклад розглянута модель лазерного далекоміра Dх100 / DL100 Pro від компанії SICK, яка має такі ключові характеристики:

- Діапазон вимірювання: 0,15–300 м, що є достатнім для великого цеху. У разі збільшення розмірів приміщення можна встановити чотири далекоміри на протилежних стінах, що забезпечить максимальне покриття до 600 м.
- Точність:  $\pm 3$  мм.
- Час вимірювання: 1 секунда, що відповідає вимогам системи, оскільки мостові крани працюють повільно та не потребують миттєвої реакції.
- Напруга живлення: 18–30 В постійного струму, тому необхідний перетворювач напруги.
- Інтерфейс передачі даних: Ethernet – забезпечує швидку та надійну передачу інформації до одноплатного комп'ютера, який, можливо, буде використовуватися як ядро системи. Якщо ж у проекті передбачений простий мікроконтролер, доступні моделі з послідовним інтерфейсом зв'язку.
- Робочий температурний діапазон:  $-20$  °С... $+55$  °С. У залежності від умов експлуатації можливо знадобиться використання далекомірів із охолоджуваним корпусом або системою обігріву для розширення температурного діапазону роботи.

#### 1.4 Впровадження системи у кран

Система, що розробляється, повинна доповнювати функціонал існуючої системи управління крана, а не замінювати її. Структурна схема доповненої системи крана набуває вигляду, представленого на рисунку 1.6.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

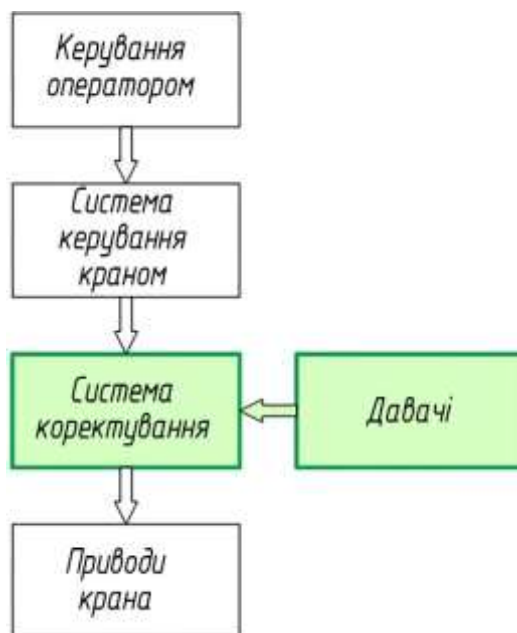


Рисунок 1.6 – Структурна система крана

Структура розроблюваної системи. На схемі зеленим кольором позначена розроблювана система, що складається з лазерних далекомірів та керуючої плати. У процесі роботи коригувальна система отримує керуючі сигнали від основного керування крана, при необхідності змінює їх та передає безпосередньо до приводів. Така схема залишається актуальною незалежно від способу управління приводами крана.

В статті [4] описано аналогічний метод синхронізації роботи системи крана з системою визначення його положення у просторі на основі лазерних далекомірів.

Типи управління приводами мостового крана. Як зазначено раніше, існує три основних способи керування приводами мостового крана. Нижче розглядаються всі три методи та можливі варіанти підключення до них розроблюваної системи:

1. Релейно-контактне управління – інтегрувати запропоновану систему до такої схеми досить просто. Будь-яке реле має керуючий контакт, який отримує сигнал управління. У такому випадку всі керуючі сигнали, що надходять до релейно-контактної установки, спершу обробляються контролером, який

отримує команди від оператора крана, аналізує показники датчиків та передає скориговані сигнали до системи керування.

2. Дросельно-пускове обладнання – тут регулювання швидкості здійснюється через тиристорний регулятор, підключений до роторної схеми. Змінюючи кут включення тиристорів, можна керувати швидкістю приводів. Запропонована система встановлюється між пультом управління та двигуном, отримуючи вихідні команди від оператора, аналізуючи дані з датчиків та надсилаючи оптимізовані сигнали управління.

3. Частотні перетворювачі – їхня інтеграція до системи також є досить простою. Сучасні частотні перетворювачі підтримують аналогові входи та цифрові інтерфейси зв'язку, наприклад RS-485. У цьому випадку, ймовірно, знадобиться розробка перетворювача інтерфейсів для сумісності контролера з частотним перетворювачем.

Розміщення датчиків. Найкращим варіантом для встановлення датчиків є тупикові упори крана. Це обґрунтовується тим, що при точному налаштуванні крана тупикові упори позиціонуються так, щоб при контакті з ними кран встановлювався у нульове положення, тобто точно перпендикулярно напрямним шляхам.

Для коректної роботи лазерних датчиків необхідно встановити відбивні екрани на самому крані, у точках, куди падають лазерні промені.

Прокладання зв'язку між контролерами. Однією з проблем, що потребує рішення залежно від конструкції крана, є прокладання кабелю зв'язку між контролером, який зчитує дані з датчиків, та контролером, що знаходиться на самому крані та коригує управління.

Це є складністю, оскільки на деяких кранах немає гнучких кабелів живлення та зв'язку, а електроживлення здійснюється лише через контактні рейки, з яких струмознімачі крана отримують електроенергію. Для таких випадків може знадобитися розробка бездротового каналу зв'язку або альтернативне рішення для передачі керуючих сигналів.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## Орієнтовний алгоритм роботи системи

Загальна структура алгоритму роботи системи представлена на рисунку 9. Система функціонує циклічно та працює безперервно.

Виняток становить тривала зупинка крана. Якщо протягом значного часу система управління не надсилає керуючих сигналів, а датчики не фіксують суттєвих змін положення, система переходить у режим сну.

Ця логіка дозволяє мінімізувати навантаження на обчислювальні ресурси та уникнути зайвої обробки даних у періоди бездіяльності механізму.

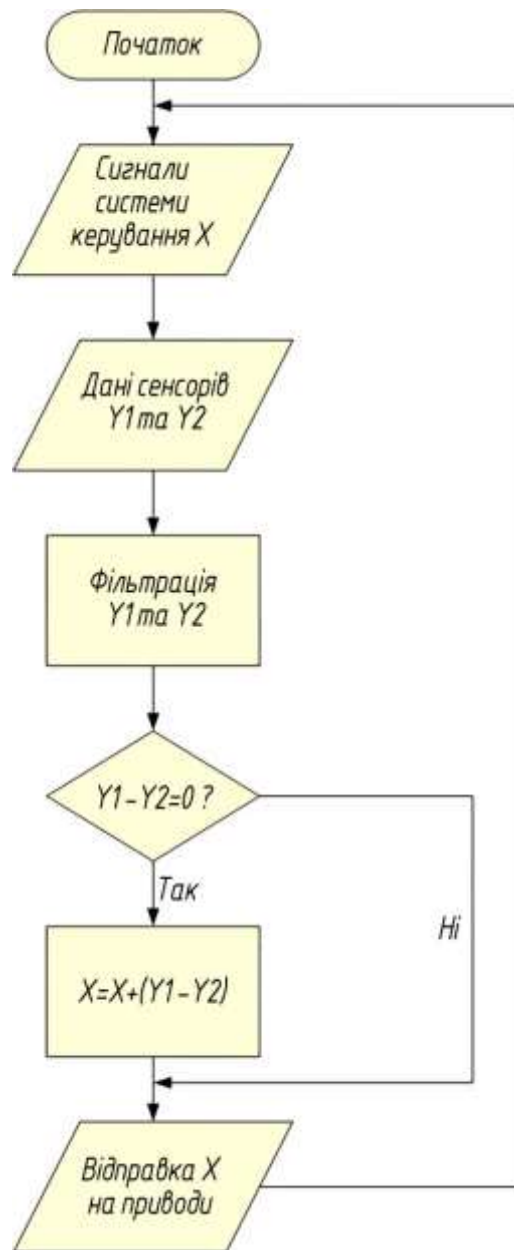


Рисунок 1.7 – Спрощений алгоритм роботи системи

Орієнтовний алгоритм роботи системи. Розроблена система спочатку приймає керуючий сигнал (X) від системи керування краном. Далі вона отримує дані датчиків (Y1 і Y2) та виконує їх фільтрацію. Після обробки значень система розраховує різницю показників двох датчиків, визначаючи відхилення балки.

На основі отриманих даних оновлюється керуючий сигнал (X) з урахуванням коригуючих впливів, після чого оновлений сигнал передається до приводів. Якщо різниця між Y1 та Y2 наближається до нуля, це означає відсутність перекосу, тому система передає вихідний керуючий сигнал без змін.

Оскільки система працює постійно та контролює положення крана в режимі реального часу, її алгоритм не має кінцевої точки.

Проблема інерції крана. Основним викликом при реалізації алгоритму є інерція руху крана.

Наприклад, у разі релейного керування при коригуванні перекосу в ланцюзі одного з приводів активується опір меншого номіналу, що призводить до прискорення двигуна. Відключення цього прискорення є складним моментом:

- Після завершення корекції одна сторона крана буде рухатися швидше, і швидкість його вирівнюється не миттєво.
- Якщо відключати прискорення при вирівнюванні, через певний час з'явиться перекіс у протилежну сторону через інерцію, оскільки одна частина крана почне обганяти іншу.
- Розрахувати оптимальний час відключення навіть для конкретного крана є складно, оскільки після завантаження крану його маса змінюється, що впливає на динаміку руху.
- Положення вантажу може бути нецентрованим, а зміщеним праворуч чи ліворуч, що створює нерівномірну інерцію для різних сторін крана.
- Необхідно враховувати сили опору руху, які можуть змінюватися залежно від умов роботи механізму.

Рішення проблеми інерції

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Подібні труднощі можна мінімізувати шляхом впровадження додаткових датчиків, які враховують динаміку навантаження:

- Датчик навантаження на привод лебідки – дозволяє оцінювати корисну масу вантажу, що переноситься краном.
- Лазерний далекомір або енкодер – допомагають визначати положення вантажної каретки з лебідкою крана, що враховує нерівномірний розподіл маси по несучій балці.

Основи грубого математичного моделювання та оцінка сил опору руху крана розглянуті в статті [7]. У роботі тих же авторів [8] описано математичне моделювання мостового крана з релейним керуванням.

### Висновок до розділу 1

Запропоновану систему можна впровадити в майже будь-яку модель крана. Для підвищення точності роботи доцільно додати додатковий набір датчиків, які враховують вагу вантажу та його положення. Однак у рамках цього дослідження розглядаються лише датчики, що контролюють положення самого крана.

Проблема перекосу мостових кранів є вкрай поширеною та актуальною практично у 100% випадків. Її вирішення можливе лише для кранів з роздільним приводом. Найбільш ефективною буде робота з кранами, керованими через частотні перетворювачі, оскільки вони забезпечують гнучке та плавне регулювання руху.

Оптимальними датчиками для запропонованої системи є лазерні далекоміри. Їх монтаж, експлуатація та програмна інтеграція значно простіші порівняно з камерами чи лідарами. Вони ідеально підходять для використання в цехах із мостовими кранами, оскільки не залежать від умов навколишнього середовища. Крім того, лазерні далекоміри можна встановлювати на відкритих майданчиках, де вони також будуть ефективними.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Визначення можливих перекосів

Для аналізу та моделювання перекосу крана проведено огляд ринку мостових кранів з метою пошуку виробника, який надає детальні технічні характеристики моделей у відкритому доступі.

За результатами аналізу обрано компанію Stahl Crane Systems, яка пропонує достатньо повні технічні дані щодо своїх кранів.

Як базовий зразок для моделювання було обрано кран, основні технічні параметри якого наведені в таблиці 2.1 [9].

Таблиця 2.1 - Основні технічні характеристики крана

Вантажопідйомність	16000 кг
Вага крана	4300 кг
Довжина прольоту крана	15000 мм
Максимальна швидкість	40 м/хв
Діаметр коліс	315 мм

Детальні характеристики вибраної моделі крана описані в каталозі компанії [9]. Враховуючи технічні параметри виробника та особливості проектування мостових кранів, представлені в джерелах [3] та [10], визначено всі необхідні параметри для моделювання крана, зокрема:

- Ширина коліс і реборд,
- Габарити та тип рейкових напрямних,
- Інші конструктивні особливості.

Очевидно, що чим більший кран, тим на більше значення одна його сторона може випередити іншу.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## Приблизний розрахунок можливого відхилення

Для проведення розрахунку необхідні такі параметри:

- Проліт моста – 15 м ( $L_k$ ),
- Ширина бази (міжосьова відстань коліс) – 2500 мм ( $A_k$ ),
- Діаметр колеса – 315 мм ( $D_k$ ),
- Діаметр реборди – 345 мм ( $D_{РБ}$ ),
- Ширина колеса – 64 мм ( $H_k$ ),
- Ширина реборди – 20 мм ( $H_{РБ}$ ),
- Ширина рейки – 50 мм ( $H_R$ ).

На рисунку 2.1 представлена схема, що ілюструє розташування коліс і реборд.

Ширина коліс завжди підбирається так, щоб реборди не терлися об рейку. Якщо колесо щільно притиснути однією ребордою до рейки, утворюється зазор 14 мм.

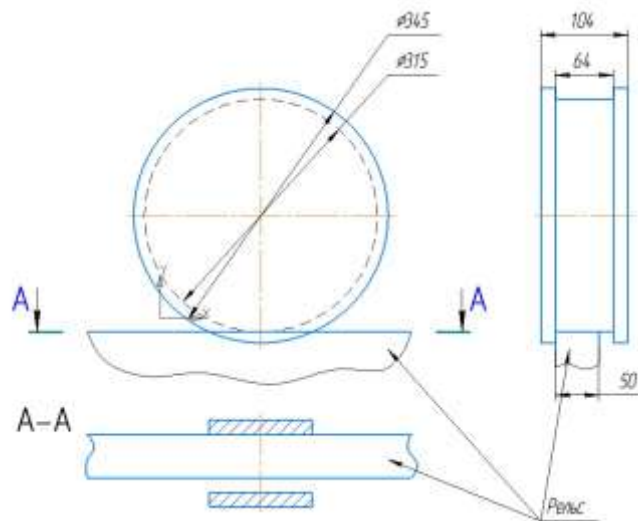


Рисунок 2.1 - Схема розрахунку перекосу

Отже, максимально можливий перекіс при вказаних параметрах буде досягнутий лише тоді, коли переднє колесо торкатиметься рейки правою ребордою, а заднє – лівою, як це виглядає на рисунку 2.2.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



Рисунок 2.2 – Зміщення коліс щодо рейки внаслідок перекосу крана

На основі геометричних перетворень виходить формула (2), за якою можна розрахувати максимальну теоретичну величину перекосу крана:

$$\Delta = L_K \cdot \sin \operatorname{atan} \left( \frac{H_K - H_P}{A_K + \sqrt{\left(\frac{D_{PB}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_K}{2}\right)^2}} \right) \quad (2)$$

Підставляючи значення у формулу (2), отримуємо максимальне теоретичне відхилення близьке 79 мм. Однак у реальних умовах величина може бути більшою, оскільки з часом колеса та рейки зношуються, що призводить до поступової зміни їх геометричних параметрів.

Внаслідок цього наростаюча виробка може посилювати ефект перекосу, що потребує додаткового аналізу та, за можливості, коригування системи компенсації відхилення.

## 2.2 Розрахунковий опис крана в Matlab

Реалізація системи управління в Matlab. Для впровадження системи управління в Matlab необхідно створити математичну модель крана, яка відповідатиме заданим технічним параметрам.

Основні характеристики моделі були закодовані у скрипті Matlab, який наведений у Додатку А.

Схема задачі візуалізована на рис. 2.3, де представлена структура моделювання та взаємодія елементів системи.

									Арк.
									24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ				



Таким чином, лагранжіан системи буде дорівнювати повній кінетичній енергії, що визначається формулою (4). Вона включає: енергію прямолінійного руху крана та вантажу, енергію обертання самого крана, енергію обертання корисного вантажу.

$$T = \frac{mV^2}{2} + \frac{J_{кр}\omega^2}{2} + \frac{J_{гр}\omega^2}{2}$$

Для визначення моментів інерції крана та корисного вантажу необхідно знати положення центру мас системи.

Центр мас розраховується за формулою (5), яка залежить від розташування вантажу на крані:

$$CM = \frac{L_{кр}}{2} + \frac{X - \frac{L_{кр}}{2}}{1 + \frac{m_{кр}}{m_{гр}}} \quad (5)$$

де:  $L_{кр}$  – довжина прольоту крана;

$X$  - положення вантажу щодо лівого краю крана;

$m_{кр}$  - маса крана;  $m_{гр}$  - маса вантажу.

Оскільки положення вантажу може змінюватися, це впливає на динаміку руху крана та його момент інерції, що необхідно враховувати в моделюванні.

Момент інерції обертання крана щодо центру мас можна розглядати як суму двох моментів інерції, що обертаються навколо осі обертання двох стрижнів. Тоді момент інерції обертання крана щодо центру мас набуде вигляду, представленого у формулі (6):

$$\begin{aligned} J_{кр} &= \frac{1}{3} \left( m_{кр} \frac{CM}{L_{кр}} \right) CM^2 + \frac{1}{3} \left( m_{кр} \left( 1 - \frac{CM}{L_{кр}} \right) \right) (L_{кр} - CM)^2 = \\ &= \frac{1}{3} m_{кр} (3CM^2 + L_{кр}^2 - 3L_{кр}CM) \end{aligned} \quad (6)$$

Момент інерції обертання корисного вантажу розглядається як обертання матеріальної точки навколо осі обертання, що обчислюється за формулою (7):

$$J_{гр} = mr^2 = m_{гр}(CM - X)^2 \quad (7)$$

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Тому:

$$T = \frac{(m_{кр} + m_{гр})\dot{x}^2}{2} + \frac{m_{кр}(3CM^2 + L_{кр}^2 - 3L_{кр}CM)\dot{\alpha}^2}{6} + \frac{m_{гр}(CM - X)^2\dot{\alpha}^2}{2} \quad (8)$$

Як узагальнені координати в цій моделі використовуються:

Координата крана  $x$ , що визначає його положення вздовж напрямку руху.

Кут відхилення крана  $\alpha$  від перпендикуляра до вектора руху.

Згідно з другим законом Ньютона, можна визначити силу тяги приводів, що діють на кран, за формулою (9):

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = mR \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

де  $m$  - маса, що переміщується приводом,

$R$  – радіус колеса,

$\omega$  – швидкість обертання колеса.

Ця формула дозволяє оцінити динаміку руху та визначити необхідні коригувальні впливи для компенсації перекоосу.

Таким чином, узагальнена сила для координати  $x$  набуває вигляду, представленого у формулі (10):

$$Q_1 = R_k \cos \alpha \left( \left( \frac{m_{кр}}{2} + m_{гр} \frac{L_{кр} - CM}{L_{кр}} \right) \frac{d\omega_1}{dt} + \left( \frac{m_{кр}}{2} + m_{гр} \frac{CM}{L_{кр}} \right) \frac{d\omega_2}{dt} \right) \quad (10)$$

На обертання крана впливають неоднакові значення крутних моментів, що створюються приводами та спрямовані назустріч один одному.

Ця залежність дозволяє оцінити вплив асиметрії приводів на перекіс крана та визначити необхідні коригувальні дії для стабілізації його руху.

$$Q_2 = R_k \left( CM \left( \frac{m_{кр}}{2} + m_{гр} \frac{L_{кр} - CM}{L_{кр}} \right) \frac{d\omega_1}{dt} - (L_{кр} - CM) \left( \frac{m_{кр}}{2} + m_{гр} \frac{CM}{L_{кр}} \right) \frac{d\omega_2}{dt} \right) \quad (11)$$

						040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
							27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



При моделюванні в Matlab необхідно обмежувати максимальну швидкість приводу залежно від координати положення вантажу та його маси.

Оскільки в досліджуваній моделі двигуни встановлюються з частотним перетворювачем, з точки зору керування та механічної характеристики їх можна розглядати як двигуни постійного струму із жорсткою механічною характеристикою.

Двигуни постійного струму моделюються через аперіодичні ланки другого порядку, що складається з двох послідовних аперіодичних ланок першого порядку. Перша відображає електромагнітні властивості, а друга відображає механічні характеристики.

Однак через векторне керування частотним перетворювачем можна не враховувати електромагнітні характеристики, оскільки знайти точні електромагнітні параметри приводів, що є в крані, дуже складно.

Отже, модель двигуна зводиться до аперіодичного ланки першого порядку, доповненого ПД-регулятором із негативним зворотним зв'язком по швидкості.

Для побудови механічної характеристики двигуна АІР63В4 необхідно врахувати його основні параметри, представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна АІР63В4

Параметр	Позначення	Значення
Потужність, кВт	$P$	0,33
Коефіцієнт потужності	$K_p$	0,76
Відношення максимального моменту до номінального	$h$	2,2
Синхронна швидкість, об/мхв	$n_0$	1500
Швидкість при номінальному моменті, об/хв	$n_H$	1325

Оскільки каталог компанії Stahl Crane Systems [16] містить неповні дані для розрахунку механічної характеристики приводів, було підібрано аналогічний асинхронний двигун російського виробництва зі схожими параметрами. Цей вибір дозволяє отримати відсутні параметри, необхідні для моделювання.

Для коректного моделювання залежності максимальної швидкості приводу від моменту навантаження, необхідно побудувати механічну характеристику цього двигуна, що враховуватиме його динамічні властивості у реальних умовах експлуатації.

$$M_H = 9,55 \frac{P}{n_H} = 2,66 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_H} = 0,116, \quad (14)$$

$$M_K = hM_H = 5,86 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (15)$$

$$S_K = S_H \cdot (h + \sqrt{h^2 - 1}) = 0,485. \quad (16)$$

Для побудови механічної характеристики використовується вектор значень ковзання двигуна, який визначається формулою (17).

Цей вектор починається з нульового значення, що відповідає синхронному режиму роботи, і закінчується критичним ковзанням, при якому двигун досягає максимального моменту перед зупинкою.

$$S = \left( 0 \quad \frac{S_H}{2} \quad S_H \quad 0,2 \quad 0,3 \quad 0,4 \quad S_K \right) \quad (17)$$

Вектори моменту та швидкості обертання обчислюються за формулами (18) та (19):

$$M_i = \frac{2M_K}{\frac{S_i + S_K}{S_K + S_i}} \quad (18)$$

$$n_i = n_0(1 - S_i) \quad (19)$$

Далі, маючи вектор моменту і швидкості обертання двигуна, будується ділянку механічної характеристики, що цікавить, представлений на рис. 14.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

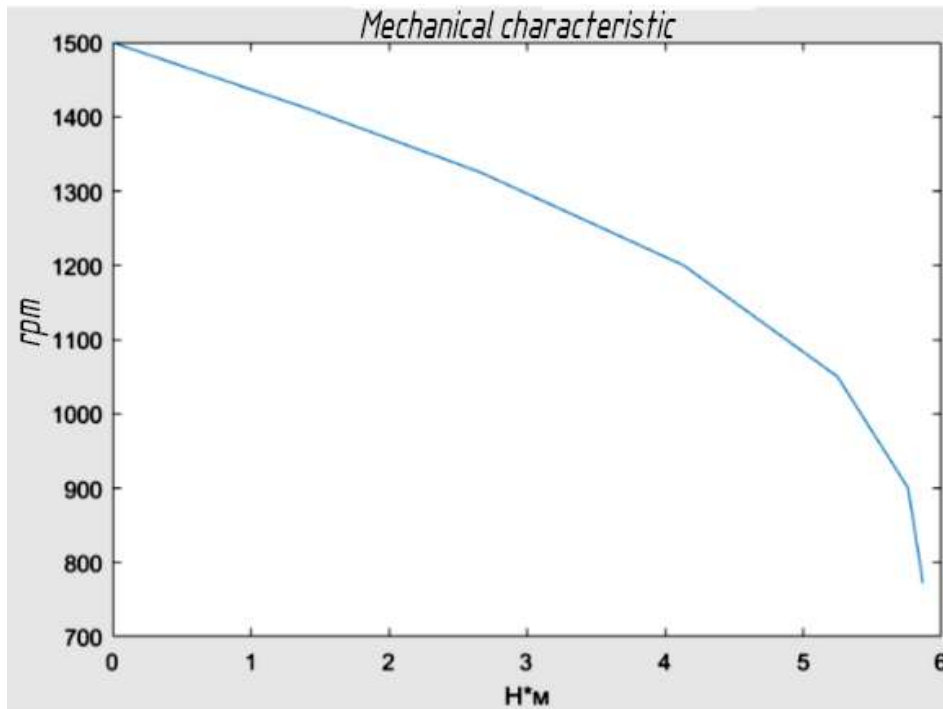


Рисунок 2.5 – Ділянка механічної характеристики

Ділянку швидкостей від 1500 оборотів за хвилину до 1000 вважатимуться прямолінійним і описати його рівнянням прямої з коефіцієнтом нахилу  $kn$  рівним 77,6. Скрипт Matlab, який розраховує механічну характеристику, представлений у Додатку Б. Таким чином, максимальну швидкість двигуна описується формулою (20):

$$\omega_{max} = n_0 - \frac{M_H Z}{M_c k_n} \quad (20)$$

де  $Z$  – передатне число редуктора рівне 6,

$M_c$  – момент опору (навантаження), що діє на привід. У посібнику [17] представлена формула (21) для розрахунку моменту опору, що діє приводи.

$$M_c = (Q + G) \left( k + \frac{fd}{2} \right) k_p \quad (21)$$

де  $Q$  і  $G$  - маси крана та вантажу відповідно, що вимірюються в тонах,

$k$  - коефіцієнт тертя кочення сталевого колеса по рейці,

$f$  - наведений коефіцієнт тертя в підшипниках,

$d$  – діаметр цапфи,

$k_p$  - Коефіцієнт тертя реборд.

Оскільки сили тертя реборд об колеса не враховується, коефіцієнт  $k_p$  приймається рівним одиниці.

#### Висновки до 2 розділу

Для створення математичної моделі та її реалізації у Matlab/Simulink обрана конструкція крана компанії Stahl Crane Systems.

Розрахунки показали, що теоретичне відхилення крана може становити приблизно 79 мм при прольоті 15 метрів.

Розроблена математична модель, яка описує перекис мостового крана.

Для моделювання приводу було підібрано аналог асинхронного двигуна вітчизняного виробництва. Отримано його механічну характеристику, що дозволяє враховувати залежність швидкості обертання валу двигуна від моменту навантаження.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32



були отримані на основі розрахунку моменту навантаження з попереднього розділу.

Для перевірки роботи моделі на максимальній швидкості було подано бажане значення швидкості рівне 0,6 м/с, що відповідає граничній швидкості для обраної моделі крана. У цьому випадку навантаження на привод відсутнє, отже, система досягає заданої швидкості без обмежень, тобто вихідна швидкість не насичується.

Графік перехідного процесу, представлений на рисунку 3.2, демонструє динаміку розгону привода до встановленої швидкості. Він дозволяє візуально оцінити час виходу на усталений режим, характер динаміки (запізнення, перерегулювання, коливання), і якість роботи ПД-регулятора та моделі привода в цілому.

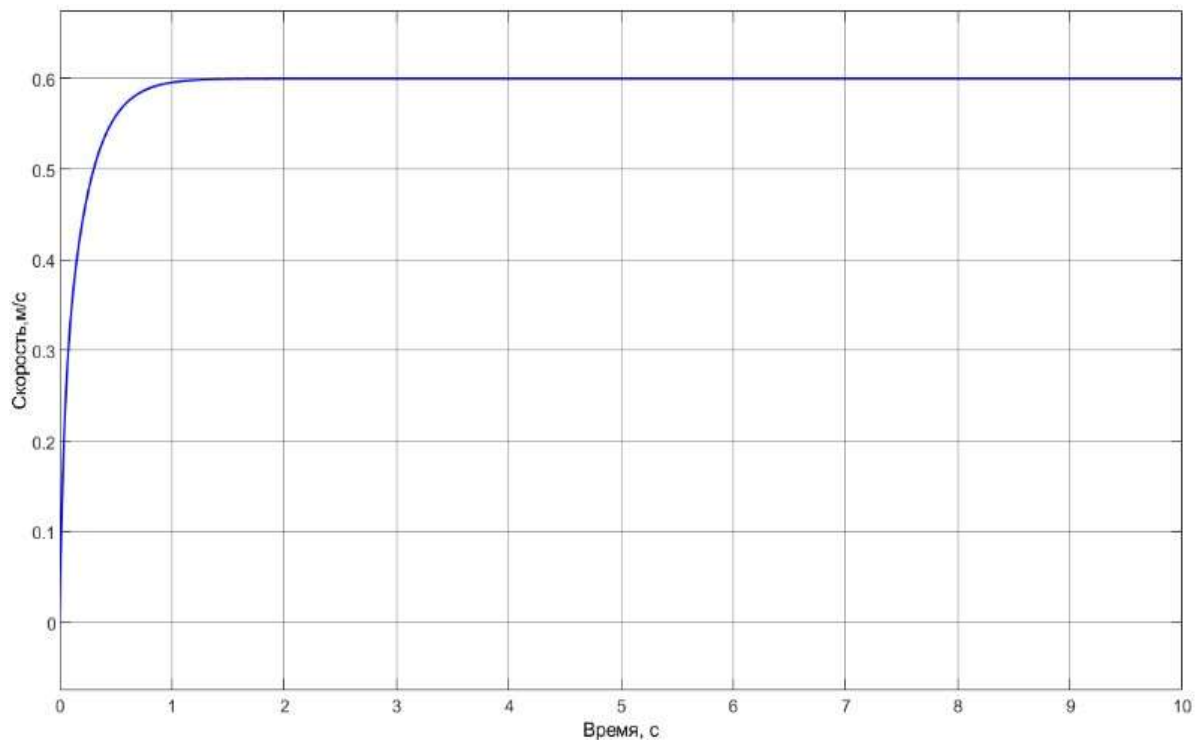


Рисунок 3.2 – Графік перехідного процесу моделі привода

### 3.2 Модель крана

На рисунку 3.3 представлена підсумкова модель крана, розроблена Matlab Simulink.

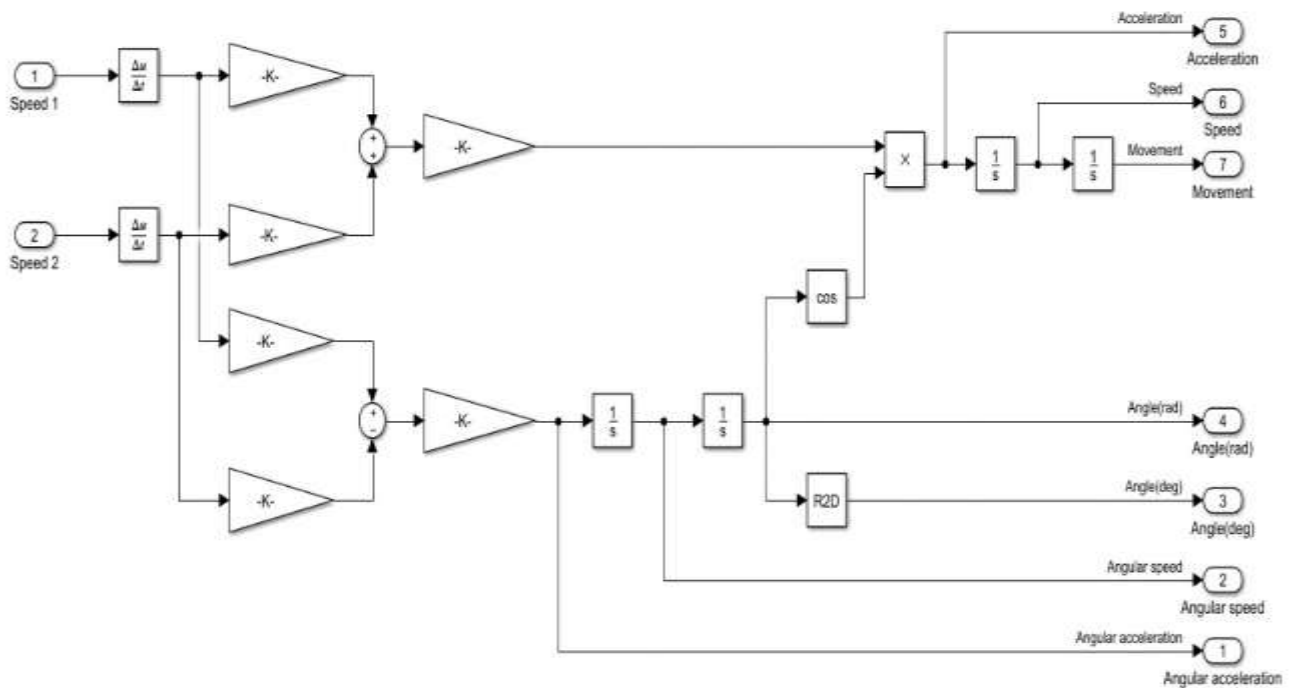


Рисунок 3.3 – Модель крана в Matlab Simulink

На вхід системи подаються лінійні швидкості лівого та правого приводів відповідно. Далі ці значення диференціюються для отримання значень прискорень лівої та правої частин крана. У блоках посилення записані частини рівнянь формули (12). Після блоків посилень виводиться значення лінійного прискорення (у верхній частині схеми) та кутового прискорення обертання крана (у нижній частині схеми). За допомогою блоків інтегрування підсумковими вихідними параметрами моделі є:

- лінійне прискорення центру мас,
- лінійна швидкість центру мас,
- координата положення центру мас,
- кутове прискорення повороту крана навколо центру мас,
- кутова швидкість повороту крана навколо центру мас,
- кут відхилення крана від вектора руху в радіанах,
- кут відхилення крана від вектор руху в градусах.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

В моделі, представленій на рисунку 3.4, реалізовано блок обчислення координат лівої та правої сторін крана, які виступають як вихідні координати всієї системи. Це дозволяє не лише відслідковувати положення крана в цілому, а й визначати рівень перекосу у режимі реального часу, що є критично важливим для контролю та корекції руху.

Для візуалізації динаміки крана було створено просторову модель у середовищі Simscape, показану на рисунку 3.5. Вона дає змогу:

- інтуїтивно спостерігати поведінку системи під навантаженням;
- швидко виявляти аномальні режими руху;
- аналізувати ефективність реалізованих алгоритмів корекції.

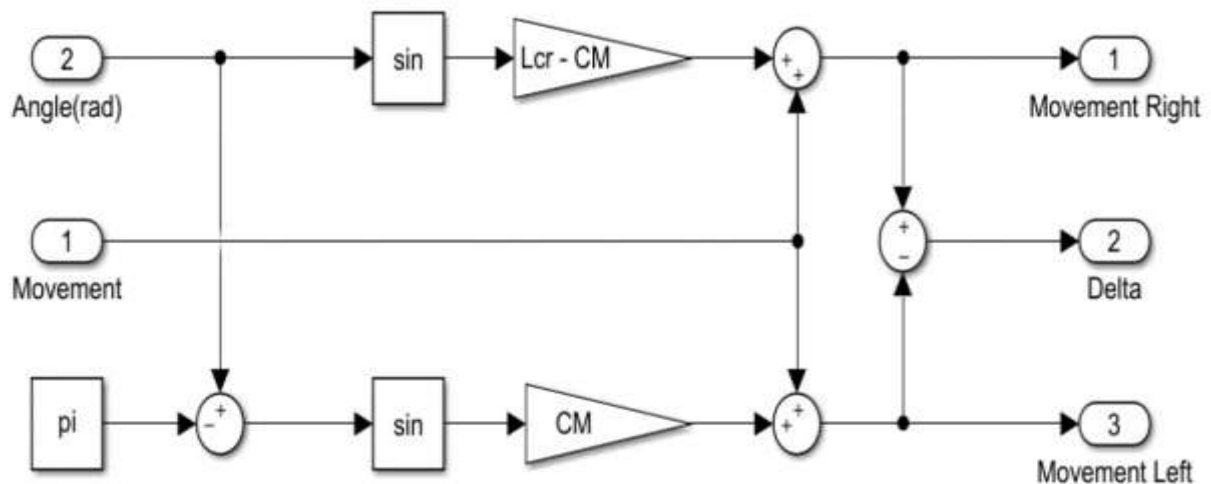


Рисунок 3.4 – Блок розрахунку координат правої та лівої частин крана

Підсумкова модель крана, представлена на рисунку 3.6, об'єднує всі елементи: модель привода, блок обробки сигналів, логіку корекції перекосу та просторову анімацію. Така інтеграція робить систему зручною для тестування, налаштування та валідації перед впровадженням на реальному обладнанні.

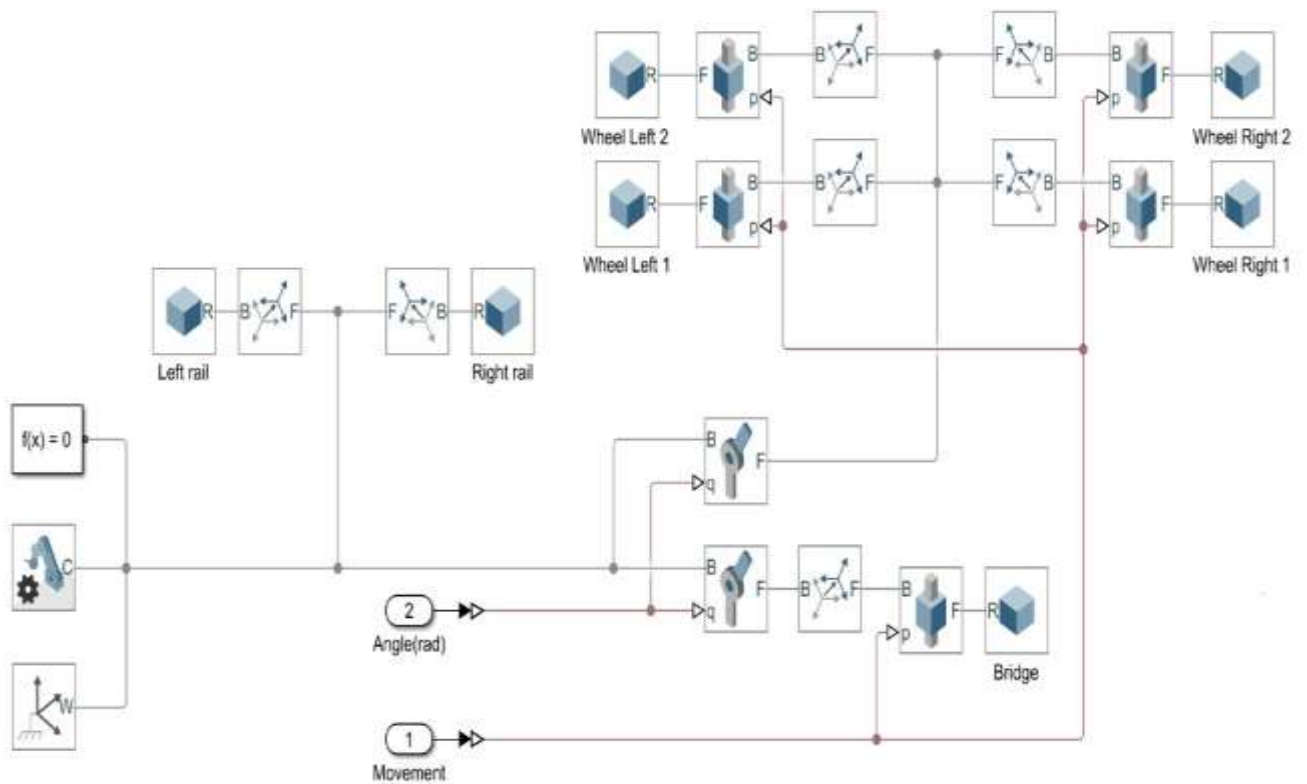


Рисунок 3.5 – Модель крана в пакете Simscare

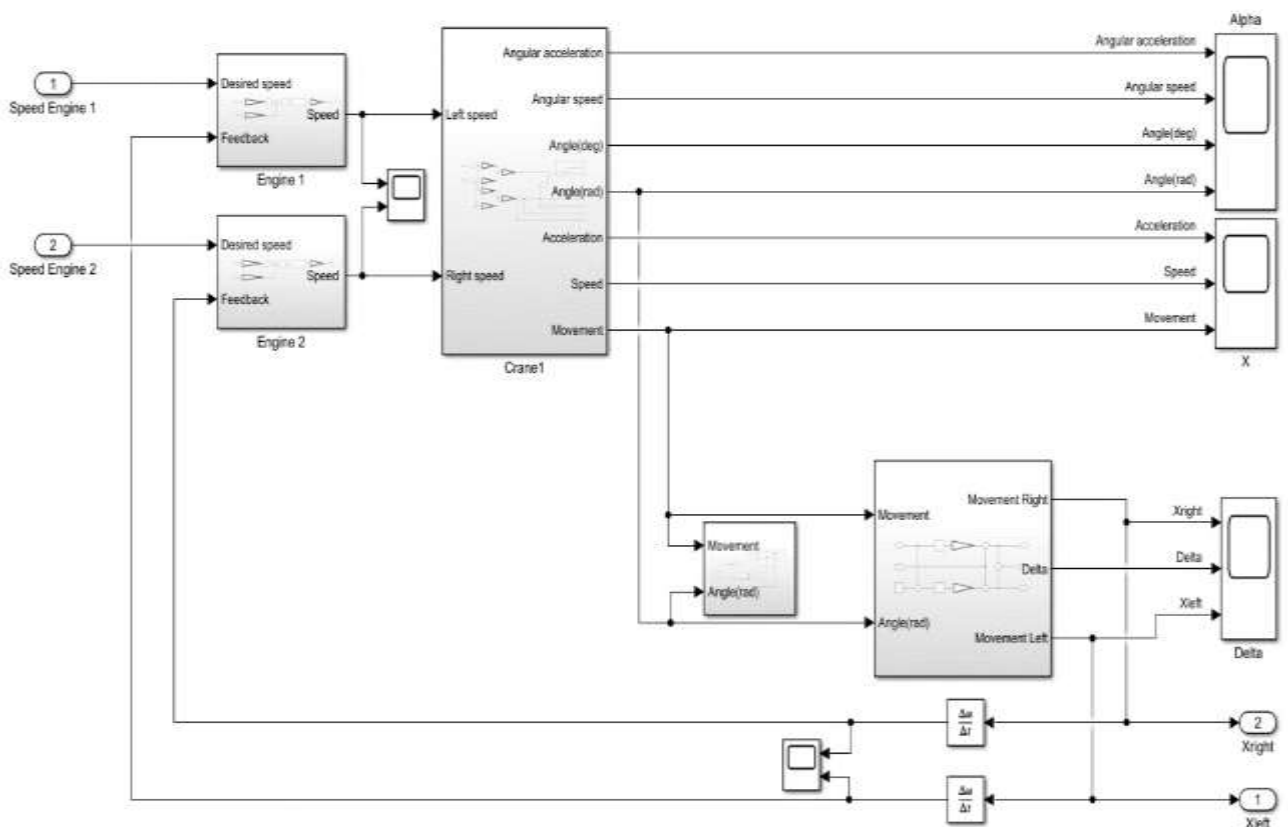


Рисунок 3.6 – Кінцева модель крана в Matlab Simulink

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для валідації моделі та відповідності заданим вимогам було проведено низку експериментів. Нижче на рисунках 3.7 і 3.8 представлені показання графіків моделі з положенням вантажу по центру моста крана і зміщеним у праву частину від напрямку руху відповідно.

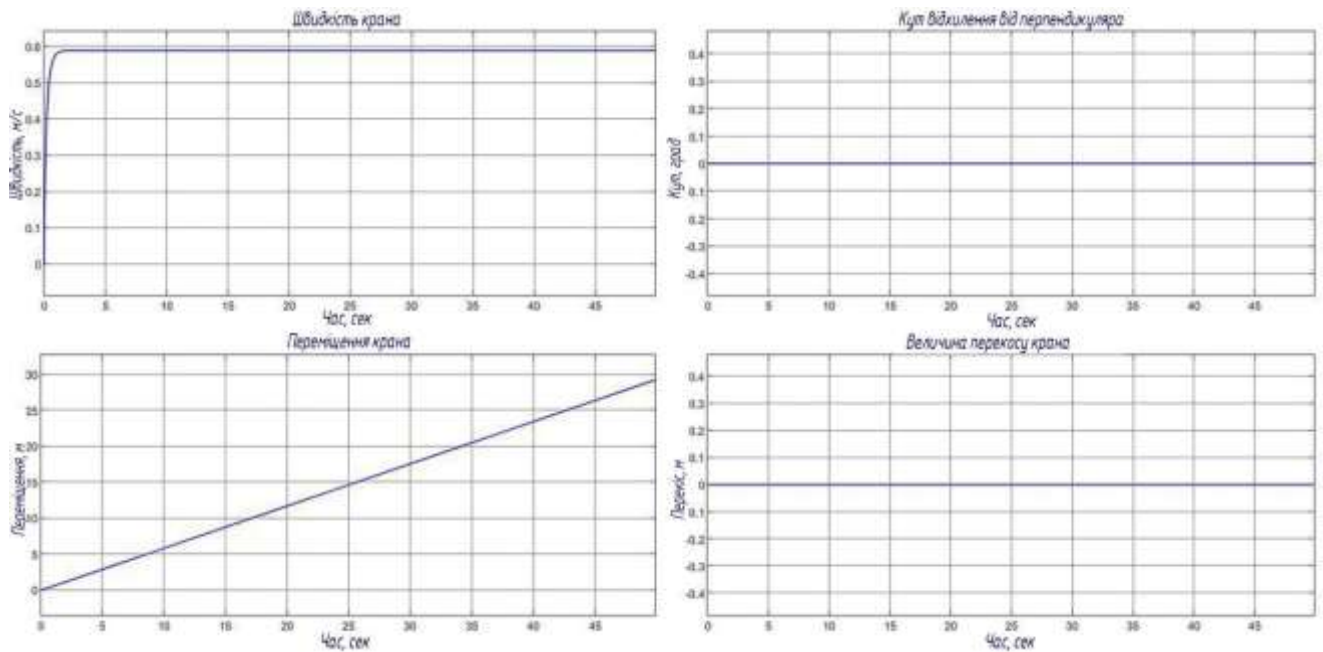


Рисунок 3.7 – Графіки параметрів моделі з вантажем по центру крана

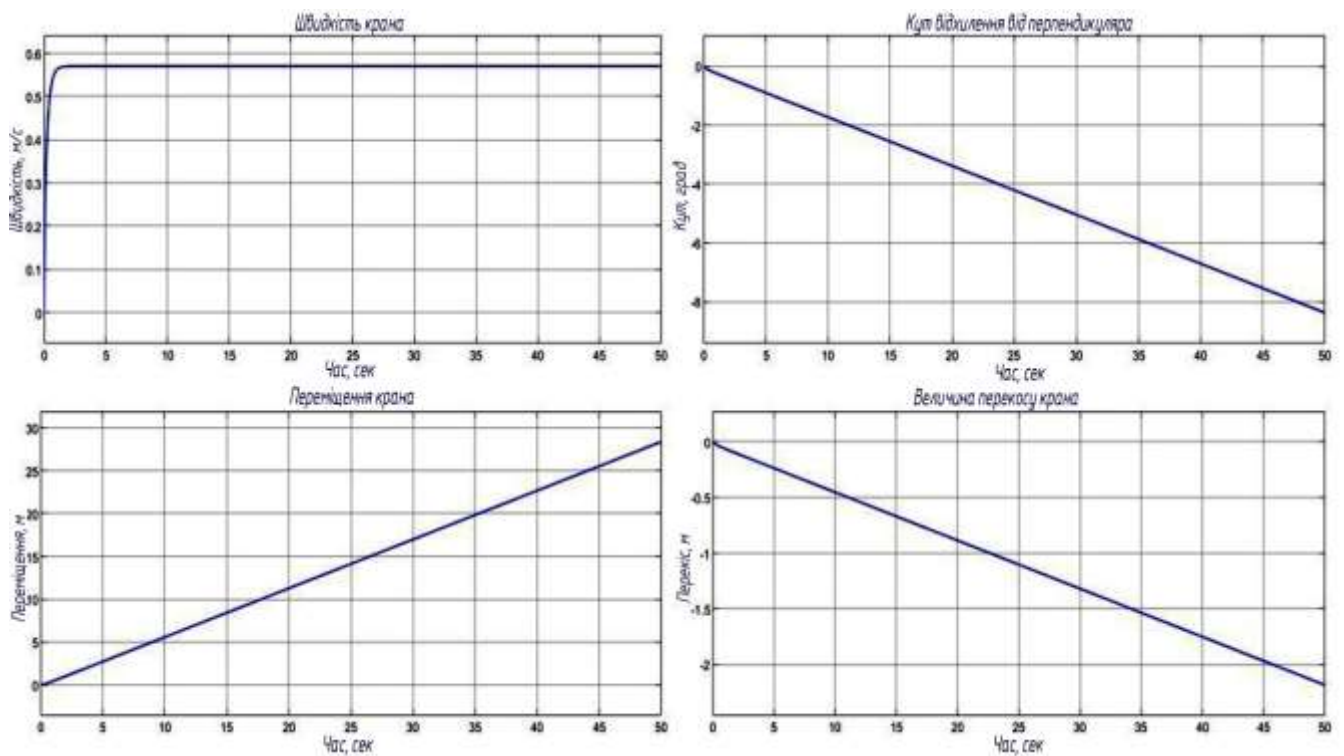


Рисунок 3.8 – Графіки параметрів моделі зі зміщеним вантажем

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ

На основі даних графіків можна зробити висновок, що модель адекватно відображає динаміку руху та перекосу крана.

Необхідності жорстко обмежувати кут перекосу дійсно немає, оскільки система керування має на меті мінімізувати його у режимі реального часу. Якщо алгоритми корекції працюють коректно, то величина відхилення не досягне критичних значень, які могли б призвести до геометричних конфліктів або виходу колеса за межі рейки.

Таким чином, впровадження обмеження на кут перекосу може бути зайвим і навіть ускладнити адаптацію системи до реальних умов, де перекіс змінюється плавно і потребує природної компенсації без різких обмежень.

### 3.3 Система керування

Далекомір. Наявність актуальної інформації про положення крана – це фундамент для ефективного керування. Лазерні далекоміри, обрані як основні сенсори, виявилися оптимальними через їхню низьку чутливість до змін навколишнього середовища, що особливо важливо для цехових і зовнішніх умов.

Хоча Simulink-модель крана вже надає координати лівої та правої сторін, ці сигнали мають ідеальну точність та безперервність, у той час як реальні далекоміри працюють дискретно та супроводжуються похибками вимірювання.

Тому реалізація далекоміра зводиться до дискретизації вихідного сигналу моделі та додавання білого шуму, що імітує випадкові похибки та завади. Такий підхід дозволяє забезпечити реалістичність поведінки системи у симуляційному середовищі.

З нульовою потужністю шуму ти заклав чисту основу для подальших досліджень, залишаючи можливість у майбутньому розглянути фільтрацію як окремий аналітичний етап. Якщо потрібно, можу допомогти з підготовкою рекомендацій щодо вибору фільтрів або створити порівняльну таблицю варіантів обробки сигналів.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

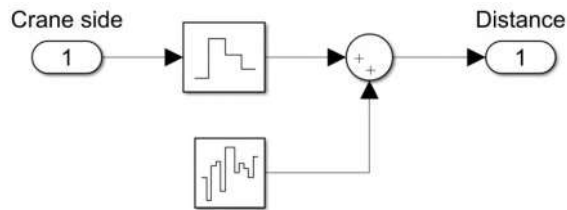


Рисунок 3.9 – Модель лазерного далекоміра в Matlab Simulink

### Система керування та реалізація ПІ-регулятора

У розробленій моделі система керування заснована на ПІ-регуляторі (пропорційно-інтегральному), що дозволяє ефективно зменшувати перекіс крана за рахунок регуляції різниці показань лазерних далекомірів.

Основні аспекти роботи системи:

- На вхід ПІ-регулятора подається різниця координат лівої та правої сторін крана, яка моделює вихідні сигнали далекомірів.
- Результат регулятора подається із протилежними знаками на два приводи: один отримує додаткове прискорення, інший – гальмування. Це створює компенсаційний момент, який зменшує перекіс.
- Такий підхід дозволяє швидше досягнути симетричного положення крана, ніж якби обидва приводи змінювали швидкість однаково.

Система не потребує попереднього формального обмеження кута перекосу, оскільки ПІ-регулятор автоматично прагне звести похибку до нуля, а в поєднанні з правильною фільтрацією та дискретизацією сигналу ця архітектура може бути дуже ефективною в реальному середовищі.

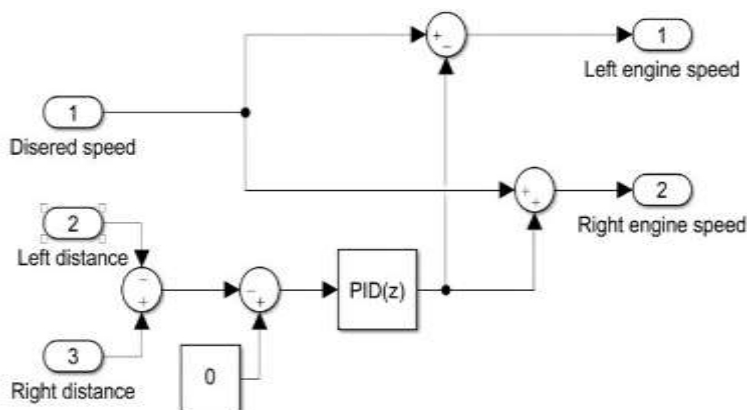
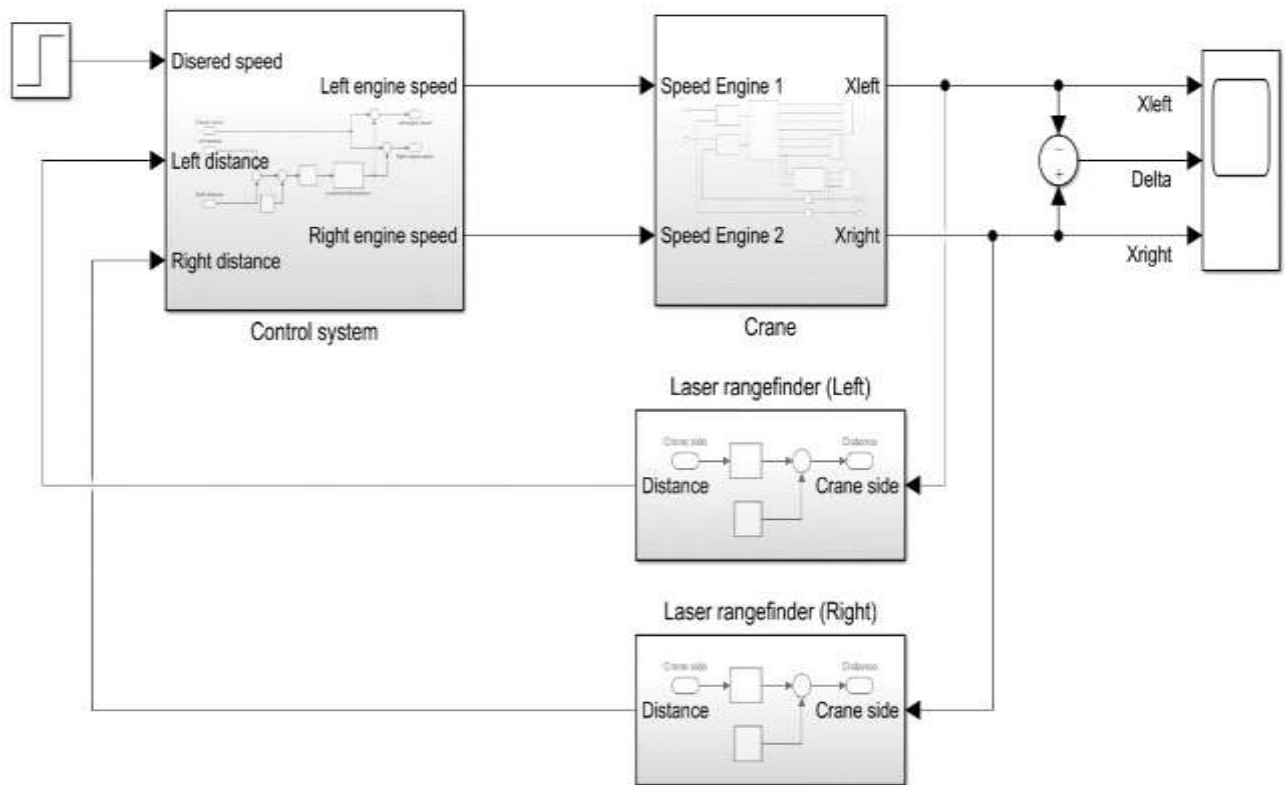


Рисунок 3.10 – Модель системи керування Matlab Simulink

### 3.4 Моделювання всієї системи

На рисунку 3.11 представлена модель усієї системи. Вона являє собою блок моделі крана, два модулі лазерних далекомірів та блок системи управління.



На рисунках 3.11 та 3.12 представлені графіки перехідних процесів з вимкненою та включеною системою компенсації перекосу. Для експерименту, представленого рисунку 3.11, маса вантажу становить 8 т., рисунку 3.12 – 16 т.. Обидва експерименти проводилися для 5 положень вантажу мосту крана.

Система компенсації перекосу увімкнена.

За графіками, на яких показані пар проведені експерименти, можна судити, що така модель працює. Система успішно парує перекіс крана, однак коефіцієнти регулятора налаштовані для вантажу масою 16 т. і тому величина перекосу при масі 8 т. досягає більших значень.

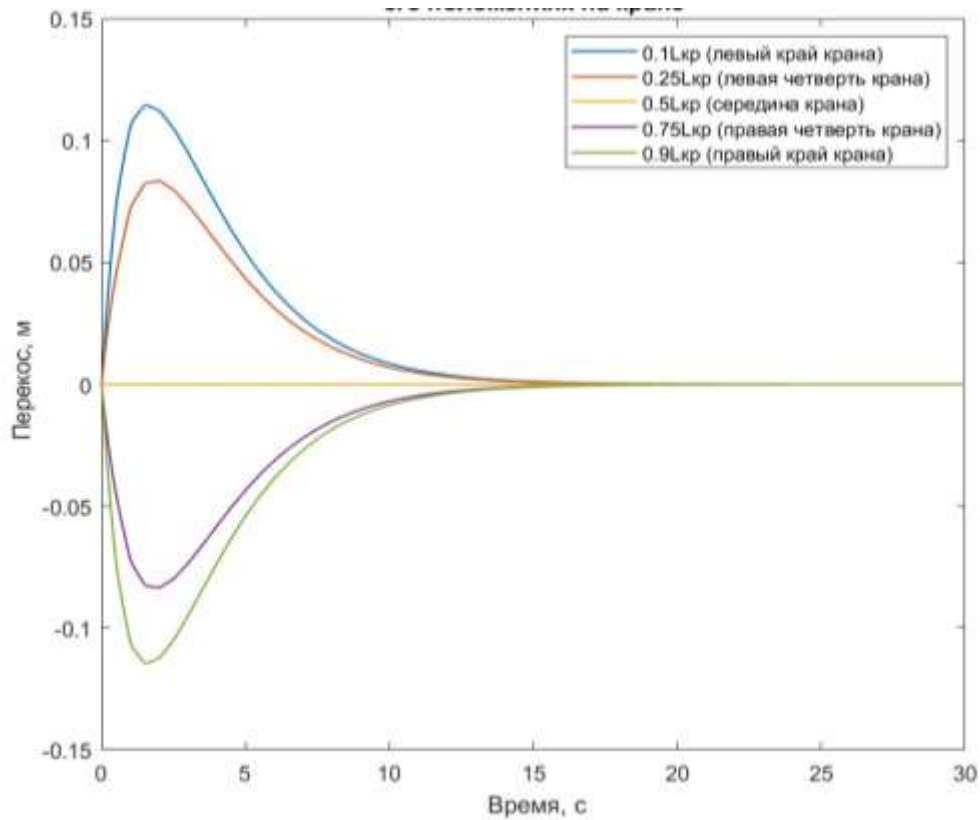


Рисунок 3.11 – Эксперимент з вантажем 8 т.

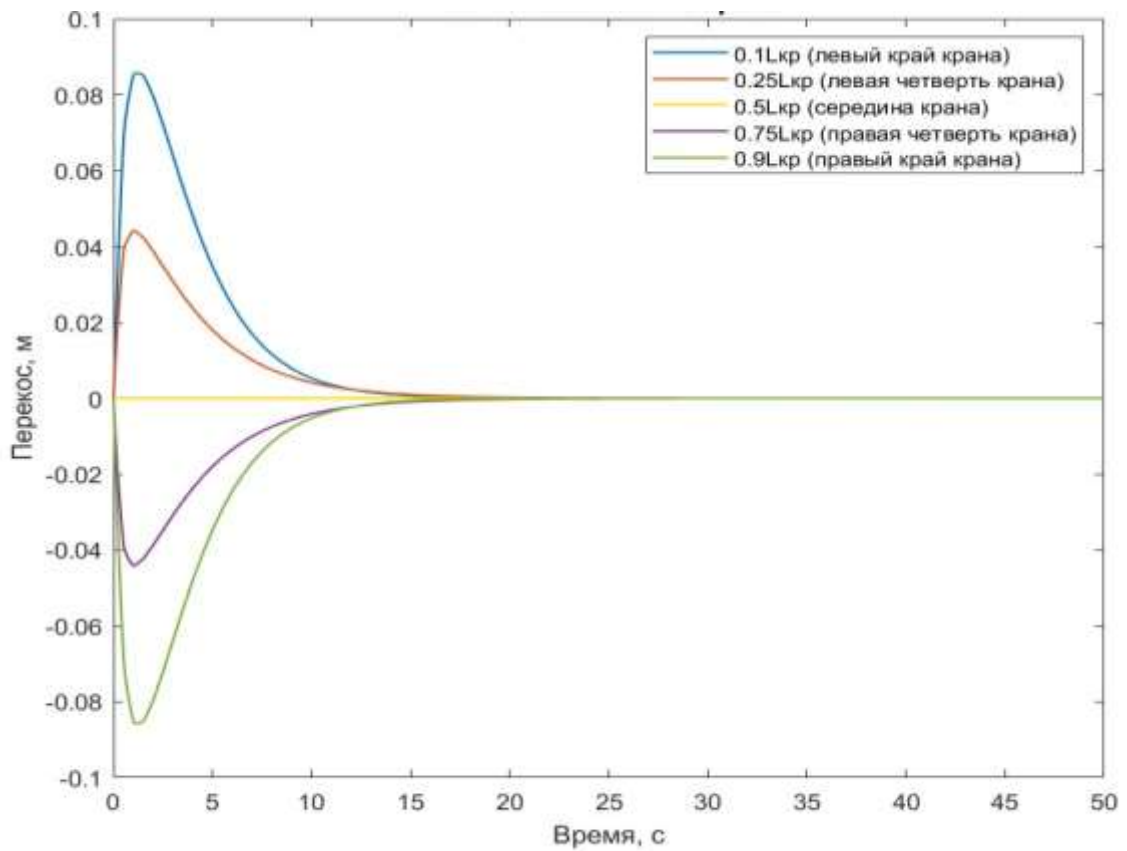


Рисунок 3.12 – Эксперимент з вантажем 16 т.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ

Арк.

42

### Висновок до розділу 3

У результаті проведеної роботи було:

Розроблено спрощену модель привода крана в середовищі Matlab/Simulink, яка відповідає заданим технічним характеристикам;

Реалізовано залежність максимальної швидкості двигуна від моменту навантаження, що дозволяє коректно моделювати динамічну поведінку системи в умовах змінної маси;

На основі математичного опису процесу перекосу, сформованого у розділі 2, побудована інтегрована модель мостового крана, яка продемонструвала адекватність поведінки;

Система управління містить дві моделі лазерних далекомірів і ПІ-регулятор, що коригує швидкості приводів для парирування перекосу.

Система протестована в умовах різної маси вантажу та його асиметричного розташування, і в усіх сценаріях вона успішно зменшує кут відхилення балки до нуля, виконуючи свої функції ефективно.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища

Під час роботи машиніст крана стикається з різними небезпечними та шкідливими факторами. До небезпечних належать механічні ризики, пов'язані з підйомними операціями, складовими частинами крана, вантажозахоплювальними пристроями та самими вантажами. Окрім цього, існують електричні загрози, а також небезпека, спричинена несподіваним запуском механізмів або перевищенням швидкості. Додаткові ризики можуть виникати через помилки при складанні або монтажі крана, падіння предметів, поступальний рух крана, особливості системи управління та дії третіх осіб.

Шкідливі фактори, які впливають на стан машиніста, включають мікрокліматичні умови, рівень шуму, вібрацію та освітлення. Всі ці аспекти необхідно враховувати для забезпечення безпечної роботи та мінімізації ризиків для здоров'я оператора.

Оптимальні мікрокліматичні умови визначаються за критеріями теплового та функціонального комфорту людини. Вони забезпечують комфортне самопочуття протягом восьмигодинної робочої зміни, мінімізуючи навантаження на механізми терморегуляції. Такі умови сприяють збереженню здоров'я, підтримують високий рівень працездатності та є оптимальними для робочих місць.

У виробничій санітарії шумом називають пружні коливання в діапазоні частот, що сприймається людським слухом і поширюється у газоподібних середовищах. Постійний шум на робочих місцях характеризується рівнями звукового тиску у децибелах для октавних смуг із середньгеометричними частотами від 31,5 до 8000 Гц.

										Арк.
										44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ					

Гранично допустимий рівень вібрації визначається як такий, що при щоденній роботі, не більше 40 годин на тиждень, протягом усього трудового стажу не має призводити до захворювань чи відхилень у стані здоров'я. Оцінка впливу постійної та змінної вібрації на людину здійснюється шляхом частотного аналізу, інтегральної оцінки за частотою або з урахуванням часу впливу за еквівалентним енергетичним рівнем.

Під час роботи мостового крана виникають вібрації у вертикальній та горизонтальній площинах. Вертикальні коливання кранового мосту знаходяться в межах 1,5–8,0 Гц, тоді як горизонтальні, спричинені розгойдуванням вантажу, мають частотний діапазон 0,2–1,0 Гц. Оскільки резонансна частота коливань людського тіла лежить у межах 1–15 Гц, машиніст найбільшою мірою піддається впливу вертикальних коливань.

Одним з важливих факторів трудових умов є належне освітлення робочої зони. Недостатнє освітлення сприяє зниженню продуктивності праці та може викликати професійні захворювання органів зору.

Системи штучного освітлення може бути трьох видів:

- загальна;
- місцева;
- комбінована.

Електричне освітлення виробничих і побутових приміщень, а також складально-зварювальних цехів і ділянок повинно відповідати встановленим нормативам. У цехах необхідно використовувати загальне або комбіноване освітлення, залежно від умов роботи. У робочій площині, зокрема на ділянках зварювання, рівень освітленості має бути не меншим за 150 люксів при використанні люмінесцентних ламп, а на ділянках розмітки — не менше 400 люксів. Нормовані показники природного та штучного освітлення визначаються відповідно до особливостей зорових робіт у конкретному приміщенні.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

#### 4.2 План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій в цеху

Пожежонебезпечними вважаються установки, де використовуються або зберігаються горючі речовини. Згідно з класифікацією, кран належить до класу П-111, оскільки він розташований поза приміщенням у зоні, де не застосовуються горючі рідини з температурою запалювання 61°C і вище або тверді горючі матеріали.

Для забезпечення пожежної безпеки на крані-перевантажувачі передбачені такі заходи:

- система оповіщення про пожежу;
- автоматична пожежна сигналізація;
- первинні засоби пожежогасіння.

Загоряння, займання та пожежі можуть супроводжуватися вибухами, становлячи серйозну загрозу для людей. Саме тому пожежна безпека є одним із ключових аспектів охорони праці у виробничій сфері. Важливу роль у профілактиці та запобіганні пожежам відіграє правильний вибір режиму роботи електрообладнання з урахуванням особливостей пожежонебезпечної зони.

Пожежна безпека повинна забезпечуватись:

- системою запобігання пожежі;
- системою протипожежного захисту;
- організаційно - технічними заходами.

Автоматичні установки пожежогасіння та системи пожежної сигналізації мають відповідати вимогам проектної документації та галузевим стандартам. Переносні вуглекислотні вогнегасники ОУ-5, що використовуються на крані, повинні мати відповідне маркування, бирки та бути пофарбовані в червоний колір. Їх перезарядження здійснюється згідно з інструкціями з безпеки.

Вогнегасники слід розміщувати у добре видимих та легкодоступних місцях, а також проводити їх періодичне обслуговування, що включає очищення від пилу і бруду та оновлення фарбування з відповідними написами. Для куріння

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

повинні бути відведені спеціальні зони, оснащені засобами пожежогасіння та передбаченими шляхами евакуації людей і обладнання.

У разі надходження сигналу пожежної тривоги машиніст повинен припинити роботу, спробувати відключити живлення крана та розпочати гасіння пожежі. Якщо ці заходи неможливі через складність ситуації, йому слід залишити робоче місце, перейти у спеціально відведене місце, повідомити старшого зміни (бригадира) та очікувати подальших інструкцій.

#### 4.3 Засоби захисту від ураження електричним струмом

Засоби захисту від ураження електричним струмом поділяються на основні та додаткові. Основні засоби мають ізоляцію, здатну витримувати робочу напругу електроустановки, що дозволяє безпечно торкатися струмопровідних частин під напругою. До них належать діелектричні рукавички, ізолюючі штанги, електровимірювальні кліщі, слюсарно-монтажний інструмент із ізолюючими рукоятками та покажчики напруги.

Додаткові засоби захисту до 1000 В включають діелектричні калоші, килими та ізолюючі підставки. Окрім цих засобів, використовується захисне заземлення, яке знижує напругу на металевих частинах обладнання до безпечного рівня. Це особливо важливо для елементів перевантажувача, таких як корпуси електродвигунів, контролерів, кінцевих вимикачів та металеві труби електропроводок, які заземлюються на конструкцію перевантажувача через гнучкі мідні перемички.

Для забезпечення належного рівня заземлення рейкові колії перевантажувача повинні бути підключені до власного контуру заземлення з опором не більше 4 Ом. Розрахунок заземлення здійснюється шляхом визначення необхідної довжини горизонтального заземлювача та кількості вертикальних заземлювачів відповідно до встановлених умов.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проблема перекосу мостових кранів є актуальною майже в усіх випадках їх експлуатації. Запропонована система може бути впроваджена в будь-яку модель крана, однак ефективна компенсація перекосу можлива лише для кранів із роздільним приводом.

Найбільш доцільними датчиками в розроблюваній системі є лазерні далекоміри, оскільки вони забезпечують простоту монтажу, експлуатації та програмної реалізації, а також надійно функціонують у цехових умовах без значного впливу зовнішнього середовища.

Для побудови математичної моделі використана конструкція крана від компанії Stahl Crane Systems. На підставі розрахунків встановлено, що теоретичне відхилення крана при прольоті 15 метрів становить близько 79 мм. Створена математична модель перекосу та її реалізація в середовищі *Matlab/Simulink* підтвердили відповідність заданим вимогам.

Розроблена система керування, що включає дві моделі лазерних далекомірів та ПІ-регулятор, дозволяє ефективно коригувати швидкості приводів і, відповідно, зменшувати кут відхилення від перпендикуляра до нуля. Модель протестована за умов різних мас вантажу та його розміщення на металоконструкції крана, що підтвердило стабільність і ефективність роботи системи.

Одним із додаткових результатів роботи стало створення експериментального вимірювального пристрою, здатного автономно фіксувати перекіс крана без втручання в його роботу. Проведений експеримент засвідчив роботоздатність, надійність і стабільність цього пристрою. Надалі він може бути використаний як інструмент для дослідження перекосу на різних моделях кранів та вдосконалення як математичної моделі, так і системи керування загалом.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bhatia A. Overview of electric overhead traveling (EOT) cranes // Createspace Independent Pubю 27 September 2014 – 202р.
2. Ryde J., Hillier N. Performance of laser and radar ranging devices in adverse environmental conditions // Journal of Field Robotics. 2009. №26. С. 712-727.
3. Formsma O., Dijkshoorn N., Noort S., Visser A. Realistic simulation of laser range finder behavior in a smoky environment // RoboCup 2010: Robot Soccer World Cup XIV. January 2010. С. 336-349.
4. Li Jun-fang, Li Tao, Leng Jian-wei, An Fei. A novel positioning system of overhead crane // International Conference on Electrical and Control Engineering. 2010. Volume: 1. С. 209-212.
5. Фідровська Н. М., Слепужніков Є. Д., Чернищенко О. В. Динамічні навантаження при пересуванні ходових коліс з гумовими вставками. Машинобудування : зб. наук. пр. Укр. інж.-пед. акад. Харків, 2015. Вип. 15. С. 87–91.
6. Динаміка та оптимальне керування рухом мостових кранів. Монографія / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, В.А. Голдун, В.В. Крушельницький. – К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2019. – 460 с.
7. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динаміка машин. К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2013. 227 с.
8. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Голдун В. А. Фізичне моделювання навантажувально-розвантажувальних операцій на транспортних засобах. Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології виробництва зернових культур» (12 лютого 2016 р): тези доповіді. К., С. 73-74.
9. Офіційний каталог моделей мостових кранів компанії Stahl Crane Systems. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.stahlcrane.com.ua/page-production.html>

										Арк.
										49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ

10. Sittipong S., Meengam C., Chainarong S., Towatana P. Design analysis of overhead crane for maintenance workshop // MATEC Web of Conferences 207(1):02003. January 2018.
11. Zhengyan Zhang, Dingfang Chen, Min Feng, Dynamics Model and Dynamic Simulation of Overhead Crane Load Swing Systems Based on the ADAMS // 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. 2008. C. 484-487.
12. R.M.T. Raja Ismail, M.A. Ahmad, M.S. Ramli, F.R.M. Rashidi, Nonlinear dynamic modelling and analysis of a 3-D overhead gantry crane system with payload variation // Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation. 2009. Volume: 1. C. 350-354.

					040.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# ДОДАТКИ

## Додаток А

%Основні параметри крана

$M_{cr} = 4300$ ; %кг, маса крана

$L_{cr} = 15$ ; %м, довжина прольоту крана

$M_{load} = 16\ 000$ ; %кг, маса вантажу

$X_{load} = L_{cr} * 0.75$ ; %м, положення вантажу на мосту

$H_w = 64 * 10^{-3}$ ; %м, ширина колеса

$H_r = 50 * 10^{-3}$ ; %м, ширина рейки

$L_c = 2500 * 10^{-3}$ ; %м, міжцентрова відстань коліс

$D_w = 315 * 10^{-3}$ ; %м, діаметр колеса

$D_f = 345 * 10^{-3}$ ; %м, діаметр реборд

$H_f = 20 * 10^{-3}$ ; %м, ширина реборд

%максимальний кут відхилення крана

$\alpha = \text{atan}((H_w - H_r) / (L_c + \sqrt{D_f^2 - D_w^2}));$

%положення центру мас конструкції

$CM = L_{cr}/2 + (X_{load} - L_{cr}/2)/(1 + M_{cr}/M_{load});$

%Зміна швидкості при зміні моменту на  $1\text{Н}\cdot\text{м}$

$K_n = 77.6$ ;

%Передавальне число редуктора

$Z = 6$ ;

%Момент опору на лівому та правому колесі відповідно.

$WL = (M_{cr}/2 + M_{load} * CM / L_{cr}) * 0.6 * 1.3 * 10^{-3}$ ;

$WR = (M_{cr}/2 + M_{load} * ((L_{cr} - CM) / L_{cr})) * 0.6 * 1.3 * 10^{-3}$ ;

$dVL = n_0 - M_n / (WL / Z) * K_n$ ;

$dVR = n_0 - M_n / (WR / Z) * K_n$ ;

if  $WL < M_n$

$dVL = n_0$ ;

end if  $WR < M_n$

$dVR = n_0$ ;

end

## Додаток Б

% Механічна характеристика двигуна %

%Параметри двигуна АІР63В4

$P = 0.37 * 10^3$ ; %Вт, потужність двигуна

$K_p = 0.76$ ; %коефіцієнт потужності

$h = 2.2$ ; % відношення максимального моменту до номінального  $n_n = 1325$ ;

%номінальна швидкість  $n_0 = 1500$ ; %синхронна швидкість

% $H^*_m$ , номінальний момент

$M_n = 9.55 * P / n_n$ ;

%номінальне ковзання  $S_n = (n_0 - n_n) / n_0$ ;

%критичне ковзання

$S_{kr} = S_n * (h + \sqrt{h^2 - 1})$ ;

% $H^*_m$ , критичний момент

$M_{kr} = h * M_n$ ;

%вектор ковзань

$S = [0 \ S_n / 2 \ S_n \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4 \ S_{kr}]$ ; %вектор моментів

$M = 2 * M_{kr} / (S / S_{kr} + S_{kr} / S)$ ;

%вектор швидкостей

$n = n_0 * (1 - S)$ ;

%побудова механічної характеристики

Plot\_engine\_param(M, n)

## Додаток В

```
function df_dt = Num_Dif(f)
df_dt = 0.0;
% оголошуємо як зовнішні функції
coder.extrinsic('assignin');
coder.extrinsic('evalin');
%отримуємо матрицю минулих значень з робочої області
Array = zeros(1,3,'double');
Array = evalin('base','Array_left');
%i крок дискретизації для отримання кроку диф-я
step = evalin('base', 'Discretization_step');
% робимо зсув матриці та замінюємо перший елемент на новий
Array = circshift (Array, 1);
Array(1) = f;
%чисельно диференціюємо
V = (-3 * Array(1) + 4 * Array(2) - Array(3)) / (2 * step) *(-1);
%перезаписуємо матриці у робочій області
assignin('base','Array_left',Array);
df_dt = V;
```