

Погорельцев Максим Сергійович

Розробка автоматизованої системи керування краном для складування  
виробленої продукції

Керівник: проф. Стухляк П.Д.

Development of an automatic control system of finished products store crane



## АНОТАЦІЯ

У роботі було проаналізовано режими роботи козлового крану. На основі аналізу розглянуто основні аспекти ПД регулювання роботою крану з метою зменшення часу на розвантажувальні операції.

Проведено розрахунок та моделювання роботи усіх регуляторів для запобігання розхитування вантажу. При цьому повинна забезпечуватись максимальна швидкість розвантаження.

Розраховано всі параметри автоматичних регуляторів для управління електроприводом. Впровадження такої системи керування дозволить значно скоротити час вантажно-розвантажувальних робіт.

Ключові слова: КРАН, ЕЛЕКТРОПРИВІД, РЕГУЛЯТОР, КОЛИВАННЯ, ВАНТАЖ.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>5</b>
<b>1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....</b>	<b>6</b>
1.1. <i>Опис складу будівельних матеріалів.....</i>	<i>6</i>
1.2. <i>Види козлових кранів та огляд підходів до керування краном.....</i>	<i>9</i>
<b>2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>16</b>
2.1 <i>Автоматизація електромеханічної системи козлового крану.....</i>	<i>16</i>
2.2. <i>Розрахунок параметрів регулювання приводу крану.....</i>	<i>20</i>
<b>3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Моделювання руху крану та визначення налаштувань регуляторів .....</i>	<i>24</i>
<b>4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ.....</b>	<b>42</b>
4.1. <i>Технічні рішення з питань гігієни праці та виробничої санітарії.....</i>	<i>42</i>
4.1.1. <i>Мікроклімат та склад повітряного середовища робочої зони.....</i>	<i>42</i>
4.1.2. <i>Основні вимоги до виробничого освітлення.....</i>	<i>44</i>
4.2. <i>Основні безпеки в надзвичайних ситуаціях .....</i>	<i>46</i>
4.3 <i>Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи в умовах надзвичайних ситуацій. .....</i>	<i>47</i>
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>49</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ.....</b>	<b>50</b>

## ВСТУП

Козлові крани - це звичайні промислові споруди, які використовуються в будівництві, на фабриках та гаванях. Зазвичай ці крани експлуатуються вручну.

Зі збільшенням розміру цих кранів процес управління ними ускладнився без використання методів автоматичного управління. Взагалі рух кранів не має встановленого шляху. Крани повинні працювати в різних робочих умовах, що створює необхідність переважно замкненого контролю. Метою цього проекту є розробка контролера для зменшення кута коливання мотузки для двовимірної козлової кранової системи.

У нашому середовищі важко підняти або перенести важкий предмет з одного місця в інше місце. Для вирішення цієї проблеми зазвичай використовують крани у промисловості, або на складі. Наприклад, кран використовується в транспортній галузі для навантаження та вивантаження обладнання, у будівництві, в обробній промисловості, для складання важкого матеріалу. Ці матеріали зазвичай важкі, великі та небезпечні, з якими не можуть працювати працівники.

Кран складається з підйомника та механізму підтримки. Навантаження, передається з тросу від гачка в точці на механізм підтримки. Потім опорний механізм переміщує підвішений вантаж по робочому просторі крану. Після цього підйомний механізм підніме вантаж і перемістить в необхідну точку. Одним із складних завдань при керуванні кранами є зменшення хитання. Вони коливаються, як правило, внаслідок руху візка. Це похитування не тільки знижує ефективність роботи кранів, але і може спричинити небезпеку в ускладненому робочому середовищі.

# 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1. Опис складу будівельних матеріалів

Склад будівельних матеріалів є цех, в якому встановлені різні пристосування для зберігання матеріалу: стелажі (для зберігання стали), касети (для металевих, залізобетонних ферм, балок, стінових панелей), піраміди (для шибок). Вздовж стелажів прокладені рейки, по яких переміщається козловий кран, в процесі роботи. Так як головна робоча зона знаходиться під прольотом крана, основна частина стелажів розташовується в цьому просторі. Можливість виходу вантажопідійомної візки на виносні консолі за межі крана, дозволяє використовувати великі площі складу.

Вимоги, що пред'являються до підйомно-транспортного обладнання.

Багато виробництв в останні кілька років прагнуть перейти від ручної праці до часткової або повної автоматизації виробництва за рахунок впровадження автоматичних верстатів, вантажопідйомних механізмів і повністю автоматизованих ліній.

Робітникам в величезній кількості різні матеріали необхідно прийняти, розвантажити і зберегти, а до моменту споживання доставити до місця переробки. На деяких об'єктах понад 70% витраченої праці припадає саме на транспортно-перевалочні і складські операції.

Великий обсяг в будівництві займають вантажно-розвантажувальні операції зі штучними вантажами - лісоматеріалами, сортовим металом, металевими конструкціями і конструкціями зі збірного залізобетону. Особливості цієї категорії будівельних вантажів - їх значний одиничний вага і великі габаритні розміри, що визначає умови їх зберігання, а також засоби механізації їх транспортування і перевантаження.

Вантажно-розвантажувальні операції зі штучними вантажами механізуються в більшості випадків за допомогою різних вантажопідйомних машин з різними вантажо захоплювальними пристроями.

Крани широко використовуються для перевезення важких вантажів та небезпечних матеріалів на верфях, фабриках, ядерних установках та високих будівництвах. Їх можна класифікувати на дві категорії на основі їх конфігурацій: козлові крани та поворотні крани.

Схема складського приміщення приведена на рис. 1.1.

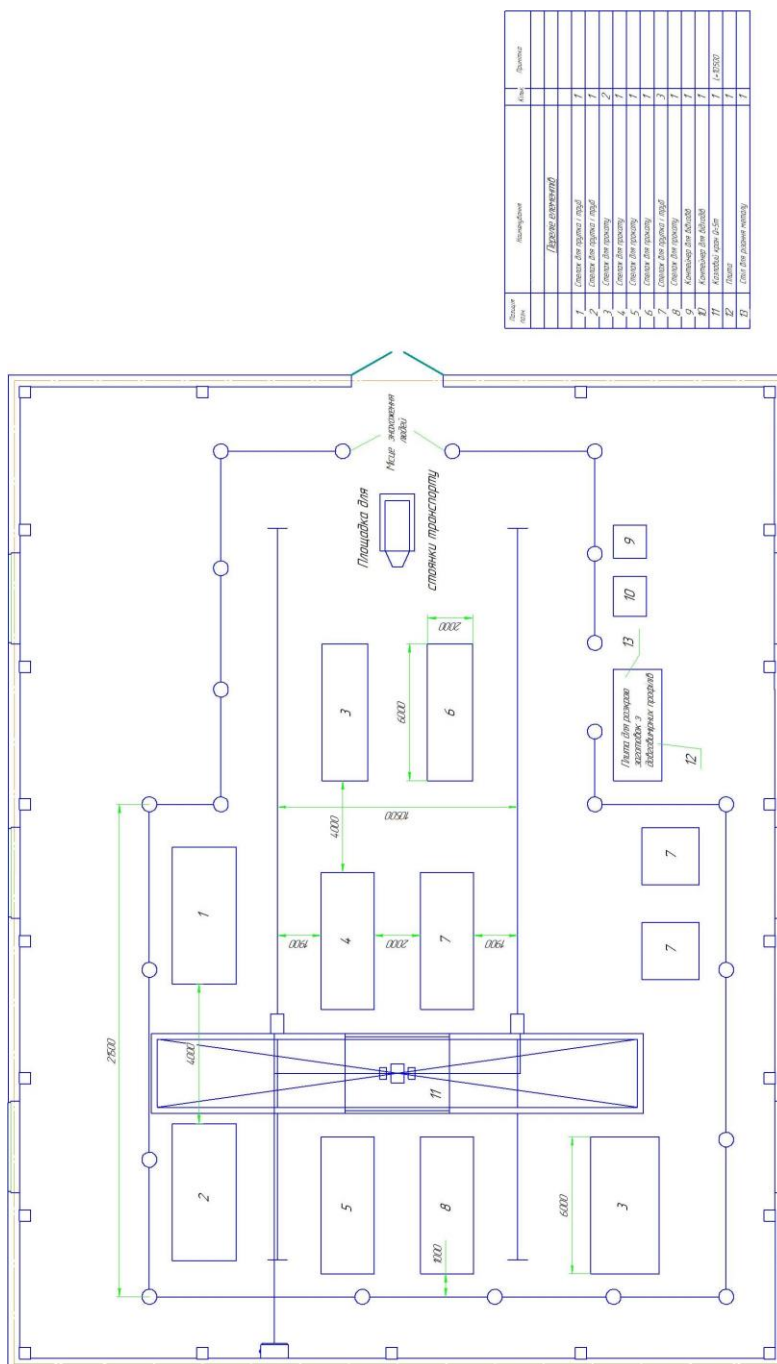


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд складського приміщення з козловим краном.

Загальний вигляд козлового крану приведено на рис. 1.2.

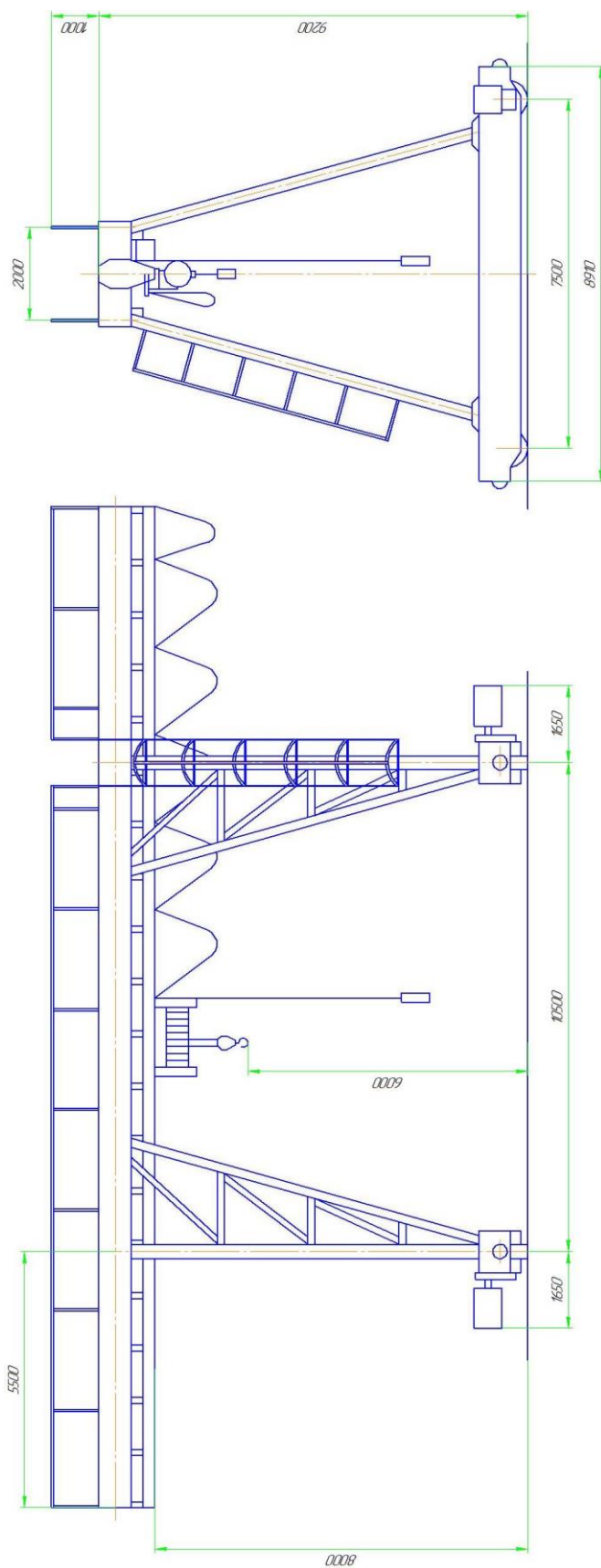


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд козлового крану.



Даний тип крану приводиться в рух електроприводом ЗМП-31,5, який наведено на рис. 1.3.

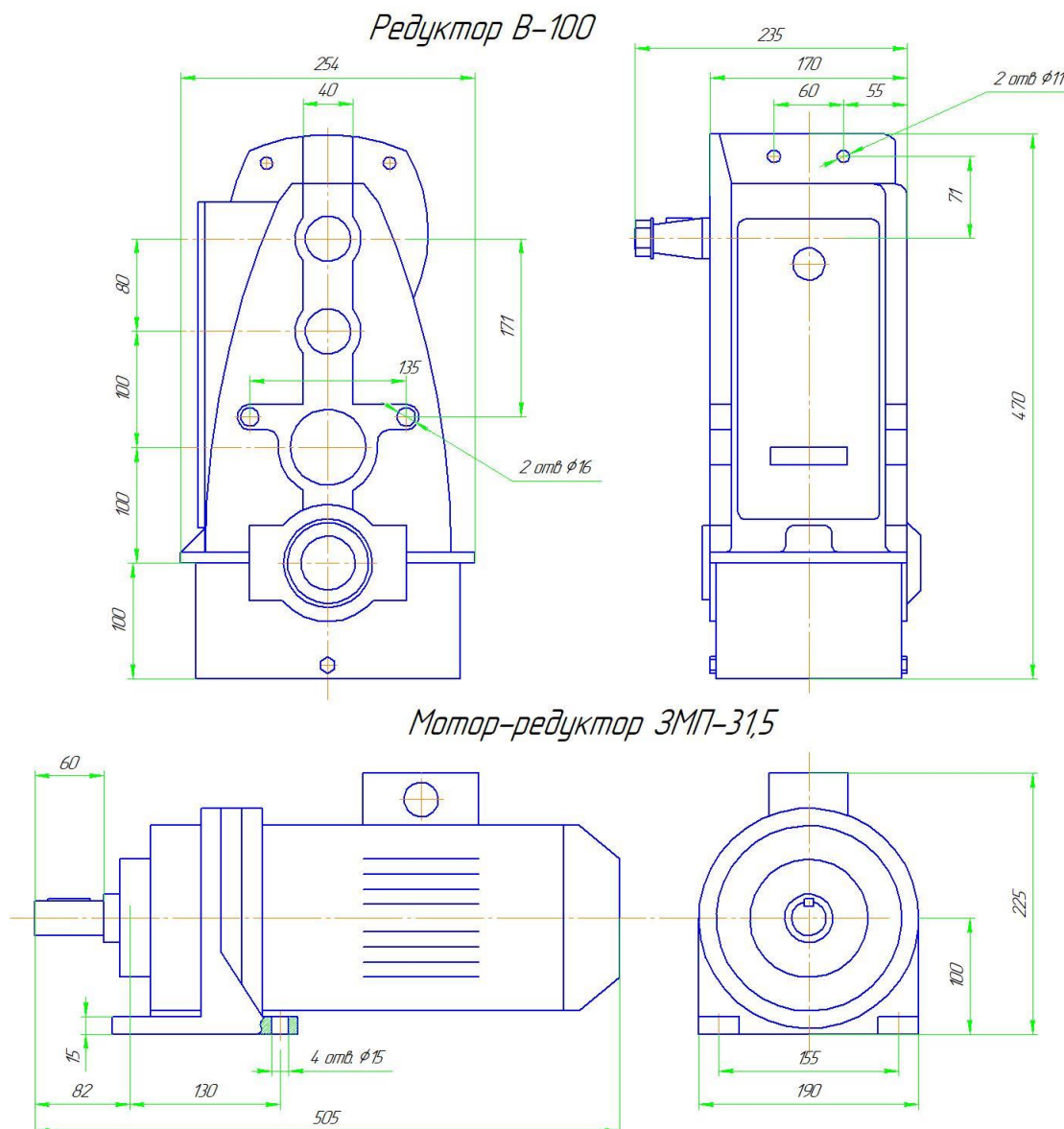


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд електроприводу

## 1.2. Види козлових кранів та огляд підходів до керування краном

Портальні крани зазвичай використовуються на заводах, рис. 1.4. Цей тип кранів включає візок, який перекладається в горизонтальній площині. Корисний вантаж кріпиться до візка за допомогою троса, довжина якого може змінюватися за допомогою підйомного механізму. Навантаження з

кабелем розглядається як одновимірний маятник з коливанням на один ступінь свободи.

Існує ще одна версія цих кранів, яка може рухатися також горизонтально, але у двох перпендикулярних напрямках. Аналіз для них майже однаковий, оскільки двонаправлені рухи можна розділити на два неспряжених однонаправлених рухи. Ротаційні крани можна розділити на два типи: стрілові крани, які зазвичай використовуються на верфях, та баштові крани, які використовуються в будівництві.

У цих кранах точка кріплення вантажної лінії зазнає обертання. Для цього пункту може існувати інший ступінь свободи. Для стрілових кранів ця точка рухається вертикально, тоді як у баштових кранах вона рухається горизонтально. Крім цих рухів, трос можна опустити або підняти. Кабель і навантаження обробляються як сферичний маятник з коливанням на два ступені свободи



Рисунок 1.4 - Портальний кран.

Отже, нелінійності, такі як кулонівське тертя, не враховуються. На жаль, коли розроблені контролери були перевірені на моделі баштового крана, ми виявили, що тертя дуже велике. Це тертя призводить до великої

похибки стаціонарного стану для управління положенням навіть без управління поворотом. Якщо включено управління поворотом, реакція абсолютно неприйнятна. Отже, контролери, розроблені на основі лінійних моделей, не застосовуються до реальних систем, якщо лише не компенсовано тертя.

Це можна зробити, оцінивши тертя, а потім застосувавши протилежну дію управління для його скасування, яка відома як компенсація тертя, рис. 1.6. Для оцінки сили тертя ми приймаємо математичну модель, а потім оцінюємо коефіцієнти моделі, використовуючи техніку ідентифікації поза мережею, таку як метод найменших квадратів (LS). По-перше, процес ідентифікації застосовується до теоретичної моделі двигуна постійного струму з відомими коефіцієнтами тертя. З цього прикладу виведені деякі вказівки та правила вибору параметрів LS. Тоді коефіцієнти тертя крану відомий.

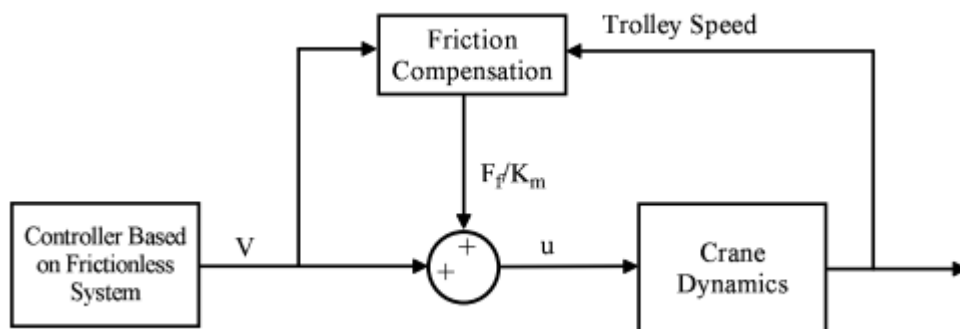


Рисунок 1.6 - Діаграма компенсації тертя.

Підходи до керування краном.

Крани використовуються для переміщення вантажу з точки в точку за мінімальний час, щоб вантаж дістався до місця призначення без коливання. Зазвичай за це завдання відповідає вмілий оператор.

Під час операції вантаж може вільно коливатися в маятниковому русі. Якщо гойдалка перевищує належну межу, вона повинна бути демпфована або операція повинна бути зупинена, поки гойдалка не згасне.

Будь-який варіант вимагає часу, що зменшує доступність об'єкта. Ці проблеми спонукали багатьох дослідників розробляти алгоритми управління для автоматизації роботи крана. Однак більшість існуючих схем не придатні для практичної реалізації. Тому більшість промислових кранів не автоматизовані і все ще залежать від операторів, які іноді не можуть компенсувати коливання.

Ця несправність може спричинити навантаження та навколишнє середовище небезпеці. Ще одна складність автоматизації кранів - це природа середовища крана. Алгоритм управління повинен мати можливість справлятися з цими умовами.

Експлуатацію кранів можна розділити на п'ять етапів: захоплення, підйом, переміщення вантажу від точки до точки, опускання та зняття. Можлива повна автоматизація цих процесів.

Переміщення навантаження з точки в точку є найбільш трудомістким завданням у процесі, і для її виконання потрібен вмілий оператор. Відповідні методи полегшення рухомих вантажів без індукції великих коливань є предметом основних досліджень. Ми можемо розділити автоматизацію кранів на два підходи. У першому підході оператор утримується в циклі, а динаміка навантаження модифікується, щоб полегшити йому роботу.

Один із способів - додати демпфування, повернувши назад кут коливання вантажу та його швидкість, або повернувши назад відкладену версію кута коливання. Цей зворотний зв'язок додає додаткову траєкторію до тієї, яку генерує оператор. Другий спосіб - уникнути збудження навантаження поблизу його власної частоти, додавши фільтр для видалення цієї частоти з входу .

Це вводить затримку між дією оператора та входом в кран. Ця затримка може заплутати оператора. Третій спосіб - це додати механічний поглинач до конструкції крана. Реалізація цього методу вимагає значної кількості енергії, що робить його недоцільним. При другому підході оператор видаляється з циклу, і операція повністю автоматизована. Це можна зробити за допомогою

різних технік. Перша техніка заснована на формуванні траєкторій для перенесення навантаження до місця призначення з мінімальним коливанням. Ці траєкторії отримують або методом формування введення, або методами оптимального управління. Другий прийом заснований на зворотній зв'язку положення та кута повороту.

Третя методика заснована на поділі проблеми дизайну контролера на дві частини: контролер проти коливання та контролер відстеження. Кожен з них розробляється окремо, а потім комбінується для забезпечення продуктивності та стабільності загальної системи. Оскільки на коливання навантаження впливає прискорення руху, багато дослідників зосередилися на формуванні траєкторій, які доставляють навантаження в найкоротші терміни і одночасно мінімізують коливання. Ці траєкторії отримуються загалом за допомогою методів оптимізації.

Цільовою функцією може бути або час передачі, або контрольна дія, або кут розмаху. Іншим важливим методом формування траєкторій є вхідне формування, яке складається з послідовності імпульсів прискорення та уповільнення. Отриманий контролер є з відкритим циклом, що робить його чутливим до зовнішніх порушень та змін параметрів.

Крім того, необхідною контрольною дією є удар-вибух, який переривається. Більше того, зазвичай для цього потрібен кут похилення в нуль на початку процесу, який практично не може бути реалізований. Щоб уникнути недоліків відкритого циклу, багато дослідників досліджували оптимальний контроль за допомогою зворотного зв'язку. Вони виявили, що оптимальний контроль працює погано, якщо він реалізований у закритому циклі. Погана продуктивність пояснюється обмеженням циклів, що виникають внаслідок коливань контрольної дії навколо комутаційних поверхонь.

Zinober уникнув граничних циклів, обертаючи комутаційні поверхні. Цей підхід можна розглядати як неоптимальний контроль часу. Однак

стабільність системи не доведена. Більше того, алгоритм управління занадто складний, щоб його практично реалізувати.

Відомо, що контроль зворотного зв'язку менш чутливий до порушень та змін параметрів. Отже, це привабливий метод для проектування управління краном. Ridout розробив контролер, який подає назад положення та швидкість візка та кут повороту вантажу. Приріст зворотного зв'язку обчислюється методом спроб і помилок на основі методу кореневого локусу. Пізніше він вдосконалив свій контролер, змінивши коефіцієнт підсилення швидкості візка відповідно до сигналу помилки. Завдяки такому підходу демпфування системи може бути змінено під час передачі навантаження. Спочатку демпфування зменшується, щоб збільшити швидкість, а потім збільшується поступово.

Отже, досягається швидший час передачі. Однак номінальний коефіцієнт зворотного зв'язку отримується методом спроб і помилок. Це робить процес громіздким для широкого кола робочих умов. Дефкі дослідники застосували контроль зворотного зв'язку з адаптивними підсиленнями, які обчислюються на основі техніки розміщення полюсів. Так як посилення фіксуються під час операції передачі, його алгоритм управління можна найкраще описати як планування посилення, а не як адаптацію. Хазлерігг розробив компенсатор із нулями, призначеними для скасування динаміки маятника. Цей контролер був протестований на фізичній моделі крана. Це дало хороші результати, за винятком того, що система була недостатньо гасла. Тому реакція системи була коливальною, що передбачає більший час передачі.

Hurteau і Desantis розробили лінійний контролер зворотного зв'язку, використовуючи повноцінний зворотний зв'язок. Коефіцієнти підсилення контролера регулюються відповідно до довжини кабелю. Однак, якщо довжина кабелю змінюється некваліфіковано, відбувається погіршення продуктивності системи. Крім того, алгоритм настройки не був перевірений експериментально. Як вже згадувалося раніше, метою управління краном є

переміщення вантажу з точки в точку і одночасно мінімізація коливання вантажу. Зазвичай контролер призначений для одночасного виконання цих двох завдань, як у вищезазначених контролерів.

Однак в іншому підході, який широко використовується, ці два завдання розглядаються окремо, розробляючи два контролери зворотного зв'язку. Перше завдання - контролер проти гойдання. Він контролює демпфування коливання за допомогою належного зворотного зв'язку кута повороту а й його ставка.

Друге завдання - контролер відстеження, призначений для того, щоб візок рухався за еталонною траєкторією. Положення та швидкість візка використовуються для відстеження зворотного зв'язку. Траєкторія положення, як правило, базується на класичній схемі швидкості, яка отримується за допомогою методів оптимального управління або вхідних технологій формування з відкритим циклом. Поділ завдань управління, боротьби з поворотом та відстеження, дозволяє конструктору обробляти різні траєкторії відповідно до робочого середовища. Як правило, довжина кабелю враховується в конструкції контролера проти коливання. Однак ефектом маси навантаження нехтують у конструкції контролера відстеження.

Підняття вантажу (підйом) під час передачі потрібно лише для уникнення перешкод. Цей рух є повільним, і, отже, коливання довжини кабелю можна розглядати як порушення системи. Потім ефект варіацій довжини кабелю досліджується за допомогою моделювання, щоб переконатися, що продуктивність не погіршується. Однак є небагато досліджень, які включають підйом в конструкції контролерів. Вплив ваги навантаження на динаміку зазвичай ігнорується. З цих досліджень ми виявили, що для дуже великих навантажень, порівняно з вагою візка, продуктивність системи погіршується, якщо вага навантаження не включена в конструкцію контролера.

## 2. ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

### 2.1 Автоматизація електромеханічної системи козлового крана

У базовій електромеханічній системі крана не забезпечується позиціонування вантажу і самого крана в необхідне положення без додаткових багаторазових включень приводу. Це призводить до значних ударних впливів на переміщуваний вантаж і несучої конструкції крана.

Перш ніж автоматизувати електромеханічну систему крана, необхідно удосконалювати технологічний процес переміщення вантажу. В деяких роботах проводять основну операцію по вертикальному переміщенню вантажу, розділивши її за часом на два етапи. На першому етапі включають електродвигун механізму підйому вантажів на низьку частоту обертання ротора (15-30 хв-1). За 1-2 оберти ротора відбувається вибір слабини каната і люфту в кінематичній передачі механізму практично без механічного навантаження на валу електродвигуна.

Після цього починають другий етап переміщення вантажу шляхом плавного підвищення частоти обертання ротора до номінальної. Команди про перехід на перший і другий етапи переміщення вантажу кранівнику подає стропальник, який перебуває біля закріпленого вантажу. Наступні операції проводять за відомою технологією. Всі ці зміни вимагають створення керуючого пристрою, який буде задавати швидкість на обох етапах підйому через контролер і відповідні датчики. Як показують дослідження в більшість параметрів руху вантажу і вантажозахоплювального пристрою залежать від маси вантажу, що піднімається. Тому актуальним є введення в електромеханічну систему крана (систему підйому) датчика ваги вантажу.

Тоді автоматичне керування електроприводом підйому буде засновано на тому, що отриману інформацію від датчика перетворюють в цифрові коди, на підставі яких обчислюють і формують імпульс, що забезпечує зміну



швидкості переміщення вантажу відповідно до заданого закону регулювання на обох етапах підйому.

Датчик ваги це кільце відомих розмірів і ваги, яке спирається на тензомери, укріплені на кільці. Вузли монтажу і ваговий термінал дадуть можливість сполучення з бортовим устаткуванням крана компютером через протоколи RS-234, 485 або USB. Для цих цілей найбільш відповідними є напівпровідникові тензомери.

Дротові і фольгові тензомери малоприматні в умовах роботи з динамічними навантаженнями. При підйомі вантажу мають місце механічні напруги, які уловлюються тензомерами. При зміні їх геометричних розмірів під дією зовнішніх сил зміну його опору можна описати (2.1)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1 + 2\mu) \cdot \Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.1)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона;  $\Delta l / l$  - геометрична зміна розмірів каната;  $\Delta \rho / \rho$  - зміна питомої опору тензомера. При цьому опір тензомера також залежить від ряду параметрів (температура навколишнього середовища, параметри ненагруженого тензомера, кристалічна напрямок і тд.). Для розглянутого датчика для вимірювання розтягувань використані тензомери з кремнію р-типу (при нормальній температурі  $T = 298$  К), поведінка яких описується виразом (2.2)

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{298}{T} C_1(\rho_0) \varepsilon + \left(\frac{298}{T}\right)^2 C_1(\rho_0) \varepsilon^2 \quad (2.2)$$

де  $T$  - температура навколишнього середовища;  $C_1, C_2$  - кути нахилу кривої деформації каната;  $\varepsilon$  - деформація каната;  $\rho_0, R_0$  - параметри ненагруженого тензомера. Для кремнію р-типу (2.2) має вигляд (2.3)

$$\frac{\Delta R}{R_0} = 119,5 \varepsilon + 4000 \varepsilon^2 \quad (2.4)$$

На (рис. 2.1) приведена функціональна схема вимірювальної системи з чотирма тензорезисторами для вимірювання деформації каната і елементів металоконструкції в залежності від величини вантажу, джерелом живлення, підсилювачами і АЦП.

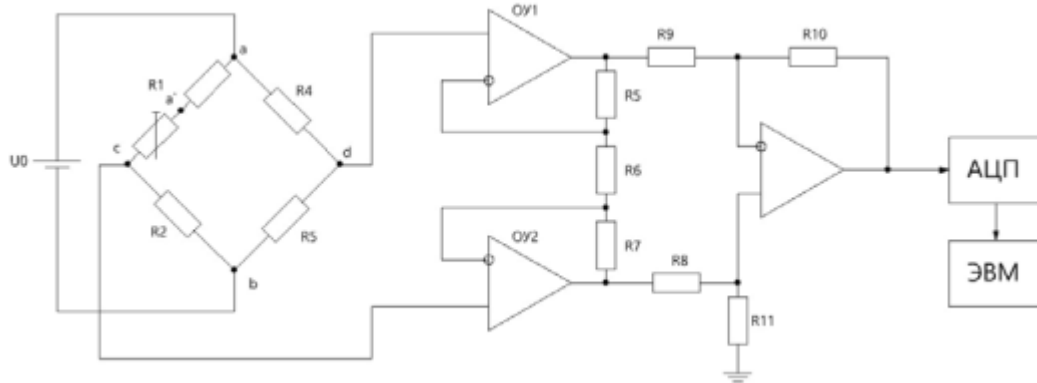


Рисунок 2.1 - Функціональна схема датчика ваги.

Співвідношення  $R_a / R_1$  і  $S_0 R_a / R_1$  ( $S_0$  - чутливість мостової схеми) дозволяють визначити положення полюса нелінійності шкали датчика і розташування кривої  $I_y = f(\Delta R / R_1)$ , де  $I_y$  - струм у вимірювальній діагоналі мостової схеми ( $\chi = R_y / R_1$ ). При побудові кривої  $I_y = f(\Delta R / R_1)$  слід оцінити її робочу ділянку і положення полюса F. Координати полюса можуть бути різні при його перебуванні для різних точок бажаної характеристики моста. Полюс F слід визначати по найбільш важливого ділянці бажаної характеристики моста. Для цього необхідно отримати реальну характеристику моста і по ній за допомогою зворотного побудови знайти реальну залежність  $i_y(\epsilon)$ , яка не буде прямолінійною. При деформації тензодатчика зміна його опору є значним, тому значним буде і зміна струму що проходить через датчик.

Для недеформованого тензодатчика:

- для I виду симетрії 1

$$I_1 = \frac{U_0}{2R_1} \quad (2.4)$$

- для II виду симетрії

$$I_1 = \frac{U_0}{(1+n)R_1} \quad (2.5)$$

Тоді співвідношення струму через деформований і не деформований датчик складе:

- для I виду симетрії

$$\frac{I_1'}{I_1} = \frac{1+n+2\chi}{\chi(2+\Delta R/R_1)+1+n+(\Delta R/R_1)(1+n/2)} \quad (2.6)$$

- для II виду симетрії

$$\frac{I_1'}{I_1} = \frac{1+n+2\chi}{\chi(1+n+\Delta R/R_1)+2n+(\Delta R/R_1)(2+n)/(n+1)} \quad (2.7)$$

На (рис.2) наведені графіки залежності  $I_1' / I_1 = f(\Delta R / R_1)$  побудовані за формулами (2.6) і (2.7) і криві  $(I_1' / I_1)_{\text{доп}} = f(\Delta R / R_1)$ , з умов сталості допустимої потужності розсіювання в датчику (2.8).

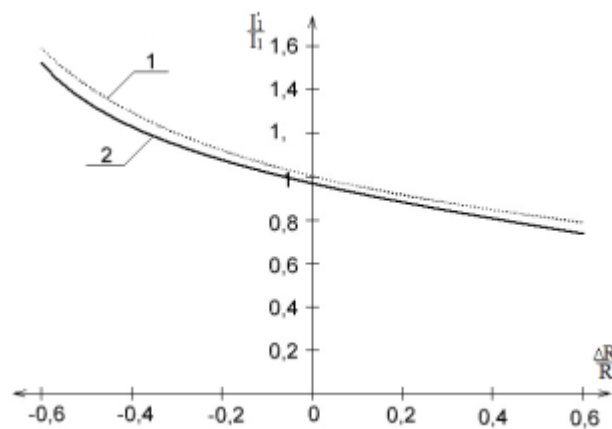


Рисунок 2.2. - Залежність  $(I_1' / I_1) = f(\Delta R / R_1)$ .

## 2.2. Розрахунок параметрів регулювання приводу крану

Для автоматизованого руху крану, зокрема з метою забезпечення процесу усунення коливань було проведено моделювання роботи самого приводу та застосовано розрахункові моделі та теорію автоматичного керування.

Функціональна схема розробленої системи регулювання приведена на рис. 2.3.



*Розрахункова схема об'єкту керування*

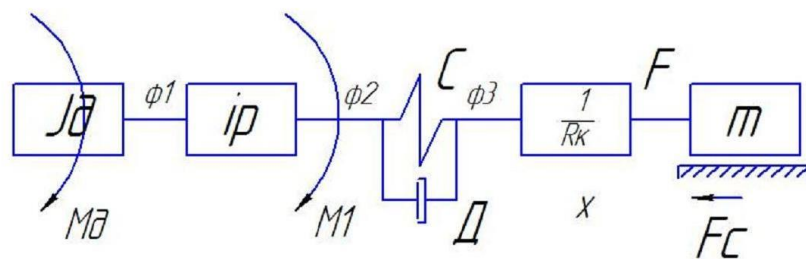


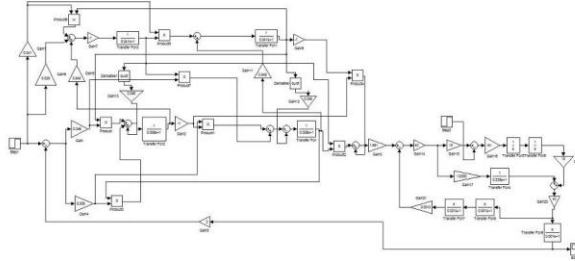
Рисунок 2.3 – Функціональна схема САР для крану.

Після визначення структури САР необхідно було провести моделювання її роботи. Моделювання проводили в пакеті Matlab з використанням модуля Simulink. Модель об'єкту нашого керування приведено на рис. 2.4.

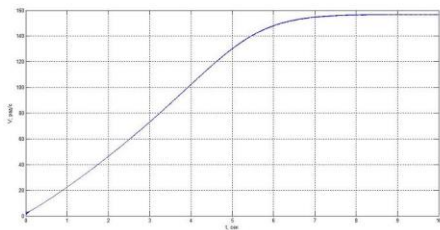
*Структурная схема объекту керування*



*Модель объекту керування*



*Перехідний процес без навантаження*



*Перехідний процес з навантаженням*

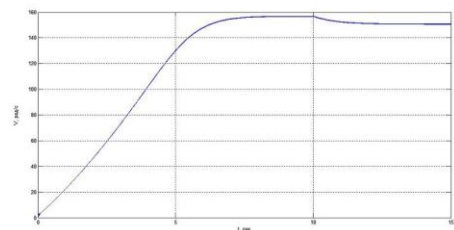
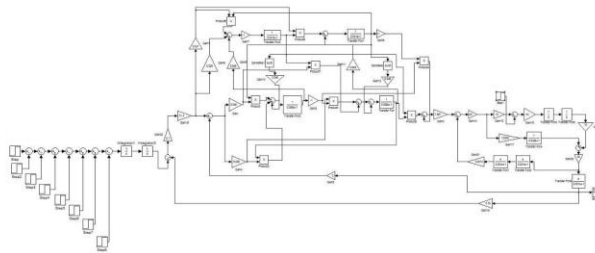


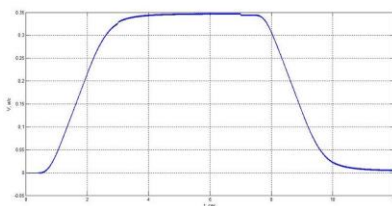
Рисунок 2.4 – Модель об'єкту управління та перехідні процеси в ньому.

Далі було змодельовано роботу САК з регульованим задатчиком руху, результати якого приведено на рис 2.5.

*Обчислювальна модель САК з задатчиком*



*Обчислювальний процес без навантаження*



*Обчислювальний процес з навантаженням*

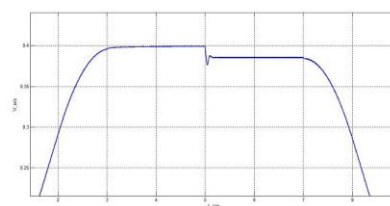
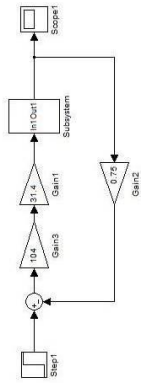


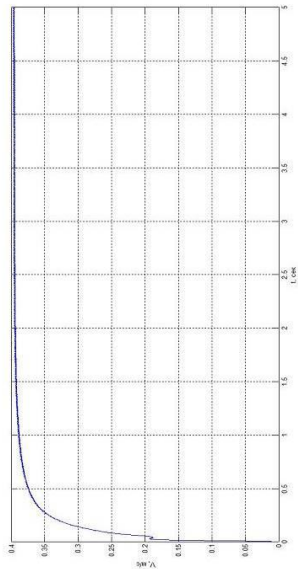
Рисунок 2.5 – Моделювання роботи САК з задавачем.

Далі було змодельовано процес роботи системи для пересування візка з вантажем (рис. 2.6).

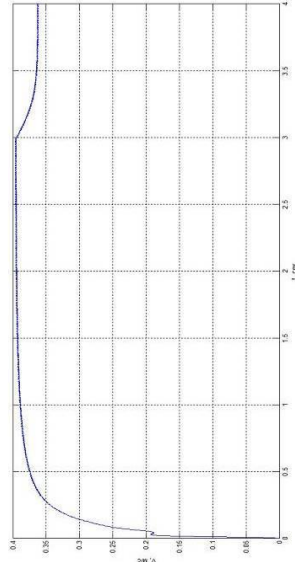
*Обчислювальна модель САР руху візка*



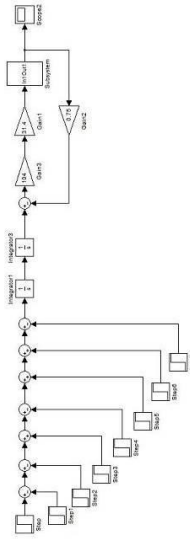
*Перехідний процес з регулятором*



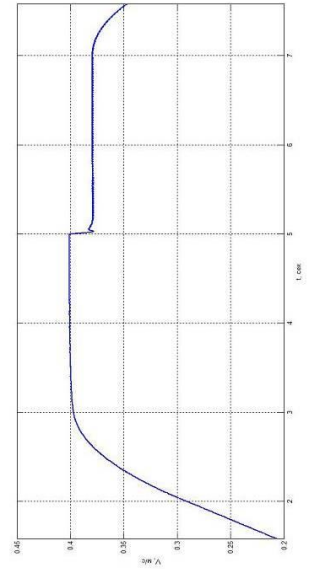
*Перехідний процес з регулятором і навантаженням*



*Модель САР з задатчиком*



*Перехідний процес с навантаженням*



*Перехідний процес без навантаження*

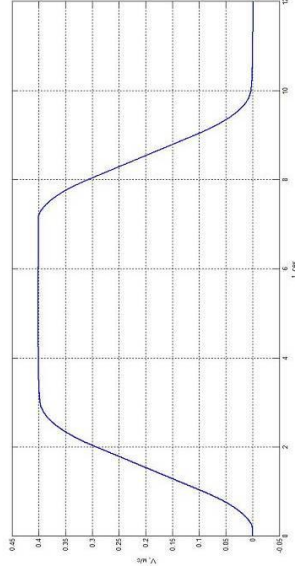


Рисунок 2.6 – моделювання роботи системи для пересування візка.

Загальний вигляд силової схеми для під'єднання двигунів керування краном приведено на рис 2.7.

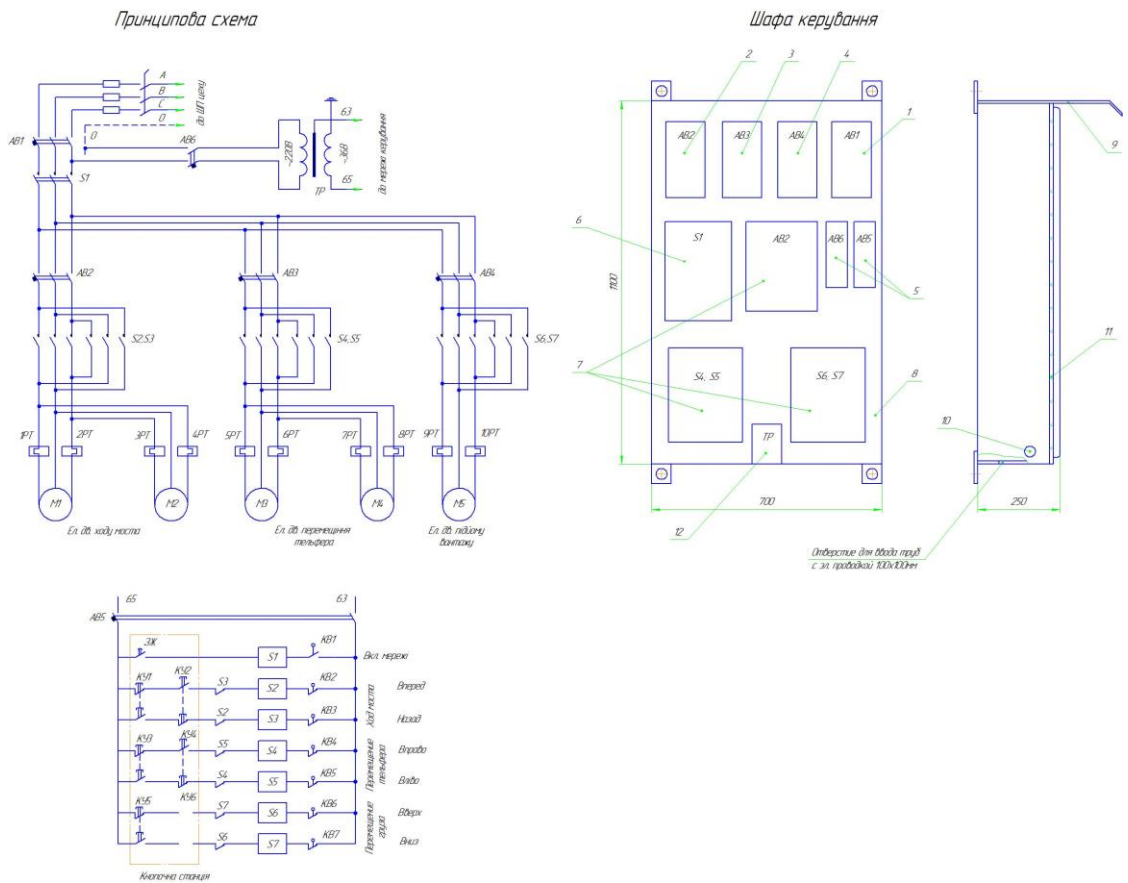


Рисунок 2.7 – Принципова схема приводу крану

## 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1 Моделювання руху крану та визначення налаштувань регуляторів

Є багато практичних проблем, які вимагають правильного вирішення системи управління. Багато з цих проблем стосуються дуже складних динамічних систем, які часто включають нелінійності, але можуть бути апроксимовані більш простими залежностями, такі як контейнерні крани козлового типу, що використовуються для завантаження та розвантаження суден у портах. Маса контейнера, підвішеного за допомогою тросу, який пересувається вздовж рейки, представляє собою подібну динаміку до системи каретки та маятник.

Ця проблема сконфігурована як випадок недостатньої деформації системи: необхідна для управління двома змінними, положенням каретки та масою за допомогою одного вхідного сигналу, сили, прикладеної до каретки.

Крім того, існують суворі вимоги до продуктивності: висока швидкість реагування (не можна витратити час на навантажувально-розвантажувальні роботи) та відсутність коливань у положенні маси (рух вперед і назад контейнера може бути небезпечним).

Контейнерні крани - це великі машини, які зазвичай використовуються в портових перевантажувальних вузлах для переміщення вантажів, ефективність яких, безпосередньо пов'язана з ефективною швидкістю крана, сильно впливає на продуктивність загального терміналу.

Для оптимізації продуктивності крана з точки зору мінімізації робочого часу експлуатації, точна характеристика динамічної реакції контейнерів на етапі підйому / опускання маневрування є важливою вимогою.



Більше того, склади часто розташовані у вітряних районах, що характеризуються появою поривних фронтів, що може вплинути на ефективність роботи кранів і, іноді, порушити безпеку працівників.

У літературі доступні різні дослідження щодо динаміки контейнерних кранів підходи до моделювання (наприклад, площинні або тривимірні моделі з пружними / жорсткими підйомними тросами), пропонується дослідити їх поведінку. Всебічна класифікація цих моделей є наведена в [5], де обговорюються додатки та обмеження різних теорій. Щоб досліджувати динамічну поведінку контейнерних кранів, за останні роки було створено кілька моделей, розроблені та запропоновані стратегії контролю для подолання потенційних проблем, що виникають від неконтрольованих коливань великої амплітуди.

Дослідження маятникових контейнерів були вперше проведені в [6], де досліджували динамічну поведінку просто підвішених предметів і був представлений обширний огляд теорії. У тій же роботі, стратегія управління, на основі запрограмованих фаз прискорення / уповільнення руху візка і числові результати порівнювали з експериментами, проведеними на масштабній моделі. Корисне навантаження коливання також можуть збуджуватися на кранах, від руху морської хвилі або вітрового пориву, які можуть індукувати коливання підвішеного контейнера.

Індуковані хвилі коливання були описані в [7], де був вивчений планарний рух контейнера на один ступінь свободи, створена модель крана та запропонований контролер зворотного зв'язку із збуренням за позицією. Чисельне моделювання, спрямоване на вивчення ефектів нелінійності, що виникають від механічного тертя та опору повітря, були проведені в [8], де результати також були експериментально перевірено. У [9] - [10] моделювання різноманітних маятникових конструкцій (таких як козлові крани) було запропоновано, і відповідні стратегії контролю були ретельно вивчені, виділивши обчислювальні наслідки моделей при реалізаціях управління. Лабораторна 1/10 масштабна модель козлового крана була

використана в [9] для перевірки ефективності лінеаризованого зворотного зв'язку методу управління, тоді як у [10] обговорювали одно- та багатокабельні моделі козлових кранів. Основною метою управління недостатньо активованою крановою системою є транспортування корисного навантаження в точному місці. Однак це дуже важко реалізувати через те, що корисне навантаження може викликати а маятниковий маховий рух.

Сьогодні в процесі управління понад 95% системи управління мають тип ПД, більшість циклів насправді є управлінням П. ПД-контролери сьогодні зустрічається у всіх областях, де використовується контроль. Контролери бувають різних форм. Існують окремі системи в коробках на одну або кілька ланок, які виготовляються компанією сотні тисяч на рік. ПД-контроль є важливим компонентом розподіленої контролюючої системи.

Контролери також вбудовані в багато систем управління спеціального призначення. ПД управління часто поєднується з логікою, послідовними функціями, селекторами та простими функціональними блоками для побудови складних систем автоматизації, що використовуються для виробництва енергії, транспортування та виробництва. Багато складних стратегій управління, таких як модельний прогнозний контроль, також організовані ієрархічно. ПД-контроль використовується на найнижчому рівні; багатоваріантний контролер дає задані значення контролерам нижчого рівня.

Символьна модель.

Модель системи кранового типу бере початок з моделі, в якій стискається пружина в точці, де застосовується сила для руху каретки по рейці, як показано на рис. 3.1, і справжнього козлового крана, як показано на рис. 3.2.



Рисунок 3.1 – Представлення початкової системи моделювання крану.



Рисунок 3.2 – Реальний козловий кран

Для цієї системи була розроблена модель Лагранжа, в якій спочатку розраховуються кінетична та потенційна енергії. Для цієї моделі було прийнято:  $M$  - маса каретки (предмета на рейці),  $m_1$  маса крайньої частини маятника,  $m_2$  маса штока маятника,  $\theta$  кут між вертикаллю та маятником, маятник,  $l$  довжина,  $x$  зміщення каретки.

### **Аналіз кінетичної енергії**

Кінетична енергія визначається

$$T = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.1)$$

де  $m$  - маса,  $v$  швидкість, а  $T$  - кінетична енергія тіла. У цьому випадку є два тіла, візок та маятник. Кінетична енергія візка становить,

$$T_1 = \frac{1}{2} M \dot{x}^2, \quad (3.2)$$

поступальна кінетична енергія крайнього положення маятника,

$$T_2 = \frac{1}{2} m_1 \left( l^2 \dot{\theta}^2 + 2l\dot{\theta}\dot{x} \cos(\theta) + \dot{x}^2 \right), \quad (3.3)$$

поступальна кінетична енергія стержня маятника,

$$T_3 = \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{1}{4} l^2 \dot{\theta}^2 + l\dot{\theta}\dot{x} \cos(\theta) + \dot{x}^2 \right), \quad (3.4)$$

а енергія обертання крайньої частини маятника становить,

$$T_4 = \frac{1}{24} m_2 \dot{\theta}^2 l^2, \quad (3.5)$$

де,  $r$  - радіус кулі (край маятника).

$$T_5 = \frac{1}{2} m_1 \dot{\theta}^2 \left( \frac{2}{5} r^2 \right), \quad (3.6)$$

### Потенційна енергія

Ця система зберігає потенційну енергію,

$$U_1 = \frac{1}{2} K x^2, \quad (3.7)$$

де,  $K$  - постійна пружності пружини. Потенційна енергія маятника становить,

$$U_2 = -g l \cos(\theta) \left( m_1 + \frac{m_2}{2} \right), \quad (3.8)$$

де  $g$  - значення гравітаційного прискорення.

### Рівняння Ейлера-Лагранжа

Визначений поліном Лагранжа будь-якої системи,

$$\mathcal{L} = T - U, \quad (3.9)$$

де  $T$  - кінетична енергія, а  $U$  - потенціал, отже, для цієї моделі це:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 - U_1 - U_2 \\ &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_2 \left( \frac{1}{4} l^2 \dot{\theta}^2 + l\dot{\theta}\dot{x} \cos(\theta) + \dot{x}^2 \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} m_1 \left( l^2 \dot{\theta}^2 + 2l\dot{\theta}\dot{x} \cos(\theta) + \dot{x}^2 \right) \\ &\quad + \frac{1}{24} m_2 l^2 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{\theta}^2 \left( \frac{2}{5} r^2 \right) \\ &\quad + g l \cos(\theta) \left( m_1 + \frac{m_2}{2} \right) - \frac{1}{2} K x^2. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Рівняння Ейлера-Лагранжа задаються наступним рівнянням

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} = 0, \quad (3.11)$$

де  $q$  означає узагальнені ступені свободи (DOF), у цьому випадку є два DOF,

$\theta$  та  $x$ , отже, з рівняння (3.11),

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = 0. \quad (3.13)$$

З (3.12) та (3.13) отримано рівняння Ейлера-Лагранжа,

$$\ddot{\theta} l^2 A + [\ddot{x} l \cos(\theta) + g l \sin(\theta)] B = 0 \quad (3.14)$$

$$\ddot{x} C - [\ddot{\theta} l \cos(\theta) - l \dot{\theta}^2 \sin(\theta)] B + K x = 0, \quad (3.15)$$

де,

$$\begin{aligned} A &= \left( m_1 + \frac{m_2}{3} \right) + \frac{2 m_1 r^2}{5} \\ B &= m_1 + \frac{m_2}{2} \\ C &= m_1 + m_2 + M \end{aligned} \quad (3.16)$$

### Чисельна модель

Для визначення числової моделі постійні значення замінюються,

Таблиця 3.1

Значення усіх констант

Constant	Value
$l$	= 0.2 [m]
$g$	= 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$K$	= 100 [N/m]
$m_1$	= 0.088338025 [Kg]
$m_2$	= 0.022245336 [Kg]
$M$	= 0.548069759 [Kg]
$r$	= 0.02 [m]

Підставивши ці значення у рівняння (3.14) та (3.15),

$$0.003844\ddot{\theta} + 0.19514\sin(\theta) + 0.01989\ddot{x}\cos(\theta) = 0 \quad (3.19)$$

$$0.6586\ddot{x} - 0.01989\dot{\theta}^2\sin(\theta) + 0.01989\ddot{\theta}\cos(\theta) + 100x = 0 \quad (3.20)$$

Як видно, рівняння (3.19) та (3.20) пов'язані, тобто обидва залежать від двох змінних до їх другої похідної,  $\theta''$ ,  $x''$ , отже, початкові умови залежать від початкової енергії, яка показує тоді ця система, щоб знайти початкові умови, які можуть прийняти, бере частину потенційної енергії, якою є енергія, яка акумулює пружину та маятник, коли  $\theta$  відрізняється від нуля. Загальна потенційна енергія моделі становить

$$\begin{aligned} U_T &= U_1 + U_2 \\ &= -gl\cos(\theta)(m_1 + \frac{m_2}{2}) + \frac{1}{2}Kx^2, \end{aligned} \quad (3.21)$$

заміна числових значень констант,

$$U_T = -0.19514\cos(\theta) + 50x^2. \quad (3.22)$$

Існують кінцеві енергетичні значення, які могли регулювати систему, однак, нам потрібні лише ті, хто не перетворює модель на хаотичну систему, оскільки вона припускає (до цього моменту) з консервативного шляху, тобто, що ніякого виграшу чи втрати енергії а отже, наявний рівень енергії зумовлений початковим положенням маятника та стисненням пружини.

Для пружини можна вважати значення від -0,1 до 0,1, а для кутового положення маятника  $-\pi$  та  $\pi$ . З цих значень можна зобразити контури для значень енергії 0, 0,1 і 0,2, враховуючи, що система відліку (нульова потенціальна енергія) розташована в центрі обертання маятника. На рис. 3.3 показані рівні потенційної енергії для системи, а на рис. 3.4 - контури для трьох різних рівнів енергії.

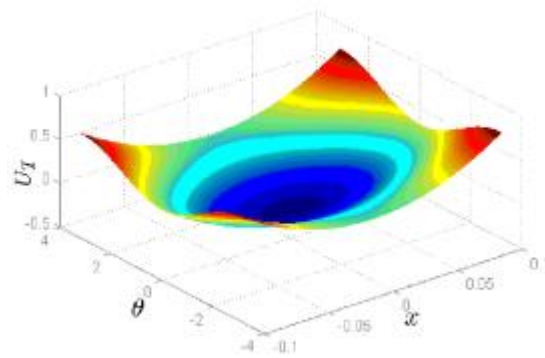


Рисунок 3.3 - Графік рівня енергії для системи.

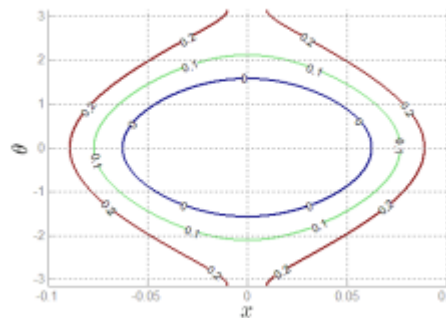


Рисунок 3.4 - Контури рівнів енергії 0, 0,1 та 0,2.

Тепер ви можете взяти нульовий рівень енергії, оскільки вона є стабільною кривою, повністю закритою (як графік на рис. 3.3), так що ця крива бере значення значень початкових умов для вирішення пов'язаних диференціальних рівнянь (3.19) та (3.20). Для зручності та простоти значенням приймається нуль,  $\theta = 0$ , для якого  $x = 0,0624$ . Так що початкові умови такі

Таблиця 3.2

Conditions	Value
$x(0)$	= 0.0624
$\dot{x}(0)$	= 0
$\theta(0)$	= 0
$\dot{\theta}(0)$	= 0

Чисельне рішення було виконано в MATLAB, ввівши рівняння (3.19) та (3.20), а потім наступні команди

```
V = odeToVectorField(eq1, eq2);
M = matlabFunction(V, 'vars', {'t', 'Y'});
sol = ode45(M, [0 10], [0.0624 0 0 0]);
```

де eq1, eq2, представляють числові рівняння, а sol, системне рішення, в цьому випадку MATLAB повертає структуру (структуру), в якій містяться вектор часу та матриця з чотирьох рядків, кожен з яких є рішенням змінних, порядок яких дорівнює  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\theta$  та  $\dot{\theta}$  відповідно.

Рішення для  $\theta$  показано на рис. 3.5, а  $x$  на рис. 3.6.

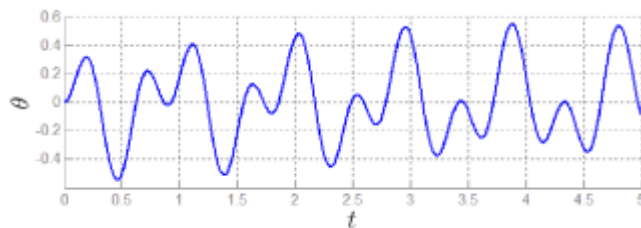


Рисунок 3.5 -  $\theta$  рішення для перших 5 секунд

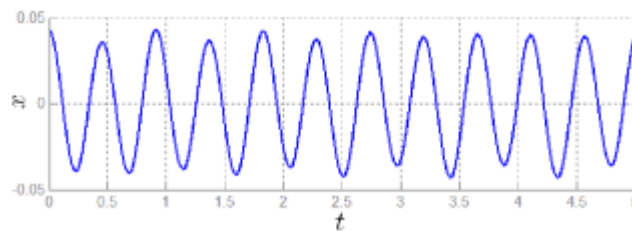


Рисунок 3.6 -  $x$  рішення для перших 5 секунд

Для перевірки отриманих результатів система була виконана в SolidWorks і імітовано їх переміщення з урахуванням початкових умов, при порівнянні результатів, отриманих аналітично із моделюванням SolidWorks, спостерігається чудовий підхід, так що ви можете мати впевненість у розрахунках, виконаних з Динаміка Лагранжана. Порівняльний графік показаний на рис. 3.7.

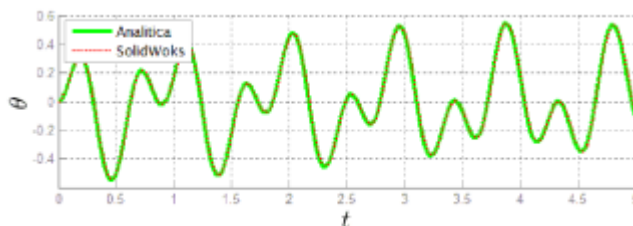


Рисунок 3.7 - Порівняльний графік між аналітичним рішенням та моделюванням у SolidWorks.



## Коливання

Теорія малих коливань знайшла широке фізичне застосування в акустиці, молекулярних спектрах, коливаннях механізмів та пов'язаних електричних ланцюгах. Якщо відхилення системи від умов стабільної рівноваги досить малі, рух, як правило, можна описати як рух системи зчеплених лінійних гармонійних генераторів.

З наближеннями для малих кутів

$$\sin(\theta) \approx \theta; \quad \cos(\theta) \approx 1; \quad \theta \dot{\theta}^2 \approx 0, \quad (3.23)$$

кінетична та потенційна енергії

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 \left[ m_1 l^2 + \frac{7}{12} m_2 l^2 \right] + \frac{1}{2} \dot{x}^2 [m_2 + M] + \dot{\theta} \dot{x} l \left[ m_1 + \frac{1}{2} m_2 \right] \quad (3.24)$$

$$U = \frac{1}{2} K x^2 + \frac{1}{2} \theta^2 g l \left( m_1 + \frac{1}{2} m_2 \right). \quad (3.25)$$

З їхнього визначення видно, що  $U$  симетричні, тобто  $U_{ij} = U_{ji}$ . Подібне розширення по ряду можна отримати для кінетичної енергії. Оскільки узагальнені координати не враховують час явно, кінетична енергія є однорідною квадратичною функцією швидкості. Вираження рівнянь (3.24) та (3.25) матричної форми

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} l^2 (m_1 + \frac{7}{12} m_2) & l (m_1 + \frac{1}{2} m_2) \\ l (m_1 + \frac{1}{2} m_2) & m_2 + M \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} g l (m_1 + \frac{1}{2} m_2) & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

де матриці (3.26) та (3.27) відповідають наступним двох рівнянням

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \mathbf{T}_{ij} \dot{\theta} \dot{x} \quad (3.28)$$

$$\mathbf{U} = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{ij} \theta x. \quad (3.29)$$

### Частоти вільних вібрацій і нормальні координати

Визначити частоти коливань дозволяє рівняння

$$|\mathbf{U} - \omega^2 \mathbf{T}| = 0, \quad (3.30)$$

де,  $\omega$  являє собою власні значення, для цього випадку частоти вирішують рівняння (3.30) з очевидними рішеннями

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{g(M + m_2) + Kl + \sqrt{g^2(M + m_2)^2 + Kl(Kl + 4m_1g - 2Mg)}}{l(2M - 2m_1 + m_2)}} \quad (3.31)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g(M + m_2) + Kl - \sqrt{g^2(M + m_2)^2 + Kl(Kl + 4m_1g - 2Mg)}}{l(2M - 2m_1 + m_2)}} \quad (3.32)$$

якщо константа пружини  $K$  і маса  $M$  дорівнюють 0, не визначали б змінну  $x$ , а частота  $\omega_2$  буде

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{g}{l} \frac{2m_2}{(m_2 - 2m_1)}} \quad (3.33)$$

Рівняння (3.33) дозволяє чітко бачити, що відповідає гармоніці осцилятора. Тепер якщо маси  $m_1$  і  $m_2$  дорівнюють нулю, частота  $\omega_1$  буде зведена до

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (3.34)$$

що також відповідає частоті гармонічного генератора. Через власні і відомі значення (власні частоти) вектори  $\xi$  нормальні режими коливань обчислюються, відповідно до цього ми

$$(\mathbf{U} - \omega_k^2 \mathbf{T}) \mathbf{a}_k = 0 \quad (3.35)$$

$$\mathbf{a}_k^T \mathbf{T} \mathbf{a}_k = 1, \quad (3.36)$$

де,

$$\mathbf{a}_k = \begin{bmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \end{bmatrix} \quad \text{with } k = 1, 2 \quad (3.37)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2]. \quad (3.38)$$

Тут  $\mathbf{A}$  - матриця власних значень, а рівняння (3.36) забезпечується ортогональністю. Нормальні режими коливань визначаються з рівняння (3.39), це

$$\boldsymbol{\xi} = \mathbf{A}^T \mathbf{T} \boldsymbol{\eta}, \quad (3.39)$$

з

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \theta \\ x \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Нормальними режимами коливань є

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2} B}{2\sqrt{A}} \\ -\frac{\sqrt{2} B}{2\sqrt{A}} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

де  $A$  і  $B$  визначені як

$$A = 2M [g^2 + l^2\omega_1^4 - 2gl\omega_1^2] + 2m_2g [g - l\omega_1^2] + 2\omega_1^2 m_1 l [2g - l\omega_1^2] \quad (3.42)$$

$$B = 2Mx [g - l\omega_2^2] + m_2 [2gx - lx\omega_2^2 + \theta gl] + 2m_1 l [x\omega_2^2 + \theta g]. \quad (3.43)$$

Ми говорили поки що лише про коливання вздовж осі; також будуть нормальні режими вібрації, перпендикулярні осі. Повний набір нормальних режимів, природно, важче визначити, ніж поздовжні, оскільки загальний рух у всіх напрямках відповідає більшим ступеням свободи.

### ПД-контроль.

Багато дослідників використовують як модель складні нелінійні рівняння або навіть часткові диференціальні рівняння. Але, незалежно від моделі, яку вони використовують, остаточний закон управління повинен бути заданий як функція прискорення візка або повинен бути отриманий через динаміку руху візка.

У роботі інших авторів пропонується експеримент із імітації управління козловим краном, що вивчає концепції напівциклового позиційного управління прямою передачею та пропорційне, інтегративне та похідне (PID) управління. Розглядаються дві цілі управління: відстеження заданих значень та відмова від порушень навантаження. Завдання відстеження заданого значення в цій задачі полягає в переміщенні підвішеного вантажу з початкового положення в задане останнє положення.

У [10] представлена нова процедура проектування вхідних формувачів для козових кранів. Процедура враховує унікальні властивості козових кранів, такі як одномодова динаміка, відомий діапазон частот та стандартний період уповільнення. Нові формувачі мають фіксовану тривалість, завдяки чому вони дають постійний період уповільнення.

Враховуючи фіксовану тривалість формувача, міцність формувачів максимізується. Новий метод формування був реалізований на козловому крані в Технологічному центрі річки Саванна. Експериментальні результати показують, що метод значно зменшує залишкові коливання і тісно відповідає теоретично передбачуваним характеристикам. Для управління вищеописаною системою пружина видаляється, яка діє на масу, розміщену на рейці.

Сила визначається, але не така, як її надає пружина, оскільки це буде змінна, що контролюється. Завдання полягає в тому, щоб перенести масу маятника з однієї точки в іншу з заданою відстанню, щоб вона коливалась, тому відповідь буде затухаючою. Потім в [11] ця стаття розширилася, включивши ПД-регулятор для контролю кута коливання маятника.

Результати реагування реакції поворотної кранової системи на контролери представлені в часовій та частотній областях. Ефективність схем управління оцінюється з точки зору рівня зменшення коливання, можливостей відстеження кута повороту та специфікацій часової реакції. Для управління вищеописаною системою пружина видаляється, яка діє на масу, розміщену на рейці. Сила визначається, але не така, як її надає пружина,

оскільки це буде змінна, що контролюється. Мета полягає в тому, щоб перенести масу маятника з однієї точки в іншу з заданою відстанню, щоб вона коливалась, тому відповідь буде затухаючою.

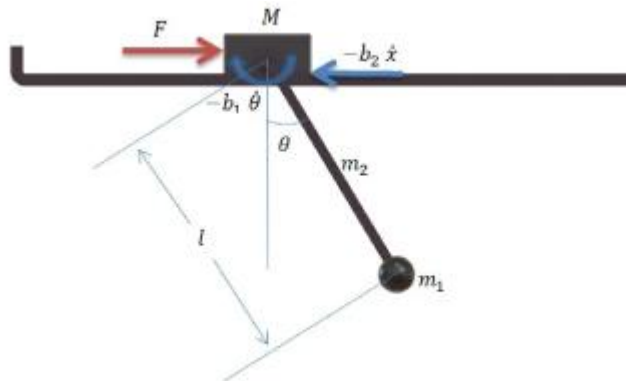


Рисунок 3.8 - Змінні моделі ПД-контролю.

З системи, описаної на рис. 3.8, динамічна модель визначається з рівнянь Ейлера-Лагранжа для узагальненої сили, це

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2 \quad (3.44)$$

де  $q_1 = \theta$ ,  $q_2 = x$ ,  $Q_1 = Q_\theta$  і  $Q_2 = Q_x$ ; ці два останні представляють узагальнені сили над системою, яка більше не буде консервативною, через існування зовнішньої сили  $F$  і тертя передбачається по осі маятника ( $b_1 \dot{\theta}$ ) та контакті каретки з рейкою ( $b_2 \dot{x}$ ), згідно з рис. 3.8. З цією варіацією нові рівняння Ейлера-Лагранжа є

$$\ddot{\theta} D + [\ddot{x} l \cos(\theta) + g l \sin(\theta)] B = -b_1 \dot{\theta} \quad (3.45)$$

$$\ddot{x} C + [\ddot{\theta} l \cos(\theta) + g l \sin(\theta)] B = F - b_2 \dot{x} \quad (3.46)$$

де,

$$D = \left( \frac{2}{5} m_1 r^2 \right), \quad (3.47)$$

і  $B$ ,  $C$  - однакові члени у рівняннях (3.17) та (3.18) відповідно. Для управління системою,

ви повинні спершу знайти простір станів,

$$\mathbf{Z} = \begin{Bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{Bmatrix}, \quad (3.48)$$

такий, що похідна від  $\mathbf{Z}$  є

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{Bmatrix} Z_2 \\ \frac{l B \cos(Z_1) \epsilon_1 + C \epsilon_2}{\epsilon_3} \\ Z_4 \\ \frac{(l^2 B + D) \epsilon_1 + (l B \cos(Z_1)) \epsilon_2}{-\epsilon_3} \end{Bmatrix}, \quad (3.49)$$

де,

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= F - b_2 \dot{x} + \dot{\theta}^2 l B \sin(Z_1), \\ \epsilon_2 &= b_1 \dot{\theta} + g l B \sin(Z_1), \\ \epsilon_3 &= l^2 B^2 \cos^2(Z_1) - l^2 B C - D C. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Рівняння в просторі станів (49) були реалізовані в Simulink для отримання природну відповідь системи на кроковий вхід у  $F$  і згодом намалювати бажану траєкторію. В передбаччваній схема Simulink, значення для  $b_1 = 0,1$  та  $b_2 = 0,5$ ; тому що система є розмірно малою, вхід для сили  $F$  становив  $0,1$ , протягом часу  $2$  секунди. Природний відповідь на ці значення показані на рис. 3.9 та рис. 3.10 для  $\theta$ ,  $x$  відповідно.

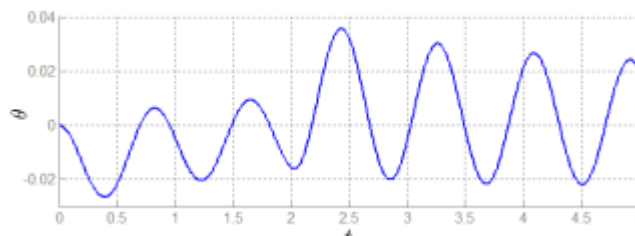


Рисунок 3.9 - Вихід на вхід  $F = 0,1$ , протягом  $2$  секунд.

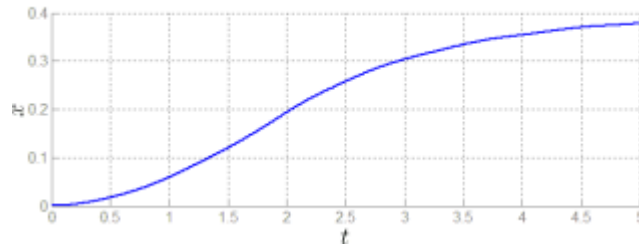


Рисунок 3.10 - Вихід на вхід  $F = 0,1$ , протягом 2 секунд.

Підходящою траєкторією змінної  $x$  є та, при якій швидкість починається і закінчується нулем, тригонометрична функція  $\tanh$ , так що функція бажаної траєкторії становить,

$$x^* = \frac{d}{2} \tanh \left[ \alpha \left( t - \frac{T}{2} \right) \right] + \frac{d}{2}, \quad (3.51)$$

де  $d$  - відстань для подорожі,  $t$  являє собою час,  $T$  - час і  $\alpha$  коефіцієнт, щоб змінювати значення нахил кривої. Запропонований тип функції більш ніж у два рази диференціюється, це гарантує безперервне прискорення на цьому шляху. Визначивши траєкторію до  $x$ , ці значення є введено до рівняння (45), і знайдено траєкторії для  $\theta$  у  $\theta'$ . Контролеру змінної  $\theta$ , налаштовані значення складають

Conditions	Value
Proportional	= 3
Integral	= 0.25
Derivative	= 0.5

а для змінної  $x$  ми

Conditions	Value
Proportional	= 0.01
Integral	= 1.7
Derivative	= 2

На рис. 3.11 показана блок-схема цієї системи,

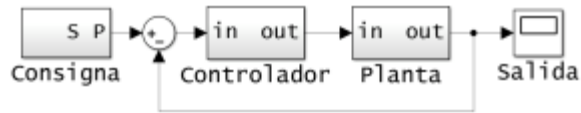


Рисунок 3.11 - Структурна схема система з включеним контролер.

в якій вже реалізований контролер, який, у свою чергу, має два PID, оскільки це дві змінні, які потребують управління. Ця діаграма представляє загальну модель системи з реалізованим контролером, в якій блок Plant (завод) являє собою механічну систему або кран видачі.

Звідси беруться покази кутового положення маятника та лінійного положення автомобіля, а також відповідних швидкостей та прискорень. Ці вихідні параметри віднімаються з консигнації (заданої точки) і визначається помилка (це просто віднімання бажаного виходу з фактичним виходом), який стає входом ПД-регулятора, посилаючи сигнал живлення двигуну, який рухає система (Завод). Вихідні дані для  $\theta$ ,  $\theta'$  та  $x$ ,  $x'$  зареєстровані на рисунках 3.12 та 3.13, відповідно

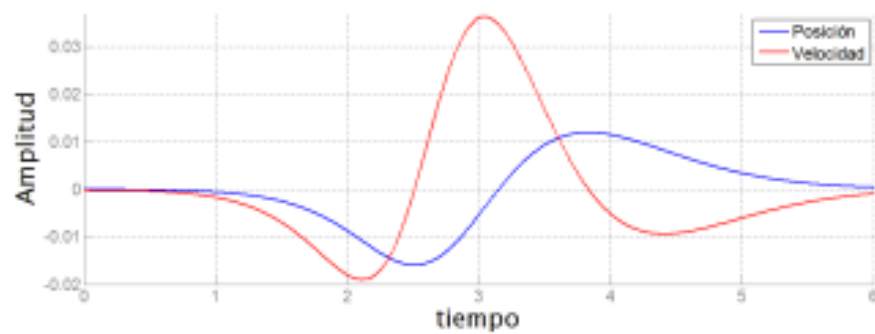


Рисунок 3.12 - Вихідні дані для  $\theta$  та  $\theta'$ .

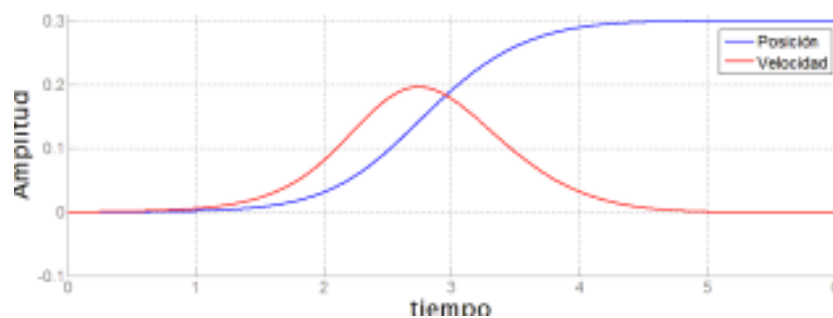


Рисунок 13 - Вихідні дані для  $x$  та  $x'$ .



Як видно з попередніх двох графіків, змінні контролюються відповідно до бажаної траєкторії. На додаток до рівня, включеного до Simulink, модель САПР була впроваджена в SimMechanics за допомогою перевірок контролерів систем контролю, у якій використовується SimMechanics-link, яка експортує модель САПР SolidWorks до MATLAB.

Що стосується положення та швидкості руху маятника, показано на рис. 3.12, то, що контролер намагається підтримувати маятник у стані рівноваги. На рис. 3.13 показано положення та швидкість візка під дією контролера, що призводить до необхідного положення візка для траєкторії. Що стосується швидкості, ми бачимо, що збільшується збільшення, коли візок стартує, і зменшується, коли вона досягає своєї нерухомості, тому машина залишається з нульовою помилковою позицією.

## **4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ХОРОНИ ПРАЦІ**

Промислова безпека, що її розглядає охорона праці, має велике значення для працюючих, оскільки саме вона контролює фізичний стан працівника, що не може не позначитись на його житті, здоров'ї, а також продуктивності праці в тому числі і у галузі радіоелектроніки. Незадовільний стан охорони праці може викликати соціальноекономічні проблеми працюючих та їх родин. Саме тому соціальноекономічне значення охорони праці полягає в наступному: зростанні продуктивності праці, збільшенні валового внутрішнього продукту, зменшенні витрат на оплату лікарняних і виплат компенсацій за шкідливі умови праці та інше. В цьому розділі проводиться аналіз небезпечних та шкідливих для людини і навколишнього середовища чинників, які виникають під час проведення дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля. Тут висвітлюються, зокрема, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, розрахунок безпечної відстані від джерела магнітного поля, технічні рішення з безпеки при проведенні дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

### **4.1. Технічні рішення з питань гігієни праці та виробничої санітарії**

#### **4.1.1. Мікроклімат та склад повітряного середовища робочої зони.**

Під мікрокліматом виробничих приміщень розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості та швидкості руху повітря, а також інтенсивності теплового випромінювання. Якщо з технічних чи економічних міркувань оптимальні норми не забезпечуються, то встановлюються допустимі величини показників мікроклімату. Вибираємо для приміщення для проведення дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля, категорію важкості робіт за фізичним

навантаженням – легка Іб. Відповідно допустимі показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні для холодного та теплого періодів року приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Допустимі показники мікроклімату в приміщенні.

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	≤0,2
Теплий		21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) в повітрі робочої зони та підлягає систематичному контролю з метою запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, що знаходяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів мають відповідати та приведені у таблиці 6.3.

Таблиця 4.3

Число іонів в 1 см<sup>3</sup> повітря приміщення під час роботи на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
позитивний	400	1500-3000	50000
негативний	600	3000-5000	50000

Для встановлення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату і складу повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) у приміщенні повинна бути розміщена система кондиціонування для теплого і опалення для холодного періодів року;
- 2) припливно-витяжна система вентиляції, а при несприятливих погодних умовах кондиціонування.

#### 4.1.2. Основні вимоги до виробничого освітлення

Для забезпечення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються до якісних та кількісних параметрів освітлення. З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля, знаходимо, що вони відповідають IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – середній та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт в. Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Нормовані значення КПО і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	v	середній	середній	400	200	200	1,5	0,9

Так як приміщення знаходиться у м. Тернопіль (друга група забезпеченості природним світлом), а світлові пройми орієнтовані за азимутом 270, то для таких обставин КЕО бде становити:

$$e_N = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%).$$

З метою забезпечення нормованих значень параметрів освітлення передбачено такі заходи: 1) за недостатнього природного освітлення у світлу пору доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення; 2) застосування загального штучного освітлення в темну пору доби.

## 4.2. Основи безпеки в надзвичайних ситуаціях

Визначення області працездатності радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Вплив різних загрозливих чинників надзвичайних ситуацій може загрожувати роботі розроблюваних перетворювачів і цим вплинути на роботу систем в складі яких вони застосовуються. В РЕА, зокрема в радіовимірювальних перетворювачах магнітного поля застосовуються елементи, до складу яких входять такі матеріали: метали, неорганічні матеріали, провідники і різноманітні органічні сполуки (діелектрики, смоли і т.д.). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв. Іонізуючі випромінювання в радіоелектронній апаратурі, викликають зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можуть відбуватися порушення роботи електричних елементів, що призводять до виходу з пристрою. Проходячи через елементи РЕА, потік гамма-випромінювань створює в них вільні носії електричних зарядів, який призводить до спрацьовування пристрою. При великих дозах випромінювання втрачають працездатність комплектуючі елементи систем радіоелектроніки і електроавтоматики. В транзисторах змінюється обернений струм і коефіцієнт підсилення, у конденсаторах знижуються напруги пробою та опір стікання, змінюється провідність і внутрішній нагрів; руйнується електрична ізоляція дротів з полімерних матеріалів. В органічних діелектричних матеріалах змінюються електрична провідність, діелектрична проникність і тангенс кута втрат. Неорганічні матеріали менш чутливі до впливу іонізуючих випромінювань. Найбільш піддаються впливу електромагнітного імпульсу (ЕМІ) системи управління і сигналізації. ЕМІ ушкоджують напівпровідникові прилади, резистори, конденсатори. ЕМІ має велику небезпеку для апаратури, добре захищеної від впливу інших загрозливих чинників. Слід також пам'ятати, що механічний захист

апаратури не захищає від впливу ЕМІ. Апаратура може бути знищена навіть знаходячись у надійних спорудах.

### **4.3 Розробка заходів по підвищенню безпеки роботи в умовах надзвичайних ситуацій.**

Дослідження, які були проведені як у нашій країні, так і за кордоном, показали, що зміна параметрів радіоелектронних пристроїв може відбуватися в широкому діапазоні потоків іонізуючих випромінювань. Тому в багатьох випадках при експлуатації виникає необхідність вживати додаткові заходів по підвищенню радіаційної стійкості роботи радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля. Головними заходами щодо підвищення радіаційної стійкості є: застосування в апаратурі радіаційностійких елементів і матеріалів, спеціальних радіаційних екранів або активного захисту від впливу потоків заряджених частинок. При імпульсному впливі іонізуючих випромінювань, крім перерахованих способів використовують: застосування схем, мало критичних до змін електричних параметрів; зниження напруги живлення на аноді і збільшення від'ємної напруги зсуву сіток газорозрядних приладів; застосування пристроїв, які містять додаткові радіотехнічні схеми на період впливу радіації; збільшення відстані між елементами, які знаходяться під навантаженням і інші. В захисті від іонізуючого опромінення використовують алюмінієві сплави, леговані елементами з високим атомним номером (лантаноїдами і рідкоземельними елементами), сплави на основі тугоплавких і рідкоземельних елементів і багатошарові матеріали. Для боротьби з впливом іонізуючого випромінювання можна використати новітній, що полягає в захисному покритті на поверхнях даних елементів, які опромінюються покриттям з включенням атомів рідкоземельних елементів, введених в структуру армованої атомно-молекулярної захисної металічної матриці. Аналізуючи вищенаведені розрахунки, можна зробити висновок, що електричні кола радіовимірювальних перетворювачів магнітного поля будуть

зберігати працездатність при значеннях іонізуючих випромінювань від 0 до  $1,8 \cdot 10^3$  Р/с, також розраховано термін безпечної роботи пристрою 28467 год. Найкращим серед заходів по підвищенню стійкості роботи перетворювачів магнітного поля від дії ЕМІ є повне укриття апаратури у екранованому металевим екраном приміщенні. Але перетворювач магнітного поля може експлуатуватись на транспортних засобах, то бажані інші заходи по захисту, такі як струмопровідні сітки та плівкові покриття вікон, стільникові металічні конструкції для повітрозбірників та вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, що розміщуються по периметру дверей і люків. Для захисту від проникнення електромагнітного імпульсу в апаратуру через різні кабельні вводи використовується перехід від електричних до волоконно-оптичних систем зв'язку, на які практично не має вплив ЕМІ. Також для захисту кабельних вводів є встановлення в конструкції вбудованих зенерівських діодів. Досить важливе значення має захист вводів до споруд таких як: електричних лінії зв'язку включаючи електромережу, водопровідні й опалювальні труби, по яким можливе проникнення наведеного ЕМІ. При оцінці стійкості роботи електротехнічних і електронних систем було визначено, що безпечна робота розроблювального пристрою можлива при умові  $E_v \leq 70$  В/м.



## **ВИСНОВКИ**

У роботі було проаналізовано режими роботи козлового крану. На основі аналізу розглянуто основні аспекти ПД регулювання роботою крану з метою зменшення часу на розвантажувальні операції.

Проведено розрахунок та моделювання роботи усіх регуляторів для запобігання розхитування вантажу. При цьому повинна забезпечуватись максимальна швидкість розвантаження.

Розраховано всі параметри автоматичних регуляторів для управління електроприводом. Впровадження такої системи керування дозволить значно скоротити час вантажно-розвантажувальних робіт.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
2. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
3. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
4. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
5. Abdel-Rahman EM, Nayfeh AH, Masoud ZN. Dynamics and control of cranes: A review. *J Vib Control* 2001; 9: 863-908.
6. Jones JF, Patterson BJ. Oscillation damped movements of suspended payloads. In: *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*; 1988.
7. Henry EJ, Masoud ZN, Nayfeh AH, Mook DT. Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation. *J Vib Control* 1999; 7: 1253-64.
8. Ma BJ, Fang YC, Liu XE, Wang PC. Modeling and simulation platform design for 3d overhead crane. *J Syst Simul* 2009; 21: 3798-803.
9. Cartmell MP. On the need for control of nonlinear oscillations in machine systems. *Mecanica* 2003; 38: 185-212.
10. Cartmell MP, Morrish L, Alberts TE, Taylor AJ. Controlling the nonlinear dynamics of gantry cranes. *Mach Vib* 1996; 5: 197-210.

11. G.A. Manson, "Time-Optimal Control of and Overhead Crane Model," *Optimal Control Applications and Methods*, 3(2), 1992, pp. 115-120.
12. J. Auernig and H. Troger, "Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load," *Automatica*, 23(4), 1987, pp. 437-447.
13. H.M. Omar, *Control of Gantry and Tower Cranes*, M.S. Thesis, Virginia Tech., 2003, Blacksburg, VA.
14. H.H. Lee and S.K. Cho, "A New fuzzy logic anti-swing control for industrial three-dimensional overhead crane," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotic and Automation*, 2001, Seoul, pp. 2958-2961.

