

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет електроенергетики та електромеханіки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу»

Виконав: студент 2-го курсу, гр. ЕПА-24м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Сергій СІВОХІН
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК

Олена НАНАКА
(прізвище та ініціали)

«25» 11 2025 р.

Опонент: к.т.н. доц., доц. каф. ЕСЕМ
Олександр БАБЕНКО
(прізвище та ініціали)

«19» 12 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри [підпис]
«25» 11 2025 р.

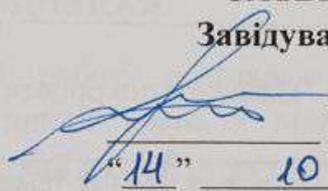
Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ



“14” 10 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Сівохіну Сергію Денисовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу

керівник роботи Нанака Олена Миколаївна, к.т.н., доц. каф. КЕМСК

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” 09 2025 року №313

2. Строк подання студентом роботи 25.11.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Тип електродвигуна головного приводу – 4A90L4Y3, Номінальна потужність (P_2): 2,2 кВт, Номінальна частота обертання (пн): 1425 об/хв, Номінальний струм статора (I_n): 5 А, Номінальний момент (M_n): 14,7 Н·м, Номінальний ККД (η_n): 80 %, Номінальний коефіцієнт потужності ($\cos \phi_n$): 0,83, Кратність пускового моменту (M_p/M_n): 2,1, Кратність максимального моменту (M_m/M_n): 2,4, Кратність пускового струму (I_p/I_n): 4,5, Момент інерції ротора (J_d): 0,056 кг·м²,

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1 Аналіз систем електроприводів мостових кранів. 2 Моделювання системи електроприводу мостового крана із врахуванням коливань вантажу. 3 Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану для зменшення коливань вантажу. 4 Економічна частина. 5 Охорона праці. Висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження. Загальні характеристики вантажопідійомних пристроїв. Аналіз процесу коливань вантажу під час роботи мостового крана. Аналіз технічних рішень для зменшення коливань підвішеного вантажу. Математичні моделі системи електроприводу мостового крана. Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності. Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прий
Спеціальна частина	к. т. н., доц. каф. КЕМСК Нанак О.М.	14.10.25р. <i>[Signature]</i>	21.11.25р. <i>[Signature]</i>
Економічна частина	Шулле Ю.А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	14.10.25р. <i>[Signature]</i>	21.11.25р. <i>[Signature]</i>

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	24.09.25р.	сист
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.25р.	двом част
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.25р.	мате (1-11
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.25р.	кран
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.25р.	при демп
6	Попередній захист МКР	25.11.25р.	кутом
7	Нормоконтроль МКР	24.11.25р.	довж автов
8	Рецензування МКР	19.12.25р.	обро елект
9	Захист МКР	23.12.25р.	експл експл вклю

Студент

[Signature]
(підпис)

[Signature]
(прізвище та ініці)

Керівник роботи

[Signature]
(підпис)

[Signature]
(прізвище та ініці)

демпл модел еконо

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.865.8:681.5

Сівохін С.Д. Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електрична інженерія. Вінниця: ВНТУ, 2025. 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 38; табл. 14.

В магістерській кваліфікаційній роботі розглядаються електромеханічні системи механізмів пересування мостового крана з підвішеним вантажем як двомасові системи, що включають жорсткий механізм та гнучкий підвіс із власними частотами коливань, що відрізняються більш ніж у 10 разів. Розроблено математичну та комп'ютерну моделі крана, які враховують зміну довжини підвіса (1–12 м) та формування додаткових навантажень на механізми пересування візка і крана, з можливістю аналізу перехідних процесів у статичних і динамічних режимах при швидкостях до 60 м/хв. Запропонована удосконалена система керування для демпфування коливань вантажу використовує коригувальний зворотний зв'язок за кутом відхилення вантажу ($\pm 15^\circ$) із змінним коефіцієнтом підсилення залежно від довжини підвіса. Ключовим елементом апаратно-програмного комплексу є автономний 3-осьовий MEMS-гіроскоп із частотою 136 вимірювань/с, дані якого обробляються мікроконтролером і передаються через Wi-Fi для корекції швидкості електропривода. Техніко-економічний аналіз показав зниження річних експлуатаційних витрат на 10–15 %, а розроблені вимоги забезпечують безпечну експлуатацію комплексу в умовах шкідливих факторів навколишнього середовища, включно з вібраціями, температурами $-20 \dots +45$ °C та підвищеною запиленістю.

Графічна частина складається з 17 плакатів із результатами роботи.

Ключові слова: електропривод, мостовий кран, підвішений вантаж, демпфування коливань, двомасова система, MEMS-гіроскоп, математичне моделювання, комп'ютерне моделювання, безпечна експлуатація, техніко-економічний аналіз.

ABSTRACT

Sivohin S.D. Automated control system for the electric drive of a bridge crane to reduce vibrations of the suspended load. Master's thesis in specialty 141 - electricity, electrical engineering and electromechanics, educational program - electrical engineering Vinnitsa: VNTU, 2025. – 120 p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 31 titles; fig.: 38; tabl. 14.

The study considers electromechanical drive systems of an overhead crane with a suspended load as two-mass systems, comprising a rigid mechanism and a flexible suspension, with natural vibration frequencies differing by more than 10 times. A mathematical and computer model of the crane was developed, accounting for suspension length variations (1–12 m) and the formation of additional loads on the trolley and crane travel mechanisms, allowing analysis of transient processes in both static and dynamic modes at speeds up to 60 m/min. The improved load sway damping control system employs a corrective feedback based on the load deviation angle ($\pm 15^\circ$) with a variable gain coefficient adjusted according to suspension length. The key element of the hardware-software complex is an autonomous 3-axis MEMS gyroscope, providing 136 measurements per second, processed by a microcontroller and transmitted via Wi-Fi to the drive control system for speed correction. A techno-economic analysis showed a 10–15% reduction in annual operating costs, and the developed requirements ensure safe operation of the electromechanical system under environmental hazards, including vibrations, temperature range $-20 \dots +45$ °C, and high dust conditions.

The graphic part consists of 17 posters with the results of the work.

Keywords: electric drive, overhead crane, suspended load, sway damping, two-mass system, MEMS gyroscope, mathematical modeling, computer modeling, safe operation, techno-economic analysis.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МОСТОВИХ КРАНІВ.....	10
1.1 Загальні характеристики вантажопідійомних пристроїв.....	10
1.2 Сучасний стан електроприводу мостових кранів.....	12
1.3 Аналіз процесу коливань вантажу під час роботи мостового крана.....	17
1.4 Аналіз технічних рішень для демпфування коливань підвішеного вантажу.....	25
1.5 Висновки.....	31
2 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНА ІЗ ВРАХУВАННЯМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ.....	33
2.1 Узагальнені сили та координати механізму підйому.....	33
2.2 Узагальнені сили та координати механізму пересування вантажного візка	34
2.3 Математичні моделі системи електроприводу мостового крана	37
2.4 Висновки.....	48
3 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОСТОВОГО КРАНУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ.....	49
3.1 Система керування електропривода мостового крану для зменшення коливань вантажу.....	49
3.2 Висновки.....	66
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	67
4.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту.....	67
4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат.....	69
4.3 Визначення терміну окупності проекту.....	76
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	78
ВИСНОВКИ.....	91

	4
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	93
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	97
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина.....	104
Додаток В – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	120

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Робота мостового крана супроводжується механічними коливаннями вантажу на гнучкому підвісі, які збільшують час вантажно-розвантажувальних операцій, викликають додаткові циклічні навантаження в системі електроприводів механізмів підйому, мосту та візка та ускладнюють завдання позиціонування вантажу. На стадії проектування механічного та електричного обладнання мостового крана одним із головних факторів, що обмежують максимальні робочі швидкості механізмів пересування, є розгойдування вантажу.

Демпфування коливань вантажу мостового крана дозволяє:

1. знизити амплітуду та тривалість розгойдування вантажу, що призводить до збільшення продуктивності роботи мостового крана за рахунок зменшення часу вантажно-розвантажувальних робіт та підвищення точності відпрацювання траєкторії переміщення вантажу;
2. збільшити термін служби електричного та механічного обладнання мостового крана за рахунок зниження циклічних навантажень на електромеханічну систему, спричинених механічними коливаннями вантажу;
3. збільшити продуктивність роботи мостового крана з допомогою збільшення робочих швидкостей механізмів пересування.

Таким чином, удосконалення системи управління електроприводами мостового крана для демпфування коливань, що призводить до збільшення продуктивності крана та терміну служби, є актуальним науково-технічним завданням.

При описі статичних та динамічних режимів роботи мостового крана використовуються відомі рівняння руху для підвішеного вантажу та механізму пересування та аналізується ізольована двомасова система з жорстким механізмом пересування та гнучким підвісом. Дані рівняння підходять до описи процесів лише з постійним значенням довжини підвісу вантажу і враховують перехідні процеси зміни довжини, тобто. одночасну роботу механізмів підйому та пересування. Таким чином, вплив зміни

довжини підвісу (швидкість та прискорення механізму підйому) на рух вантажу та формування навантажень у системі електроприводу механізмів пересування не вивчено.

Розробкою систем демпфування коливань підвішеного вантажу зараз займаються великі світові машинобудівні компанії, такі як Siemens, Demag, ABB, Konecranes, Schneider Electric. Вітчизняні виробники кранного електроустаткування практично не мають розробок у цій галузі.

Існуючі системи управління електроприводами механізмів пересування мостового крана для демпфування коливань вантажу виконуються з непрямым та прямим виміром кута відхилення вантажу. Для реалізації способу управління з непрямым визначенням кута відхилення вантажу потрібне застосування датчиків довжини підвісу та ваги вантажу. З отриманих з датчиків даних розрахунковим шляхом визначається кут відхилення вантажу і формується необхідне прискорення механізму пересування, що дозволяє демпфувати коливання. Даний спосіб не дозволяє отримати необхідну якість регулювання при ненульових коливаннях в моменти пуску та гальмування, а також при зовнішніх впливах, що обурюють, на систему підвісу вантажу. Спосіб управління електроприводом механізму пересування мостового крана на основі датчика кута відхилення вантажу дозволяє демпфувати коливання з довільними відхиленнями на початку перехідного процесу і у встановленому режимі роботи.

В даний час датчики кута відхилення мають складну реалізацію у вигляді оптичної камери, що встановлюється на візок над підвішеним вантажем, і має ряд обмежень щодо застосування: необхідність використання великих обчислювальних потужностей обладнання для обробки оптичного сигналу, незадовільна робота в умовах підвищеного вмісту пилу, диму та газу на виробничому майданчику. Для демпфування зазначених недоліків потрібна розробка нових апаратно-програмних комплексів для вимірювання кута відхилення вантажу.

Об'єктом дослідження є електромеханічна система, що складається з приводів мостового крана.

Предметом дослідження є режими роботи, статичні та динамічні характеристики асинхронних електроприводів змінного струму мостового крана.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення продуктивності мостового крана за рахунок демпфування коливань підвішеного вантажу шляхом удосконалення системи керування електроприводами мостового крана.

Для досягнення поставленої мети було поставлено та вирішено такі завдання:

1. аналіз електромеханічної системи мостового крана як об'єкта регулювання, аналіз існуючих систем управління електроприводами для демпфування коливань вантажу під час роботи мостового крана;

2. розробка математичної та комп'ютерної моделей електромеханічної системи мостового крана, що описують рух механізмів мостового крана з урахуванням одночасної роботи всіх механізмів у динамічних та статичних режимах роботи;

3. розробка структурної схеми вдосконаленої системи управління електроприводами пересування механізмів для демпфування механічних коливань вантажу в усіх режимах роботи крана по двох осях переміщення;

4. розробка методу розрахунку та алгоритму визначення коефіцієнта зворотного зв'язку по куту відхилення вантажу.

Методи досліджень: Використовувалися положення класичної механіки, теорії систем управління електроприводом, теорії автоматичного управління. Розробка системи управління виконувалася виходячи з методів аналізу передавальних функцій. Для розробки комп'ютерної моделі використовувалися пакет програм Matlab із бібліотекою Simulink. Застосовувалися програмні продукти з набором функцій статистичного аналізу результатів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. розроблена математична модель мостового крана, яка в динамічних режимах враховує вплив зміни довжини підвісу на амплітуду та частоту горизонтальних механічних коливань вантажу та формування додаткового навантаження в системі механізмів пересування візка та крана;

2. розроблено метод розрахунку коефіцієнта зворотного зв'язку по куту відхилення вантажу, що дозволяє автоматично налаштовувати замкнуту систему управління та забезпечувати постійні демпфуючі властивості, що не залежать від величини довжини підвісу вантажу;

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені математична та комп'ютерна моделі мостового крана дозволяють досліджувати перехідні процеси формування додаткового статичного навантаження в електромеханічній системі електроприводу механізмів пересування з урахуванням зміни довжини підвісу у статичних та динамічних режимах роботи. Зазначені моделі можуть використовуватися при проектуванні кранів та розрахунку навантажень у системі електроприводу. Розроблена система управління електроприводами механізмів пересування на основі програмно-апаратного комплексу визначення кута відхилення вантажу має можливість одночасного вимірювання кута відхилення по двох осях пересування механізмів мостового крана, що дозволяє демпфувати коливання вантажу при одночасній роботі двох механізмів пересування.

Особистий внесок здобувача. Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи отримано автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічній конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2026).

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано 1 тези доповідей матеріалів конференцій:

- Вдосконалення системи керування електроприводом мостового крану із врахуванням коливань вантажу / С.Д. Сівохін, О.М. Нанака, О.А. Паянок – Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)» (22-23 жовтня 2025 року), Електронне наукове видання, Режим доступу URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu2025>, – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 2 с.

1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МОСТОВИХ КРАНІВ

1.1 Загальні характеристики вантажопідійомних пристроїв

Мостовий кран – пристрій для переміщення вантажів за допомогою вантажозахоплювального пристрою шляхом їх підйому, горизонтального пересування та опускання з циклами, що повторюються.

Мостовий кран складається з типових окремих механізмів [1, 2, 4]:

- механізм підйому для вертикального переміщення вантажу;
- механізм пересування візка для переміщення вантажу у горизонтальній площині по одній осі;
- механізм пересування крана для переміщення вантажу у горизонтальній площині по іншій осі.

Вантажний візок 1 (рисунок 1.1) переміщається по рейкових коліях уздовж бруківки несучої конструкції крана 2. Ця конструкція, в загальному випадку, являє собою дві балки прямокутного перерізу. На вантажному візку встановлюється електричний привід підйому, який приводить в рух механізм підйому з вантажозахоплювальним пристроєм 3. Весь механізм крана пересувається по кранових коліях 4. На підрейкових рейках і кранових коліях встановлюють обмежувачі крайніх положень візка і крана [8].

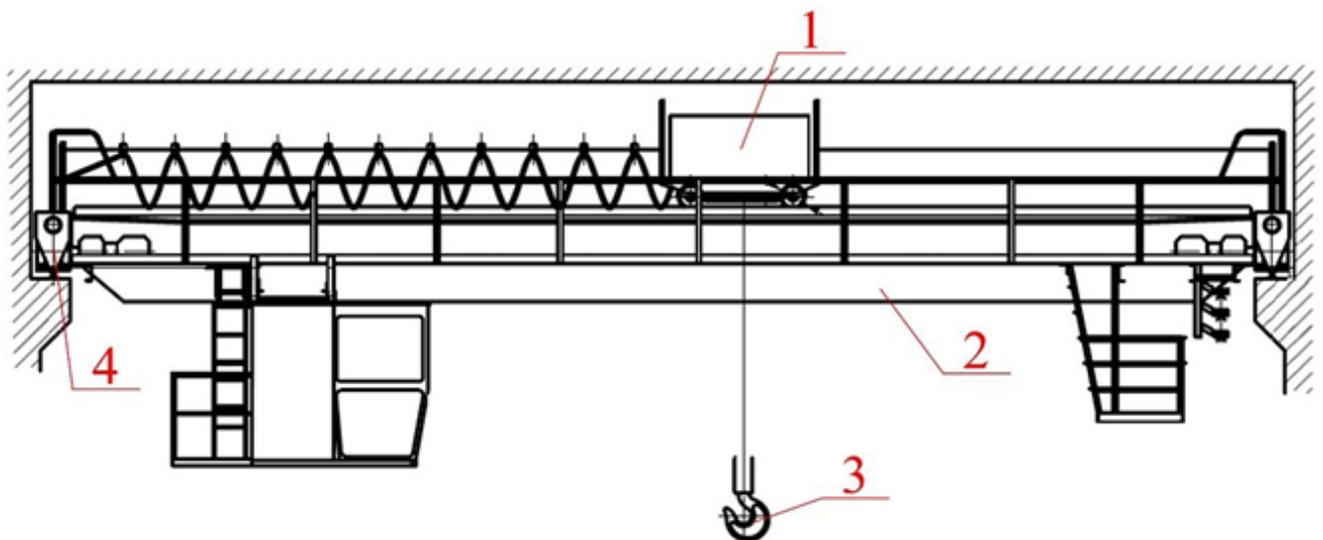


Рисунок 1 – Схема мостового крана з основними елементами та механізмами

В якості вантажозахоплювального пристрою можуть виступати гак, грейфер, магніт та інші форми захватів [6-8]. Мостові крани виготовляються для різних режимів роботи, які різняться часом включення в роботу, різною інтенсивністю роботи, різними кліматичними умовами і т.п. Всі ці умови характеризуються основними параметрами мостового крана: вантажопідйомність, клас використання, клас навантаження, режим роботи, група режиму роботи, відносна тривалість включення, номінальна швидкість механізму пересування та підйому та розрахункове прискорення (уповільнення).

Вантажопідйомність – маса номінального вантажу на вантажозахоплювальному пристрої, що піднімається вантажопідйомною машиною [8]. Для характеристики ступеня завантаження крана введено коефіцієнт використання крана по вантажопідйомності

$$K_{\text{ван.}} = Q_{\text{ср}}/Q_{\text{ном.}}, \quad (1.1)$$

де $Q_{\text{ср}}$ – середнє значення маси вантажу за зміну; ; $Q_{\text{ном.}}$ – номінальна вантажопідйомність.

Номінальна вантажопідйомність кранів може приймати значення наступного ряду [15]: 0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600 т. Для мостових кранів із зазначеного ряду використовуються лише значення вантажопідйомності від 1 до 1000 т.

Клас використання залежить від кількості циклів роботи крана протягом терміну служби.

Режими роботи мостового крана можуть бути циклічними (переміщення штучних вантажів, грейферні крани навалочних вантажів, металургійні крани) та умовно циклічними [12]. Відмінності полягає в наявності постійних за тривалістю та складом операцій крана. Циклом називається послідовність пересування механізму та повернення його в початкове положення.

Номінальна швидкість механізму – значення максимальної лінійної швидкості механізму, що встановилося, при номінальному навантаженні. Швидкість крана вибирається із низки стандартних значень [10-12]: 0,192 (0,0032); 0,24 (0,004); 0,3 (0,005); 0,378 (0,0063); 0,48 (0,008); 0,6 (0,01); 0,75 (0,0125); 0,96 (0,016); 1,2 (0,02); 1,5 (0,025); 1,92 (0,032); 2,4 (0,04); 3 (0,05); 3,78 (0,063); 4,8 (0,08); 6 (0,1); 7,5 (0,125); 9,6 (0,16); 12 (0,2); 15 (0,25); 19,2 (0,32); 24 (0,4); 30 (0,5); 37,8 (0,63); 48 (0,8); 60 (1); 75 (1,25); 96 (1,6); 120 (2); 150 (2,5); 192 (3,2); 240 (4); 300 (5); 378 (6,3); 480 (8); 600 (10); 750 (12,5) м/хв (м/с).

1.2 Сучасний стан електроприводу мостових кранів

Основним режимом роботи кранового електроустаткування є повторно-короткочасний режим із частими включеннями, з частими пусками та гальмуваннями та перевантаженнями [2].

Електроприводи змінного та постійного струму для управління механізмами крана варіюється за потужністю від кількох кіловат до кількох мегават. В даний час найбільше поширення в крановому електроприводі має асинхронний двигун (90% всіх двигунів кранової серії) [2-4].

У електроприводі кранових механізмів застосовуються такі двигуни змінного струму:

- асинхронний двигун із фазним ротором;
- асинхронний двигун із короткозамкненим ротором;
- багатошвидкісні електродвигуни.

З-поміж двигунів постійного струму застосовують двигуни серії Д з послідовним і незалежним збудженням [4]. Основні вимоги до кранових електроприводів [6]:

- обмеження моменту у широкому діапазоні зміни статичного моменту;
- регулювання швидкості;
- обмеження прискорень та динамічних навантажень;
- формування необхідної жорсткості механічних характеристик;

- точна зупинка механізмів;
- наявність електромагнітного гальма для кожного механізму підйому та пересування;
- максимальна простота схем електроприводу при проектуванні та реалізації систем керування;
- використання комплектних пристроїв нульового, кінцевого та максимального захисту, а також нульового блокування.

В основному кожен механізм мостового крана має індивідуальний привід і схему управління.

Схеми керування на змінному струмі розрізняються для механізмів підйому та пересування. Для управління підйомом кранів зазвичай використовуються контролери типів ДКС, ДТСА, ТСА та КС. Для механізмів пересування мостового крана використовуються контролери ДК, К, ТА та ДТА [12].

На рисунку 1.1 приведено механічні характеристики системи управління магнітного контролера ТСА. Командоапарат дозволяє отримати по 4 швидкості на спуск і підйом, режим силового спуску, однофазне гальмування і гальмування противключенням для навантажень менше 70% від номінальної. Робота інших зазначених контролерів механізму підйому аналогічна роботі контролера ТСА. Для дводвигунного приводу застосовують контролери ДТСА та ДКС.

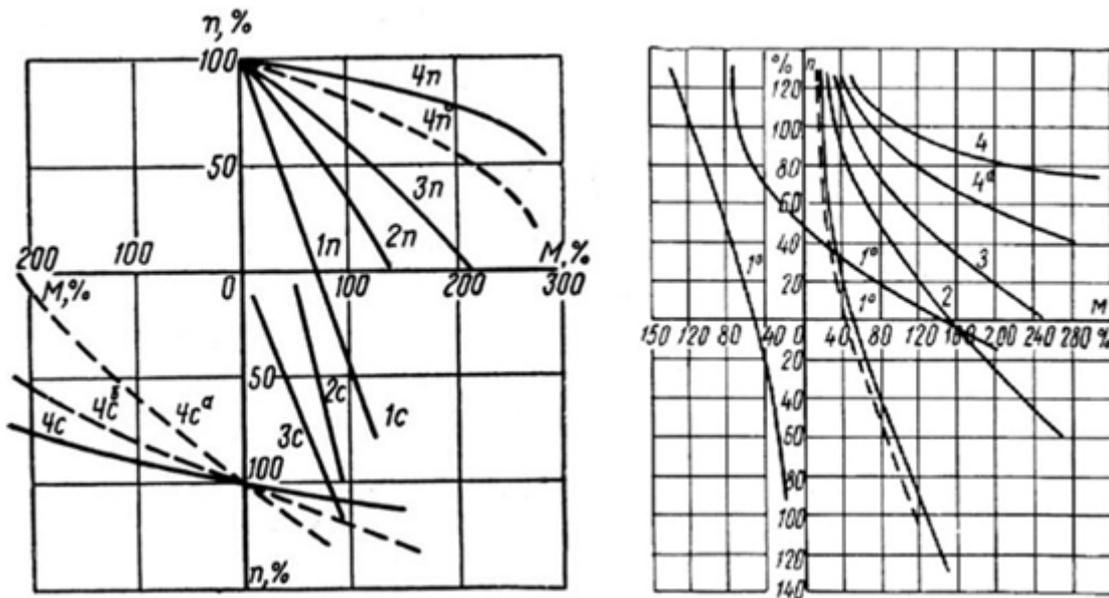


Рисунок 1.1 – Механічні характеристики системи управління: а) механізмом підйому мостового крана за допомогою магнітного контролера ТСА; б) механізмом пересування мостового крана за допомогою контролера П

На першій позиції контролера вибирається слабкість канатів і підйом легких вантажів. На другій, третій і четвертій позиціях швидкість підйому поступово збільшується. На четвертій позиції спуску командоконтролера реалізуються режим силового спуску. Для більш плавної посадки вантажу використовуються режим однофазного гальмування зниження швидкості перед зупинкою. Діапазон регулювання швидкості становить 3:1 – 4:1 [6].

На прикладі контролера постійного струму П можна розглянути систему управління механізмом пересування, при живленні його від незалежного джерела постійного струму (рисунок 1.2). Положення командоапарата виводять електропривод на певну характеристику, а при переведенні командоапарата в крайнє положення відразу, перемикання ступенів виконується у функції часу. Для даної системи керування діапазон регулювання швидкості досягає 8:1 (при спуску вантажів).

Застосування частотно регульованих систем керування змінного струму механізмів мостового крана дозволяє знизити втрати у перехідних

режимах роботи крана [9]. За рахунок кращої керованості системи в динамічних режимах можливе використання високошвидкісних двигунів, а також використання асинхронних двигунів у другій зоні регулювання.

Принципова схема системи кранового електроприводу "перетворювач частоти - асинхронний двигун" приведена на рисунках 1.2, 1.3. Діапазон регулювання у системі ПЧ-АТ може досягати 100:1, проте для більшості мостових кранів максимальною необхідною величиною діапазону регулювання є 20:1.

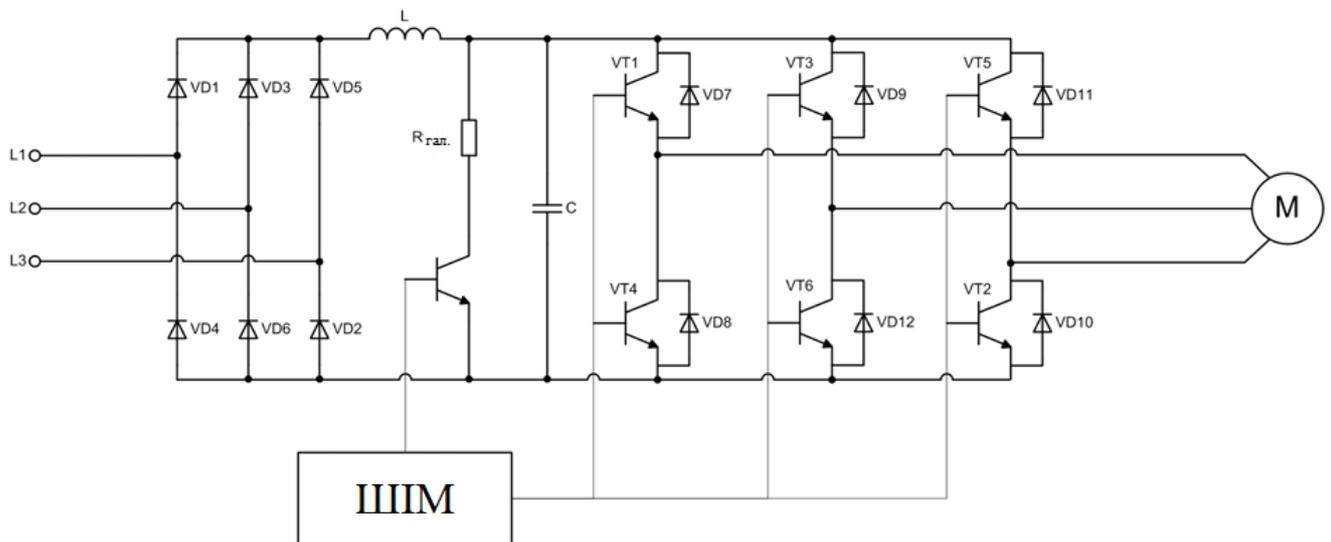


Рисунок 1.2 – Принципова схема системи ПЧ-АД

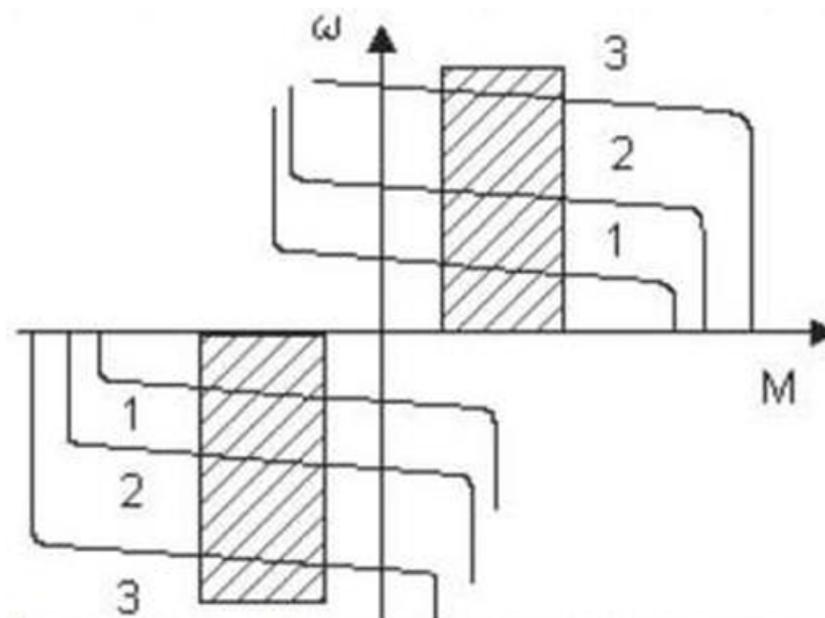


Рисунок 1.3 – Механічні характеристики електроприводу механізму пересування

Система ПЧ-АД при однаковому навантаженні дозволяє знизити у 1,5 – 1,8 разів потужність двигуна проти системами регулювання без застосування перетворювача частоти з допомогою оптимального розмежування зон регулювання [6].

Серія асинхронних кранових електродвигунів має підвищені пускові та максимальні електромагнітні моменти, великі значення ковзання порівняно з асинхронними двигунами загального призначення. Крім того, кранові двигуни мають більший запас міцності механічних деталей [4].

Сучасні системи управління у складі перетворювача частоти формують механічні характеристики приводу з незмінною перевантажувальною здатністю, що свідчить про можливість застосування двигунів загального призначення у крановому електроприводі [11]. При цьому асинхронні двигуни загальнопромислової серії мають вищий ККД, менший номінальний струм, менше номінальне ковзання та вищий коефіцієнт потужності. Таким чином, у складі частотного електроприводу двигуни загального призначення більш енергетично доцільні для використання, ніж асинхронні кранові двигуни. Однак необхідно враховувати більший запас механічної міцності кранових двигунів та вищий клас їхньої ізоляції.

Сучасні системи кранового електроприводу на основі перетворювача частоти мають ряд функцій для підйомно-транспортного обладнання:

- векторне керування без датчика швидкості;
- векторне керування з датчиком швидкості;
- векторне управління (2 точки);
- намагнічування двигуна за допомогою дискретного входу;
- автопідстроювання;
- S-подібна крива розгону-гальмування;
- задані швидкості;
- управління швидше-повільніше;
- керування закінченням ходу;
- керування гальмом;

- вимірювання навантаження;
- підйом із підвищеною швидкістю;
- вибір слабину канатів;
- вирівнювання навантаження;
- керування мережним контактором;
- перемикання комплекту параметрів;
- перемикання двигунів та конфігурацій;
- тепловий захист гальмівних опорів;
- тепловий захист двигуна за допомогою термоопорів.

Крім функцій самого перетворювача частоти, існують додаткові функції, які можна отримати із застосуванням додаткових модулів ПЧ. Прикладом такого модуля може бути кранова карта компанії Schneider Electric [12]. Основним завданням даного модуля є запобігання коливанням вантажу без застосування додаткових датчиків [19]. Представлена система має можливість визначення довжини гнучкого підвісу крана декількома способами з додатковими можливостями налаштування приводу.

1.3 Аналіз процесу коливань вантажу під час роботи мостового крана

В конструкції мостового крана є, як правило, запас механічної міцності і можливість використання двигунів більшої потужності збільшення швидкості пересування механізмів крана. Однак підвищення швидкості пересування механізму викликає більше розгойдування вантажу при розгонах та гальмуваннях крана. У разі при проектуванні системи електроприводу штучно зменшують величини робочих швидкостей механізмів задля забезпечення кращого позиціонування вантажу за його зупинці [8]. Також для цілей позиціонування оператор може доводити вантаж до необхідної координати шляхом повторного повторного включення двигуна, що збільшує нагрівання і знос електрообладнання крана.

Амплітуда коливань підвішеного вантажу залежить від величини довжини підвісу та від величини прискорення механізму пересування мостового крана. При зменшенні прискорення механізму пересування можна домогтися зменшення коливань вантажу, але це призводить до зростання часу циклу крана, а значить зниження продуктивності. При русі механізму на нього діє не тільки реактивна сила опору, але й горизонтальна сила від натягу канатів системи підвісу, що впливає на плавність ходу механізму, на прослизання коліс, а також вносить додаткові впливи, що обурюють, в систему автоматизованого управління краном [10, 11].

Працюючи механізмів пересування мостового крана виникають пружні динамічні навантаження в механічних передачах. Також додаткове навантаження створюють вимушені коливання підвішеного вантажу, які мають меншу величину, ніж пружні коливання у зв'язках, проте впливають на рівномірність ходу механізму пересування, зручність експлуатації крана, а також на точність позиціонування вантажу [7, 9, 10].

Для аналізу взаємного впливу двох зазначених видів навантажень на рисунку 1.4 приведена розрахункова схема механізму пересування мостового крана, яка представляється тримасовою системою. Якщо розглядати окремо кожен вид коливань, то тримасову систему можна замінити двомасовою електромеханічною з пружними зв'язками та жорстким підвісом або двомасовою механічною системою з гнучким підвісом та жорстким механізмом [12].

Для випадку, коли система підвісу сприймається як жорсткий елемент, частота власних коливань електромеханічної системи визначається виразом [15]:

$$\omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12} \cdot (J_D + J_{MEX} + m_{ван.} \cdot \left(\frac{V_{мех.}}{\omega_D}\right)^2}{J_D \cdot J_{MEX}}}, \quad (1.2)$$

де C_{12} – коефіцієнт жорсткості пружного зв'язку між приводним

двигуном і елементами механізму, що обертаються;

J_D і J_{MEH} – момент інерції двигуна та механізму, приведеного до валу двигуна;

$m_{ван.}$ – маса вантажу;

$V_{мех.}$ – лінійна швидкість переміщення механізму;

ω_D – кутова частота обертання електродвигуна механізму.

Для мостових кранів загального призначення величина власних коливань $\epsilon > 25$ с⁻¹.

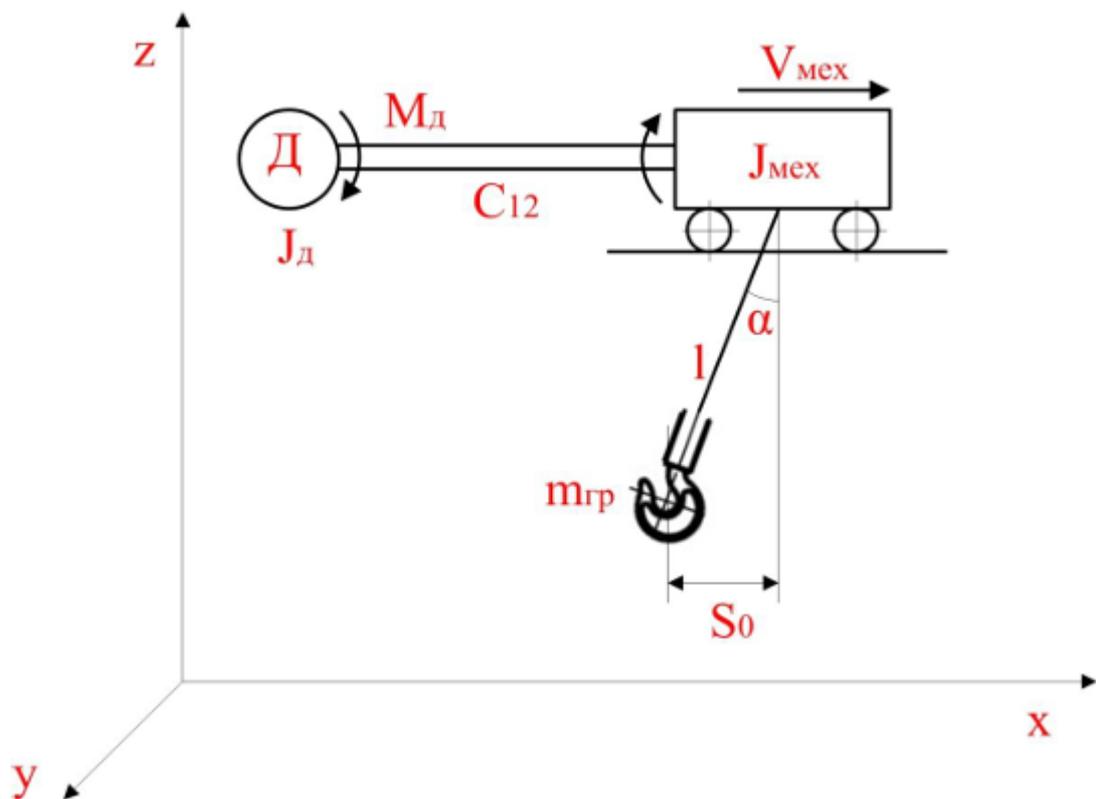


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема механізму пересування візка мостового крана

При розгляді варіанта з абсолютно жорстким механізмом та гнучким підвісом частоти власних коливань вантажу виражаються як [2]:

$$\omega_{ван} = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad (1.3)$$

де l – довжина підвісу вантажу;

g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Висота підйому мостового електричного крана – це відстань від підлоги (рівня землі) до гака, що знаходиться у верхньому робочому положенні. Таким чином, мінімальна довжина підвісу буде більшою за довжину механізму підвісу (гак, грейфер магніт і т.п.). Відповідно до [18] мінімальна величина підвісу приймається рівною 1 м, максимальна величина підвісу в межах 36 м [15, 19]. Розмір власних коливань вантажу за такою формулою (1.2) $\omega_{ван} < 3 \text{ с}^{-1}$.

В таблиці 1.1 приведено значення частоти власних коливань та період коливань у пружних зв'язках механізму, а також гнучкого підвісу.

Таблиця 1.1 – Величини коливань у системі механізму пересування мостового крана

Вид коливань	Параметр	Значення	Параметр	Значення
Пружні коливання у механічних зв'язках	Частота власних коливань $\omega_{12}, \text{с}^{-1}$	> 25	Період коливань Т, с	< 0,04
Коливання гнучкого підвісу	Частота власних коливань $\omega_{ван}, \text{с}^{-1}$	< 3	Період коливань Т, с	> 0,5

Як видно з порівняння величин періодів коливань (таблиця 1.4), які виникають при роботі механізмів пересування мостового крана, можна зробити висновок, що коливання вантажу на гнучкому підвісі мають у 10 разів меншу частоту коливань, ніж пружні коливання в механічних елементах крана та трансмісіях. З цього випливає, що вплив одного виду коливань на інший мінімальний, тому в роботі система механізму пересування мостового крана розглядатиметься як двомасова система з жорстким механізмом та гнучким підвісом.

З урахуванням вищесказаного під час аналізу динаміки підвішеного вантажу та механізму пересування мостового крана, математична модель

двомасової системи «механізм пересування – підвішений вантаж» можна описати наступним рівнянням [12]:

$$\frac{F_D - F_C}{m_{\text{мех.}}} + \frac{m_{\text{ван.}}}{m_{\text{мех.}}} \cdot \omega_{\text{ван.}}^2 \cdot S_0 = -\frac{d^2 S_0}{dt^2} + \omega_{\text{ван.}}^2 \cdot S_0, \quad (1.4)$$

де F_D – приведена сила двигуна;

F_C – приведена сила опору;

$m_{\text{ван.}}$ – маса вантажу;

$m_{\text{мех.}}$ – маса механізму пересування;

$\omega_{\text{ван.}} = \sqrt{\frac{g}{l}}$ – кутова частота власних коливань;

S_0 – горизонтальна координата вантажу при відхиленні.

Висновок рівняння (1.3) ґрунтується на припущенні, що $\sin \alpha \approx \alpha$ і $\cos \alpha \approx 1$ в діапазоні зміни кута $\alpha = 0 \div 10$ градусів. Це спрощення є справедливим для системи мостового крана, оскільки кут відхилення вантажу в процесі роботи не перевищує 10 градусів через обмежені значення швидкості та прискорення механізмів пересування. На комп'ютерній моделі було змодельовано процеси роботи механізму пересування, засновані на вихідному (без припущень) та спрощеному математичному описі процесів. Результати моделювання підтверджують, що спрощені рівняння руху механізмів мостового крана та вантажу дозволяють отримати однакові графіки перехідних процесів змінних системи із системою, описаною вихідними рівняннями.

Якщо прийняти умову сталості динамічної сили (моменту) механізму переміщень, то рівняння (1.5) можна привести як лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійною правою частиною, рішенням якого представлено виразом:

$$S_0(t) = \frac{-l \cdot a_{\text{мех.}} \cdot (1 - \cos(\omega'_{\text{ван.}} \cdot t))}{g} \quad (1.5)$$

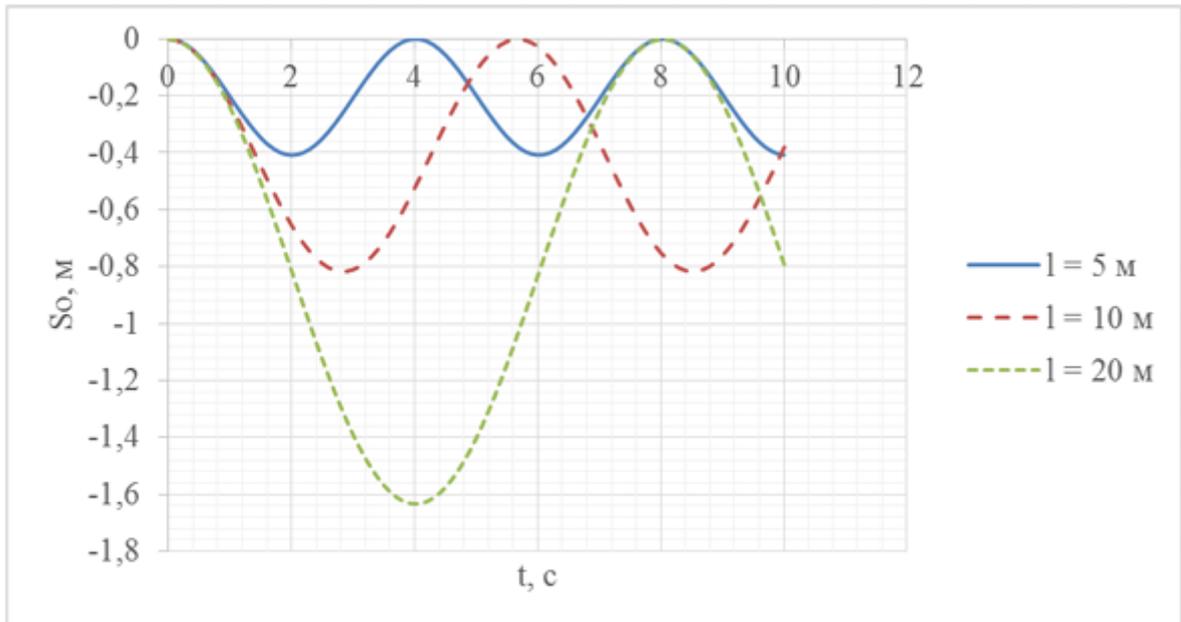
де $\omega'_{\text{ван.}} = \omega_{\text{ван.}} \cdot \sqrt{1 + m_{\text{ван.}}/m_{\text{мех.}}}$ – власна частота коливань після перетворень; a – прискорення механізму пересування.

З (1.5) можна зробити висновок, що величина відхилення вантажу залежить від довжини підвісу, маси вантажу та прискорення механізму пересування та змінюється за гармонічним законом. Для наочного уявлення залежностей змінних представлені розрахункові значення кута відхилення за різних початкових умов (рисунок 1.4). Розрахунок виконаний значення прискорення механізму пересування 0,4 м/с², трьох значень довжини підвісу (5, 10 і 20 м) і трьох значень відносної маси вантажу (25, 50, 75 % від маси механізму пересування).

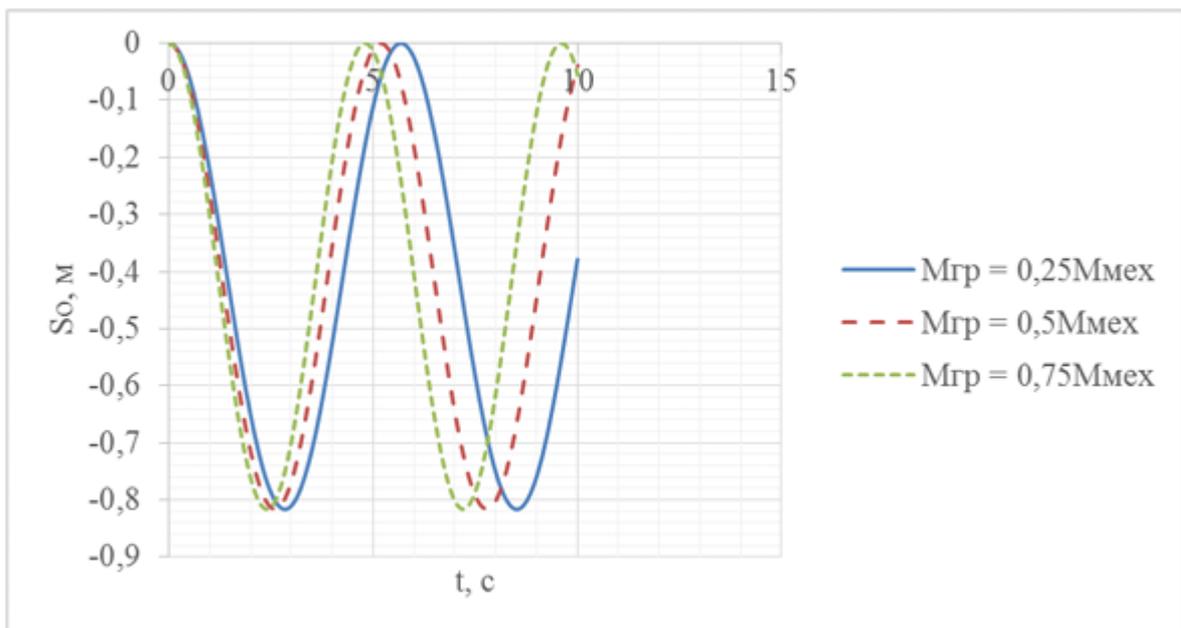
Усі описані вище теоретичні положення є справедливими для процесів пуску чи гальмування механізму пересування мостового крана, тобто. коли є позитивний або негативний динамічний момент (сила). У статичних режимах роботи підвішений вантаж робить гармонійні коливання щодо нульового значення.

Робота механізму на встановленій швидкості пересування характеризується відсутністю динамічного моменту, а значить відсутністю сили, що діє на підвішений вантаж з боку механізму. Закінчення процесу гальмування механізму переміщень є окремим випадком роботи на швидкості, що встановилася (на нульовій), тому подальший аналіз справедливий і для даного режиму роботи.

Приведені на рисунку 1.5 перехідні процеси демонструють наявність або відсутність залишкових коливань вантажу в статичних режимах роботи електроприводу мостового крана.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Залежність кута відхилення вантажу під час пуску від:

- а) довжини підвісу;
- б) маси вантажу

Всі приведені вище теоретичні становища справедливі процесів пуску чи гальмування механізму пересування мостового крана, тобто. коли є позитивний або негативний динамічний момент (сила). У статичних режимах

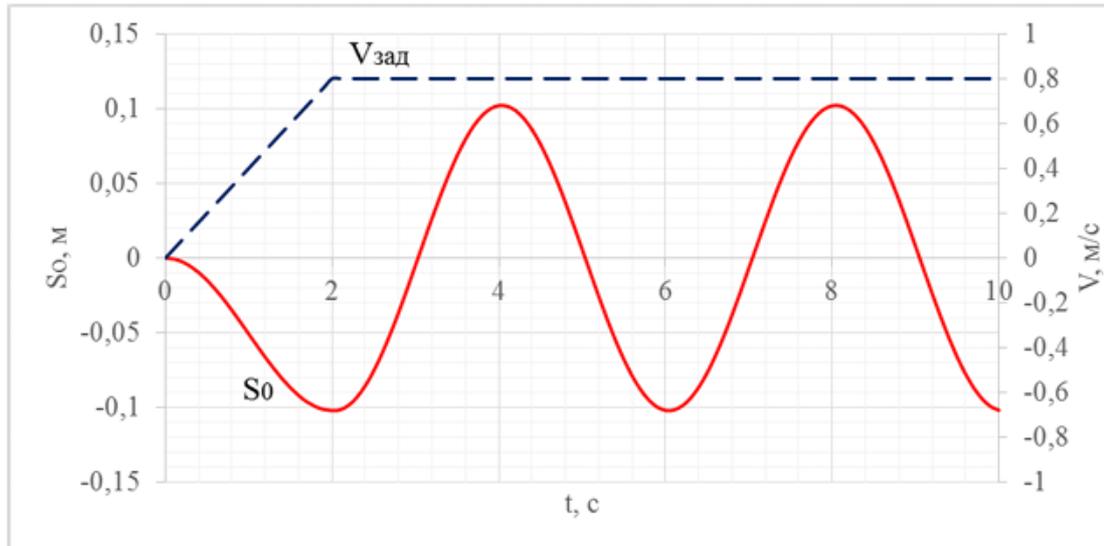
роботи підвішений вантаж робить гармонійні коливання щодо нульового значення.

Робота механізму на встановленій швидкості характеризується відсутністю динамічного моменту, а значить відсутністю сили, що діє на підвішений вантаж з боку механізму. Закінчення процесу гальмування механізму переміщень є окремим випадком роботи на швидкості, що встановилася (на нульовій), тому подальший аналіз справедливий і для даного режиму роботи.

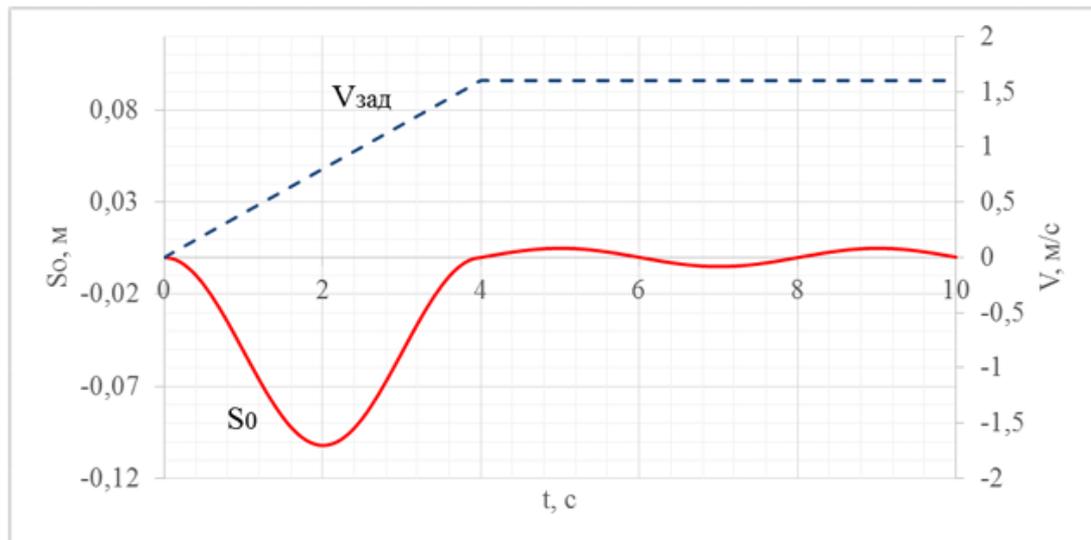
Відхилення підвішеного вантажу при роботі системи електроприводу механізму пересування на встановленій швидкості змінюється за гармонічним законом і залежить від початкових умов: координати вантажу і лінійної швидкості вантажу при закінченні процесу пуску або гальмування. На рисунку 1.5 приведені розрахункові перехідні процеси відхилення вантажу та швидкості механізму при пуску механізму пересування з підвішеним вантажем для двох значень часу пуску (2 та 4 с). Розрахунок виконується для значень прискорення $0,4 \text{ м/с}^2$, довжини підвісу 5 м відносної маси вантажу 25 %.

Приведені перехідні процеси на рисунку 1.5 демонструють наявність або відсутність залишкових коливань вантажу в статичних режимах роботи електроприводу мостового крана, які в свою чергу залежать від початкових умов (положення та швидкість вантажу після динамічних режимів). Для певних умов (довжина підвісу, швидкість пересування механізму, маса вантажу) можна підібрати таку величину прискорення механізму, коли коливання будуть демпфуватися (рисунок 1.5, б).

Аналіз коливань вантажу для спрощення розрахунків виконується без врахування того, що реальна система є системою з гармонійними згасаючими коливаннями вантажу, проте це не призводить до порушення опису принципів роботи двомасової системи механізму пересування та підвішеного вантажу.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Залежність характеру зміни кута відхилення вантажу від часу пуску: а) час пуску 2; б) час запуску 4 с.

1.4 Аналіз технічних рішень для демпфування коливань підвішеного вантажу

В даному підрозділі описані системи керування крановими електроприводами для демпфування коливань вантажу, які в даний час широко використовуються [16].

Приводи типу ACS880 фірми АВВ [19] мають вбудовану функцію управління механізмами крана з можливістю демпфування вантажних

коливань. Функція керування краном розраховує та усуває розгойдування вантажу, що виникають під час руху механізмів вантажного візка та крана, без застосування зовнішніх датчиків.

Розрахунок відхилення вантажу виконується виходячи з комп'ютерної моделі математичного маятника. Програмне забезпечення вимірює координату положення вантажу, характеристики підвісу до розрахунку постійної часу коливань. Коли машиніст змінює завдання швидкості приводу, вбудована функція перераховує величину швидкості демпфування коливань вантажу. Основний принцип роботи вбудованої функції кранового приводу фірми АВВ представлений на рисунку 1.6.

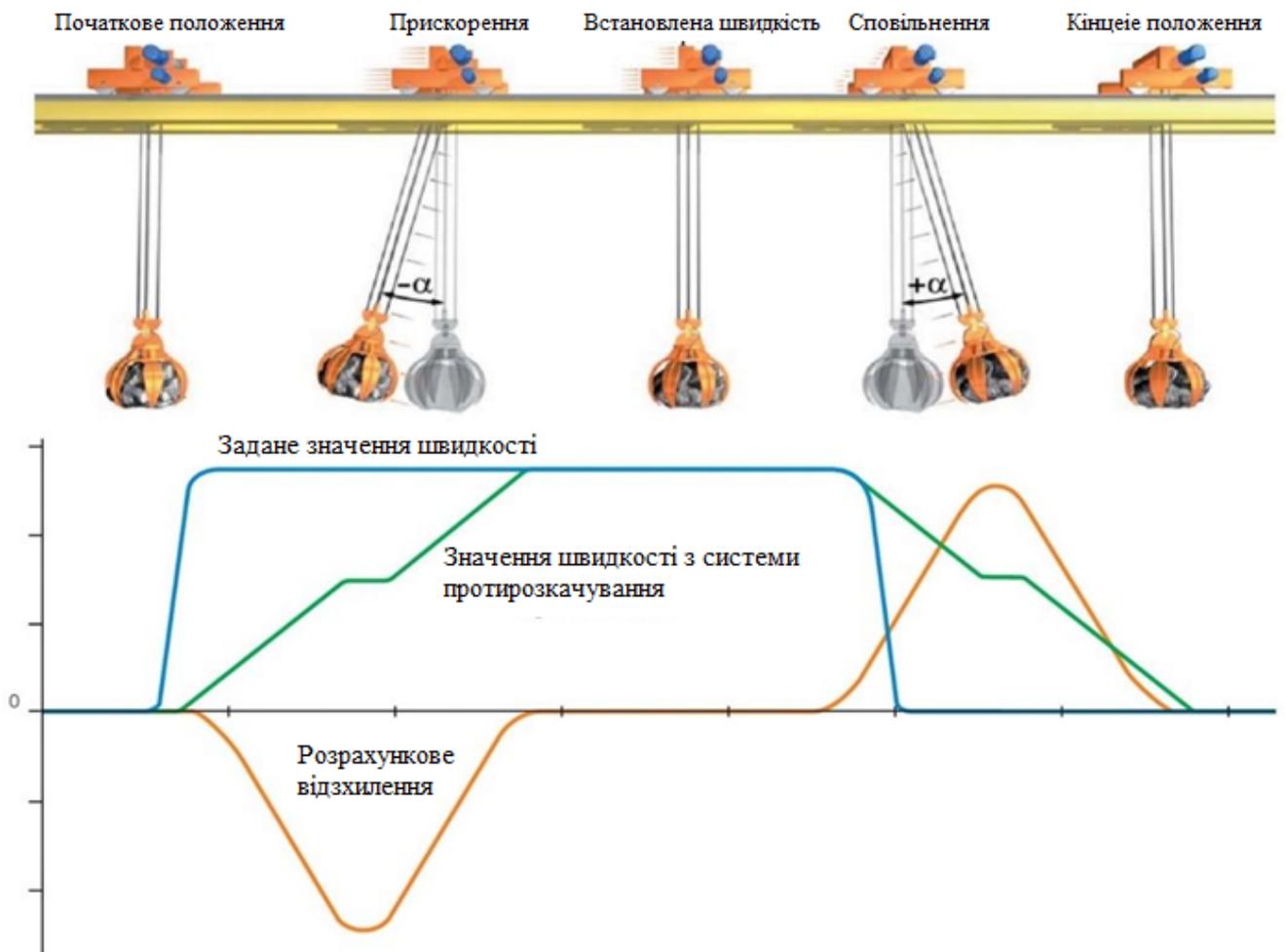


Рисунок 1.6 – Принцип роботи системи протирозгойдування вантажу фірми АВВ

Для здійснення завдання гасіння коливання підвішеного вантажу в приводах фірми АВВ застосовується наступний підхід: демпфування коливань пов'язане з інформацією про частоту вільних коливань вантажу (або постійного часу), що визначається довжиною підвісу. Таким чином, завдання зводиться до визначення довжини підвісу механізму підйому. Довжина підвісу обчислюється як сума довжини каната та розміру вантажу.

Довжина каната розраховується контролером на підставі зворотного зв'язку за швидкістю механізму підйому (енкодера). Розміром вантажу приймається відстань від гака до центру ваги підвішеного об'єкта.

В офіційних каталогах і посібниках фірми АВВ зазначено, що точність роботи системи демпфування коливань вантажу залежить від точності розрахунку довжини підвісу, а саме врахування розмірів вантажу.

Існує 3 способи врахування розмірів вантажу, пропоновані фірмою АВВ у своїх приводах:

- пряма залежність розміру вантажу від його маси. У налаштуваннях зберігаються значення мінімальних маси і розмірів вантажів, що переміщуються, а також їх максимальні значення. Потім будується пряма залежність за двома точками та використовується при обчисленнях розмірів (рисунок 1.7);

- завдання розмірів вантажу через аналоговий вхід вбудованого контролера;

- розрахунок розмірів вантажу, якщо вантаж завжди піднімається з одного й того самого рівня щодо землі. Розрахунок виконується за величиною довжини каната (рисунок 1.8).

Для включення системи демпфування коливань вантажу в роботу необхідно провести її налаштування. Налаштування полягає в тестових включеннях приводів з відключеною функцією крана в нижньому положенні порожнього гака і у верхньому положенні порожнього гака.

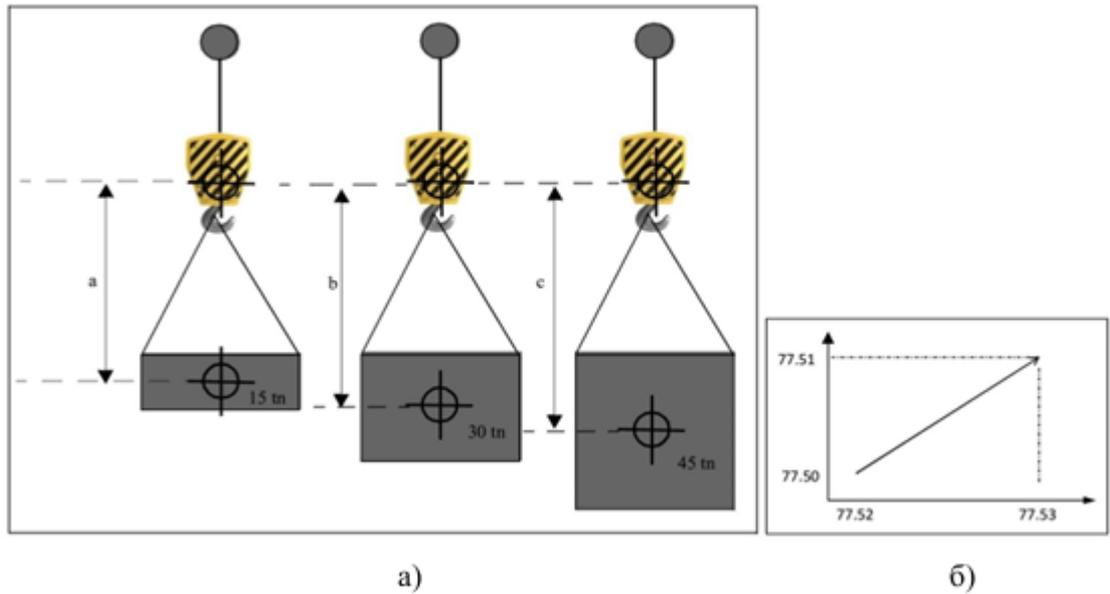


Рисунок 1.7 – Спосіб розрахунку розміру вантажу на підставі його маси:

- а) принцип залежності розмірів вантажу від маси;
- б) функціональна залежність розмірів від маси вантажу

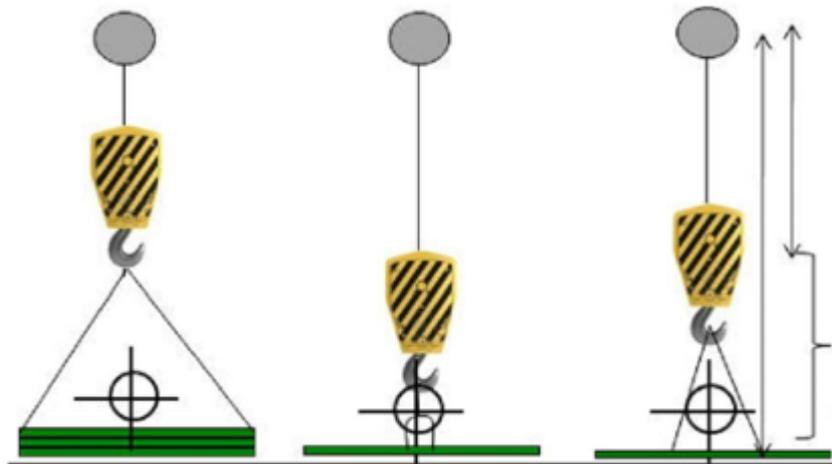


Рисунок 1.8 – Спосіб розрахунку розміру вантажу за умови, що всі операції виробляються з однієї й тієї ж позначки (на рівні поля)

Компанія Schneider Electric (Франція) для вирішення проблеми коливань вантажу під час роботи пропонує застосовувати кранову картку (заводський номер VW3A3510). Система допомоги машиністу при використанні кранової карти працює для двох осей руху крана – механізму пересування візка та крана.

Принцип побудови системи гасіння розгойдувань вантажу привеедно на рисунку 1.9.

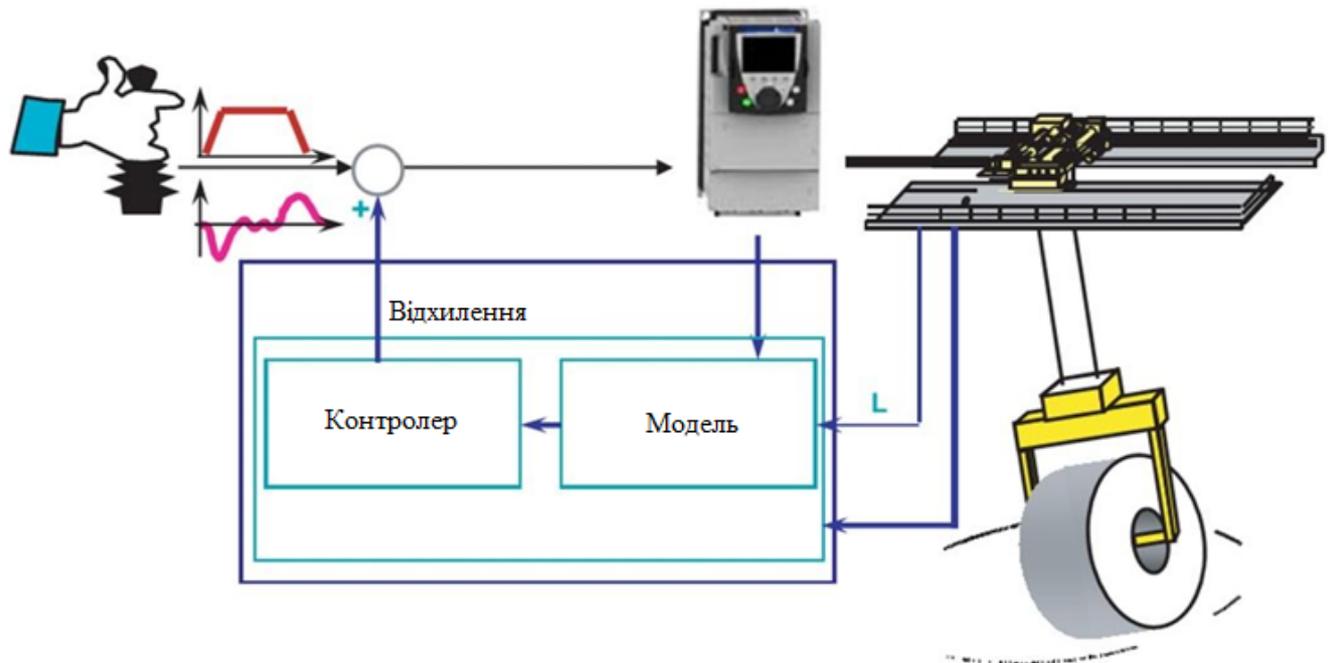


Рисунок 1.9 – Система гасіння розгойдування вантажу фірми Schneider Electric

У адаптивній моделі на рисунку 1.9 використовується довжина підвісу вантажу, яка може визначатися трьома способами:

- за допомогою енкодера приводу підйому;
- за допомогою двох кінцевих вимикачів приводу підйому. Робочий простір, у якому знаходиться підвішений вантаж, поділяється на 3 частини двома кінцевими вимикачами. Довжина підвісу приймається рівною однією з трьох варіантів;
- за допомогою 3-позиційного перемикача машиніста. Робоча область також, як і попередньому варіанті розділяється на 3 частини, машиніст виставляє певну висоту підйому перемикачем.

Величина розміру вантажу від гака до центру ваги визначається вручну (рисунок 1.10) і знаходиться в діапазоні від 2 до 5 м.

Увімкнення функції протирозгойдування можливе лише при повному зупиненні механізмів пересування візка та крана.

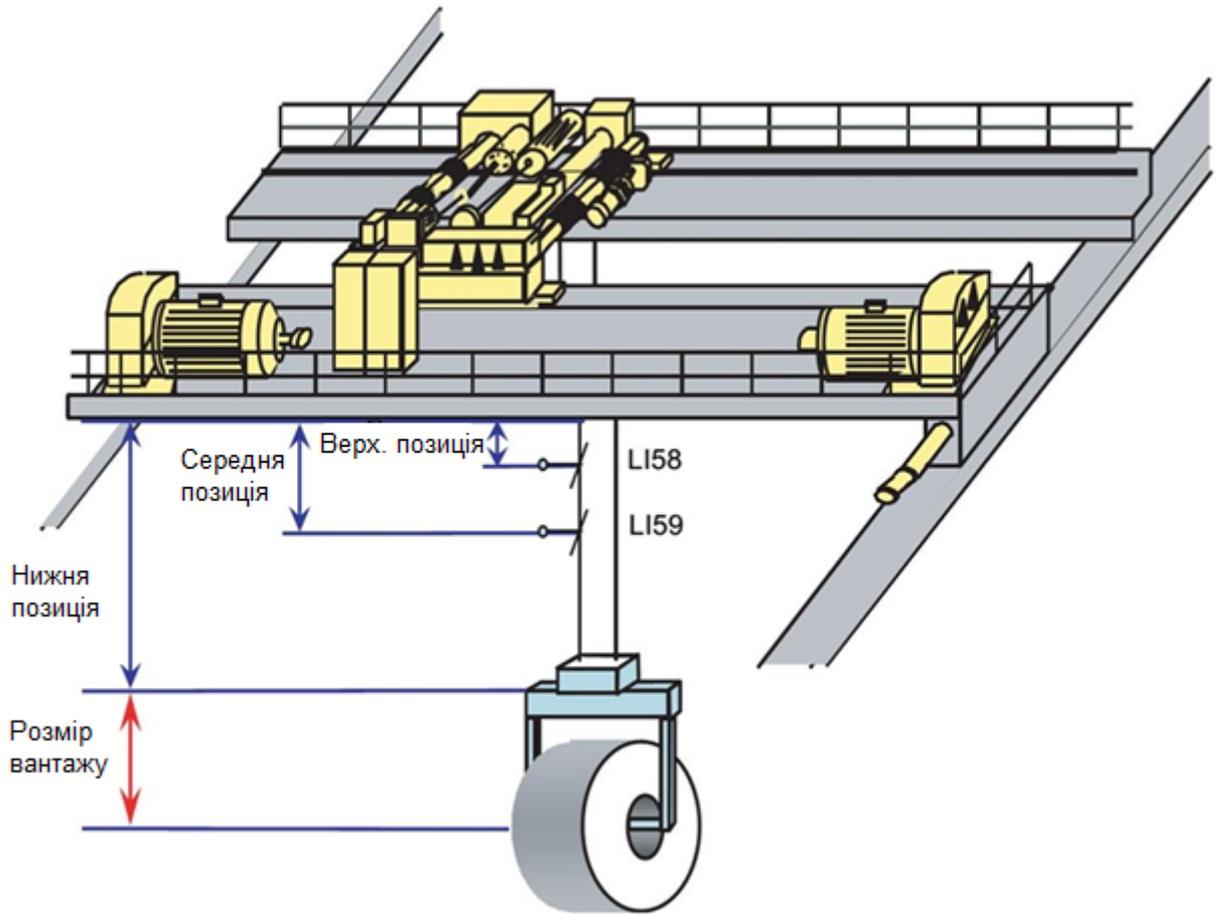


Рисунок 1.10 – Розрахунок довжини підвісу за допомогою кінцевих вимикачів приводу підйому

Фірма Siemens (Німеччина) пропонує на ринку систему керування SIMOCRANE з функцією контролю розгойдування вантажу. Існує два різновиди системи: SIMOCRANE CeSAR як автономна система контролю розгойдування, та SIMOCRANE SC як вбудована система у привід SIMOTION D. Система може доповнюватися вимірювальною оптичною камерою у поєднанні з рефлектором (рисунок 1.13).

Система контролю розгойдування SIMOCRANE заснована на математичній моделі підвішеного вантажу як маятника. При використанні камери параметри висоти підйому, кута відхилення та кута повороту вантажу вимірюються в режимі реального часу і передаються математичну модель. У варіанті без камери використовуються лише результати розрахунку моделі.

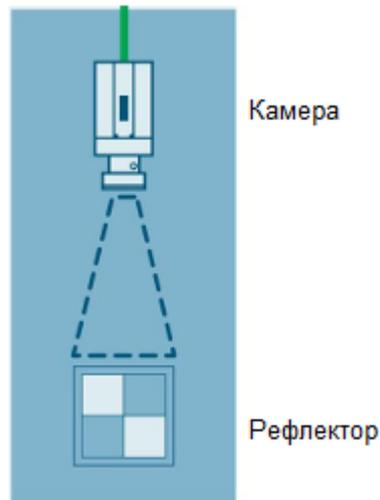


Рисунок 1.11 – Камера та дефлектор у системі контролю розгойдування SIMOCRANE

Гасіння гойдання вантажу досягається шляхом впливу на швидкість кожного окремого механізму. Використання оптичної камери з рефлексором дозволяє боротися з розгойдуванням вантажу, викликаними зовнішніми силами, такими як нахил підкранових шляхів або вітрове навантаження.

1.5 Висновки:

1. Виконаний аналіз існуючих систем кранового електроприводу вказує на те, що завдання демпфування коливань підвішеного вантажу під час роботи крана є актуальним технічним завданням. Повне або часткове демпфування коливань вантажу дозволяє збільшувати швидкість пересування вантажу на існуючому об'єкті (слід враховувати властивості міцності металевих конструкцій крана) або при проектуванні нового мостового крана. Також демпфування коливань вантажу дозволяє точніше здійснювати завдання позиціонування вантажу. Усі перелічені положення збільшують продуктивність крана, отже, завдання буде мати економічний ефект.

2. При аналізі багатомасової електромеханічної системи мостового крана не розглядаються пружні коливання у механічних зв'язках. Мінімальна частота своїх коливань у пружних довгих зв'язках мостового крана становить

25 с⁻¹. Максимальна частота власних коливань вантажу за мінімальної довжини підвісу становить 3 с⁻¹. Частоти власних коливань пружних зв'язків та системи підвісу відрізняються більш ніж у 10 разів. Тому система механізму пересування та підвісу вантажу є двомасовою системою без урахування пружних коливань.

3. Фізичні процеси коливань вантажу під час роботи мостового крана залежить від режиму роботи механізмів пересування, які викликають розгойдування вантажу. У динамічних режимах роботи величина відхилення вантажу залежить від довжини підвісу, маси вантажу та прискорення механізму. У статичних режимах роботи величина швидкості відхилення вантажу залежить від довжини підвісу.

2 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНА ІЗ ВРАХУВАННЯМ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

2.1 Узагальнені сили та координати механізму підйому

Для одержання рівняння руху механізму підйому мостового крана за допомогою рівняння Лагранжа необхідно визначити узагальнену координату. Для даного механізму узагальненою координатою є довжина підвісу 1 від точки кріплення на механізмі пересування візка (рисунк 2.1).

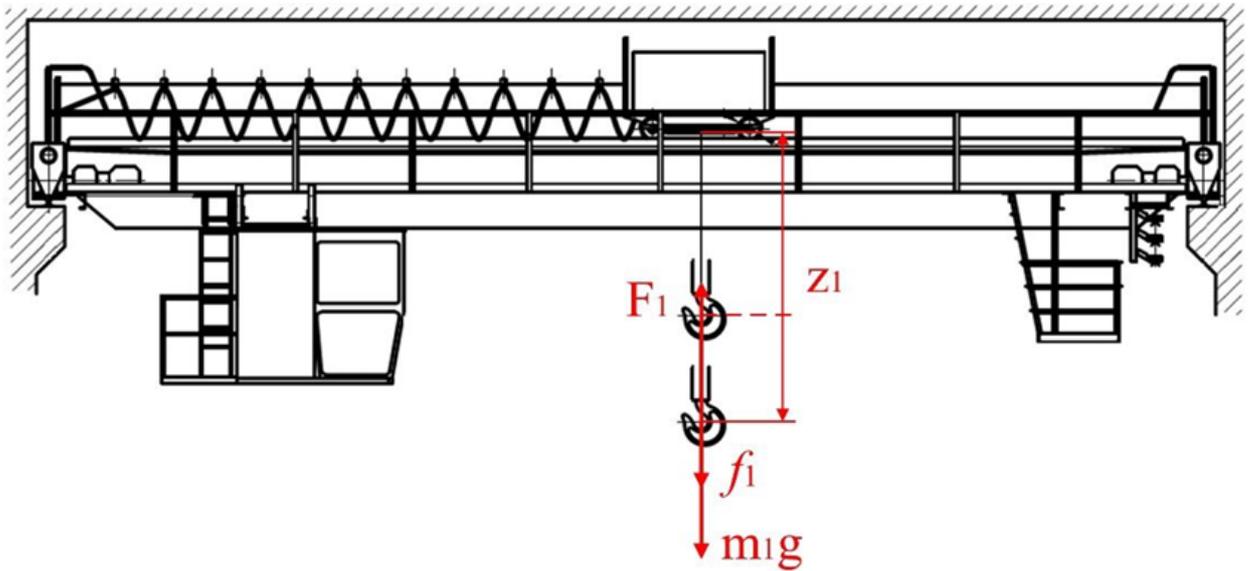


Рисунок 2.1 – Узагальнена координата та сили, що діють на механізм підйому

Кінетична енергія механізму підйому може бути визначена як:

$$T_z = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_z^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot \dot{z}_1^2, \quad (2.1)$$

де m_1 – маса вантажу з підвісом; V_z – швидкість підйому вантажу; z_1 – координати вантажу. Узагальнена координата z_1 розраховується за формулою

$$z_1 = \int_0^t V_z \cdot dt + z_{10}, \quad (2.2)$$

де z_{10} – початкове значення довжини підвісу вантажу.

Узагальнена сила механізму підйому Q_1 включає кілька складових: сила з боку системи електроприводу F_1 , активна статична сила (сила тяжіння m_1g) і реактивна статична сила (сила тертя f_1).

Узагальнену силу Q_1 можна виразити як:

$$Q_1 = -F_1 + m_1g + f_1, \quad (2.3)$$

У рівнянні (2.3) сила тертя f_1 може бути розрахована за виразом:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{m_1}{\eta_{\text{під.}}} \\ m_1 \cdot \eta_{\text{сп.}} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где $\eta_{\text{під.}}$ и $\eta_{\text{сп.}}$ – коефіцієнт корисної дії механізму при підйомі та спуску відповідно.

2.2 Узагальнені сили та координати механізму пересування вантажного візка

Механізм пересування вантажного візка має дві узагальнені координати: координату візка x_t та кут відхилення вантажу на гнучкому підвісі від вертикального положення α (рисунок 2.2)

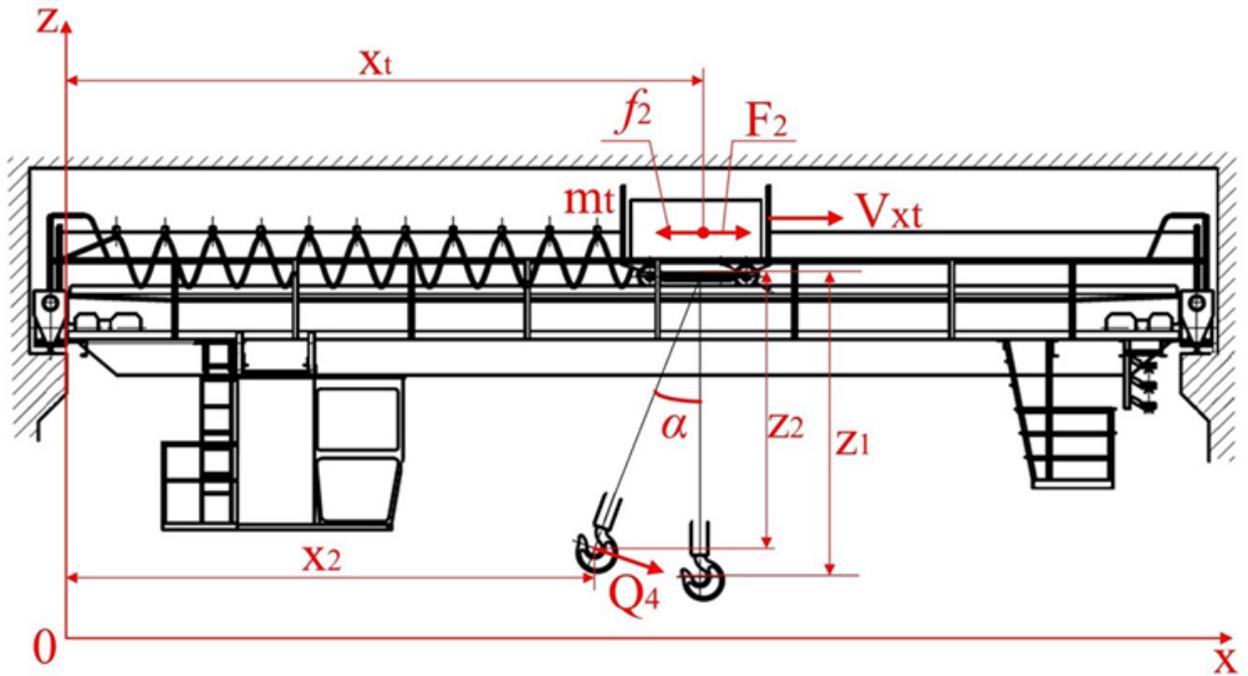


Рисунок 2.2 – Узагальнені координати та сили, що діють на механізм пересування вантажного візка

Кінетична енергія механізму підйому може бути визначена як:

$$T_{xt} = \frac{1}{2} m_t \cdot V_{xt}^2 = \frac{1}{2} \cdot m_{xt} \cdot \dot{x}_t^2, \quad (2.5)$$

де m_1 – маса вантажу з підвісом; m_t – маса вантажного візка; V_{xt} – швидкість вантажного візка; x_t – координата візка. Узагальнена координата x_t розраховується за формулою

$$x_t = \int_0^t V_{xt} \cdot dt + x_{t0}, \quad (2.6)$$

де x_{t0} – початкове значення координати візка крана.

Кінетична енергія вантажу по горизонтальній осі пересування візка x_2 визначається виразом:

$$T_x = \frac{1}{2} m_1 \cdot V_x^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 (x_2^2 + z_2^2), \quad (2.7)$$

де m_1 – маса вантажу; V_x – лінійна швидкість руху підвішеного вантажу по осі пересування візка; x_2 – координата підвішеного вантажу по горизонтальній осі; z_2 – координата підвішеного вантажу по вертикальній осі.

Координати x_2 та z_2 визначаються виразами

$$x_2 = x_1 - z_1 \cdot \sin \alpha, \quad (2.8)$$

$$z_2 = z_1 \cdot \cos \alpha, \quad (2.9)$$

де z_1 – координата вантажу (довжина підвісу); α – кут відхилення вантажу від вертикального положення.

Узагальнена сила Q_2 , що діє на механізм пересування вантажного візка, складається з сили, з якою діє електропривод F_2 та реактивної сили тертя:

$$Q_2 = F_2 - f_{0x} \cdot \text{sign}(x_1) - m_1 g \sin \alpha, \quad (2.10)$$

де f_{0x} – значення сили тертя.

Завдання розрахунку сили опору, що діє на підвішений вантаж під час його руху, є складним завданням через велику кількість змінних, що впливають на силу опору. Основними силами, що діють на підвішений вантаж, є тертя в канатах та поліспадах системи підвісу, а також сила опору повітря [14]. Дані сили є реактивними, тому рух вантажу при виведенні його з вертикального стану носить періодичний характер.

Узагальнена сила Q_4 , що діє на підвішений вантаж під час його руху, визначається виразом

$$Q_4 = -m_1 g \sin \alpha - b_x \cdot x_2, \quad (2.11)$$

де b_x – коефіцієнт згасання, кг/с.

У рівнянні (2.3) сила тертя f_1 може бути розрахована за виразом:

$$F_1 = \begin{cases} \frac{m_1}{\eta_{\text{під.}}} \\ m_1 \cdot \eta_{\text{сп.}} \end{cases}, \quad (2.12)$$

где $\eta_{\text{під.}}$ и $\eta_{\text{сп.}}$ – коефіцієнт корисної дії механізму при підйомі та спуску відповідно.

2.3 Математичні моделі системи електроприводу мостового крана

Для моделювання роботи механізмів мостового крана необхідно мати математичну модель електроприводу. У першому розділі розкривається питання актуальності застосування різних систем електроприводу для використання на мостовому крані, де відображені всі переваги системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором», тому як приводна система розглядається система ПЧ-АД. Діяльність розглядаються питання коливань вантажу під час руху механізмів крана, тому модель системи ПЧ-АД повинна адекватно відбивати електромеханічні процеси, які характеризуються коливаннями моменту, перерегулюванням і часом перехідного процесу значень змінних двигуна [13, 14]. Завдання зводиться до побудови динамічної математичної та комп'ютерної моделі ПЧ-АД.

Математична модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором будується на підставі Т-подібної схеми заміщення [14] (рисунок 2.3).

У схемі заміщення асинхронного двигуна використовуються такі параметри та змінні [13, 16]:

R_1 – активний опір фази обмотки статора;

$R_2 = ke^2 r_2$ – активний опір фази обмотки ротора, наведений до статора (ke - коефіцієнт трансформації ЕРС при нерухомому роторі [10]);

$X_1 = 2\pi f_1 L_1$ – індуктивний опір фази обмотки статора (L_1 – індуктивність потоків розсіювання обмотки статора);

$X_2 = ke^2x_2 = ke^22\pi f_2L_2$ – індуктивний опір фази обмотки статора (L_2 – індуктивність потоків розсіювання обмотки ротора);

r_m, x_m – активний та реактивний опір ланцюга намагнічування двигуна.

r_2, x_2 – каталожні дані параметрів електродвигуна;

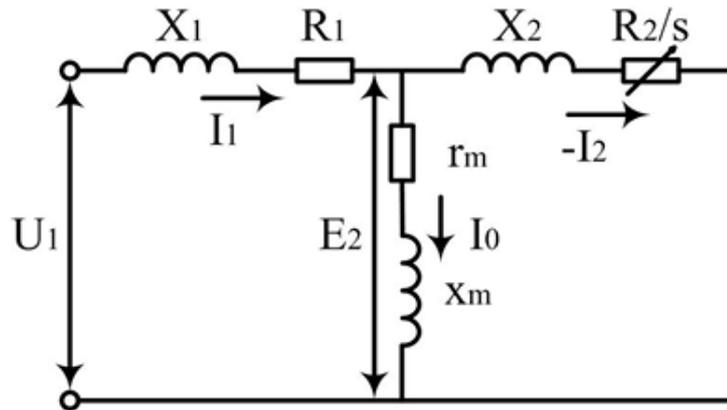


Рисунок 2.3 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Зміна частоти напруги, що живить двигун, з одночасною зміною модуля цієї напруги дозволяє регулювати швидкість асинхронного двигуна. Такий спосіб регулювання називається скалярним або U/f регулюванням [19]. Співвідношення величин частоти та напруги визначають вид механічних характеристик двигуна, а саме величину критичного ковзання та критичного моменту.

Для електроприводу мостового крана однією з основних вимог є підтримка сталості перевантажувальної здатності (максимального моменту) двигуна. Цю вимогу можна виконати, якщо підтримувати сталість співвідношення напруги та частоти [17, 12], тобто $U_1 / f_1 = const$. Однак, це співвідношення справедливе для двигунів великої потужності, в яких активний опір статора обмотки є малою величиною, якої можна знехтувати. У загальному випадку для підтримки сталості перевантажувальної здатності двигуна необхідно виконувати закон регулювання

$$\frac{E_1}{F_1} = const, \quad (2.13)$$

Для механізмів пересування вантажного візка та мосту часто застосовується розімкнена скалярна система електроприводу. Для механізму підйому переважно використовують скалярні або векторні системи регулювання зі зворотним зв'язком за швидкістю [17].

На рисунку 2.4 приведено функціональну схему скалярної системи ПЧ АТ, що реалізується більшістю виробників перетворювачів частоти [12].

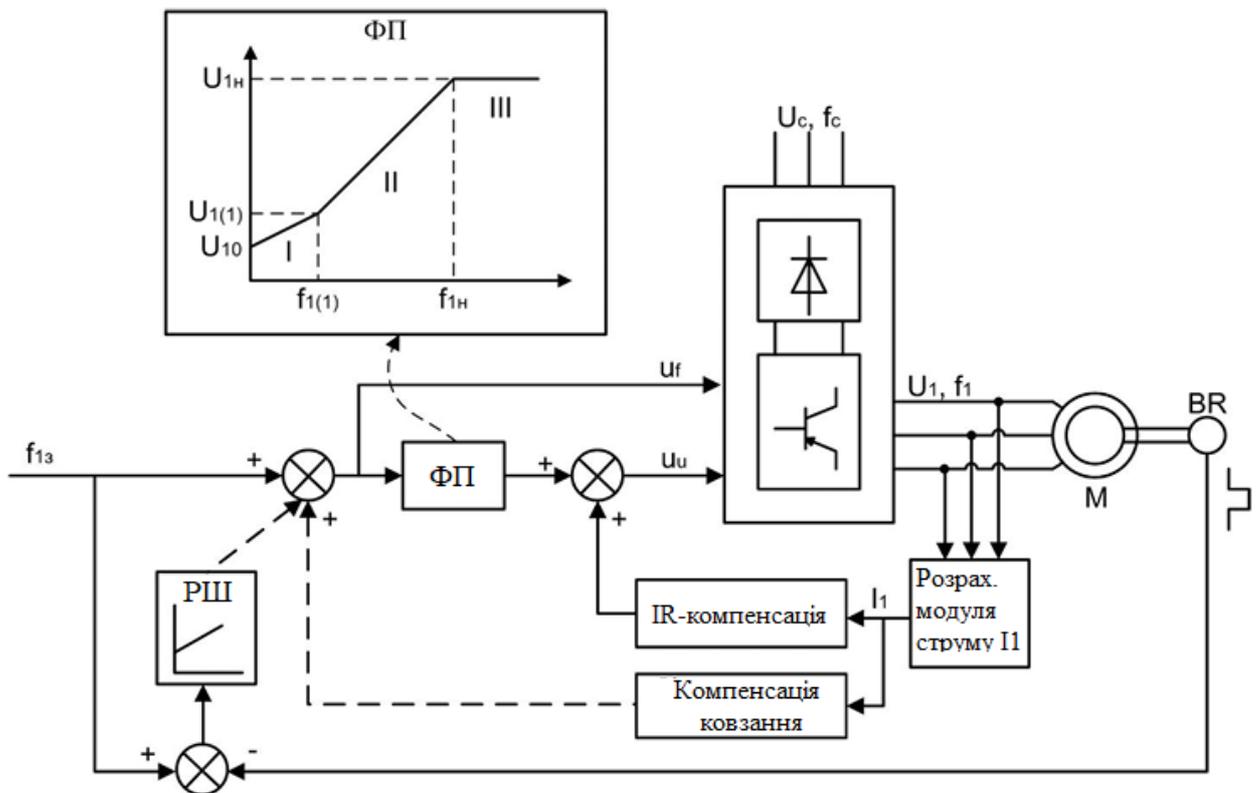


Рисунок 2.4 – Функціональна схема системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням

Функціональний перетворювач ФП представлений трьома характерними ділянками. Ділянка характеристики II є постійною залежністю $U1 / f1 = const$. Ділянка I має інший нахил, а отже іншу величину $U1 / f1$. При такому налаштуванні ФП напруга на затискачах двигуна 1 зменшується у меншій мірі, ніж частота 1, що призводить до деякої компенсації падіння напруги на активному опорі обмотки статора [6]. Ділянка характеристики III

визначає роботу перетворювача частоти у другій зоні регулювання, при якій напруга на затискачах двигуна обмежена на рівні $U_1 = U_{1н}$.

Блок IR-компенсації є пропорційною ланкою. Вихід блоку IR-компенсації надходить вихід функціонального перетворювача ФП і додає до сигналу завдання напруги величину, пропорційного струму статора (навантаженню). Це призводить до компенсації падіння напруги на опорі обмотки статора і збільшення потоку, що намагнічує [12]. Компенсацію можна побудувати на зворотному зв'язку за активним та повним струмом статора. У першому випадку коефіцієнт компенсації переважають у всіх режимах роботи постійний, оскільки зворотний зв'язок пропорційний навантаженню двигуна. Якщо зворотний зв'язок представлений повним струмом обмотки статора, сигнал на виході блоку IR-компенсації [23] може призводити до неприпустимого збільшення потоку намагнічування, тому коефіцієнт компенсації по повному струму статора необхідно коригувати в залежності від частоти мережі живлення.

Блок компенсації ковзання дозволяє отримати жорсткі механічні характеристики двигуна у всьому діапазоні зміни навантаження. Повний струм статора, пропорційний навантаженню, множиться на коефіцієнт компенсації, і приходить позитивним зворотним зв'язком на завдання частоти напруги живлення [13]. При збільшенні частоти пропорційно навантаженню збільшується швидкість ідеального холостого ходу, що призводить до формування штучної лінійної механічної характеристики із заданою жорсткістю.

Зауваження щодо застосовуваної системи:

1. Сигнали IR-компенсації та компенсації ковзання складаються з основними сигналами завдання, тобто. додатково САР скалярного регулювання заводиться позитивний зворотний зв'язок по модулю струму статора, що призводить до збільшення коливності замкнутої системи.

2. Компенсацію ковзання не можна використовувати двигунів малої потужності, оскільки в них порушена лінійна залежність між струмом статора та моментом [18].

У разі застосування замкнутої системи скалярного управління до сигналу завдання частоти напруги додається сигнал, пропорційний помилці регулювання з виходу ПІ-регулятора швидкості. Для реалізації цієї системи необхідний зворотний зв'язок за швидкістю. При цьому сигнал з виходу блоку компенсації ковзання не додається до сигналу завдання частоти.

З рівняння складається математична модель механізму підйому мостового крана, функціональна схема якої приведена на рисунку 2.5.

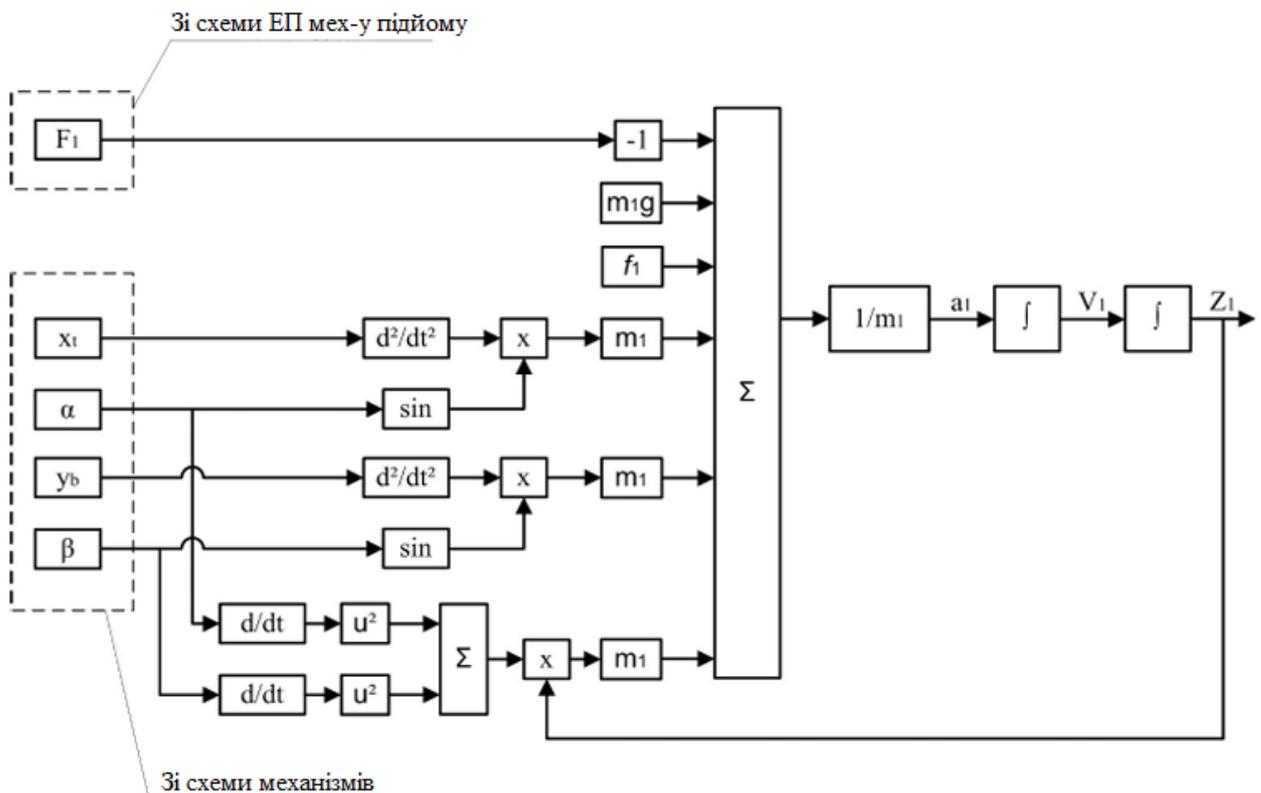


Рисунок 2.5 – Функціональна схема моделі механізму підйому

Функціональна схема механізму пересування вантажного візка приведена на рисунку 2.6, функціональна схема пересування моста приведена на рисунку 2.7.

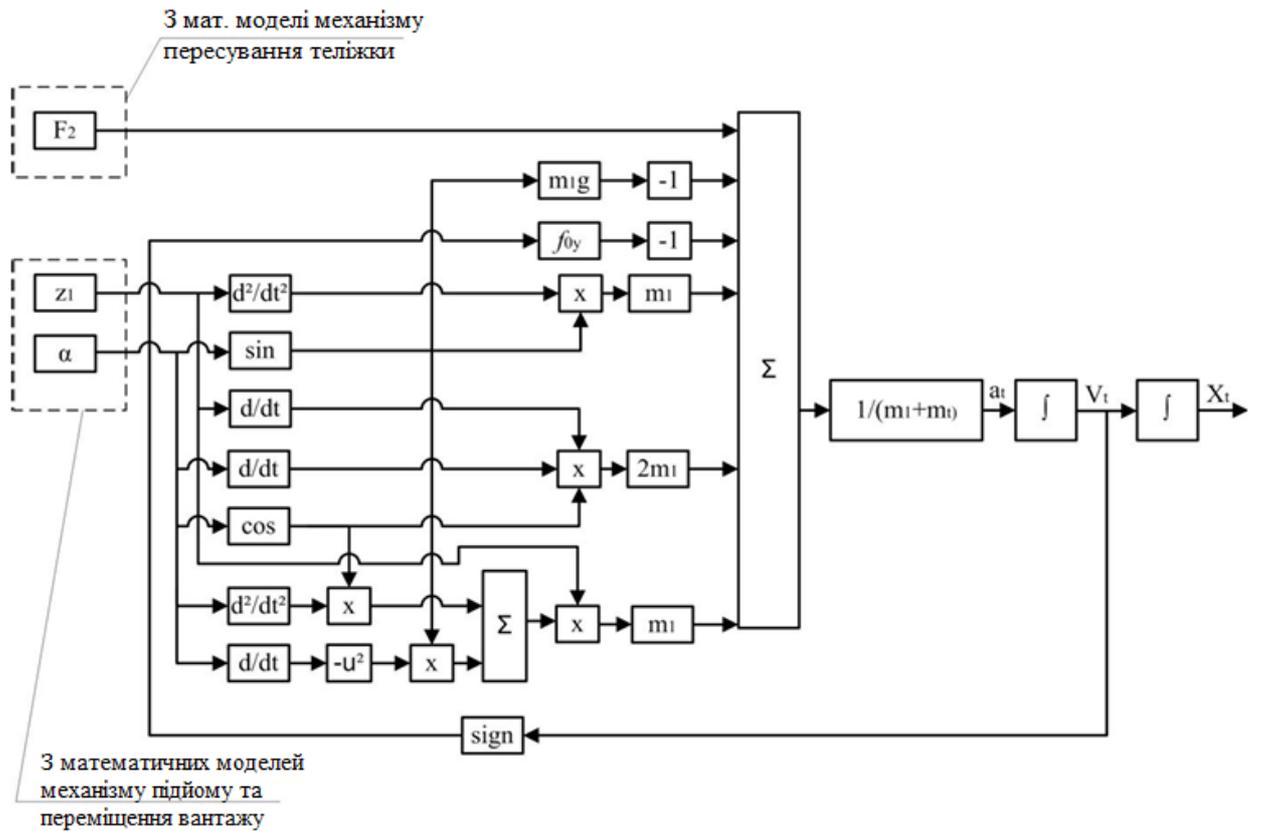


Рисунок 2.6 – Функціональна схема моделі механізму пересування вантажного візка

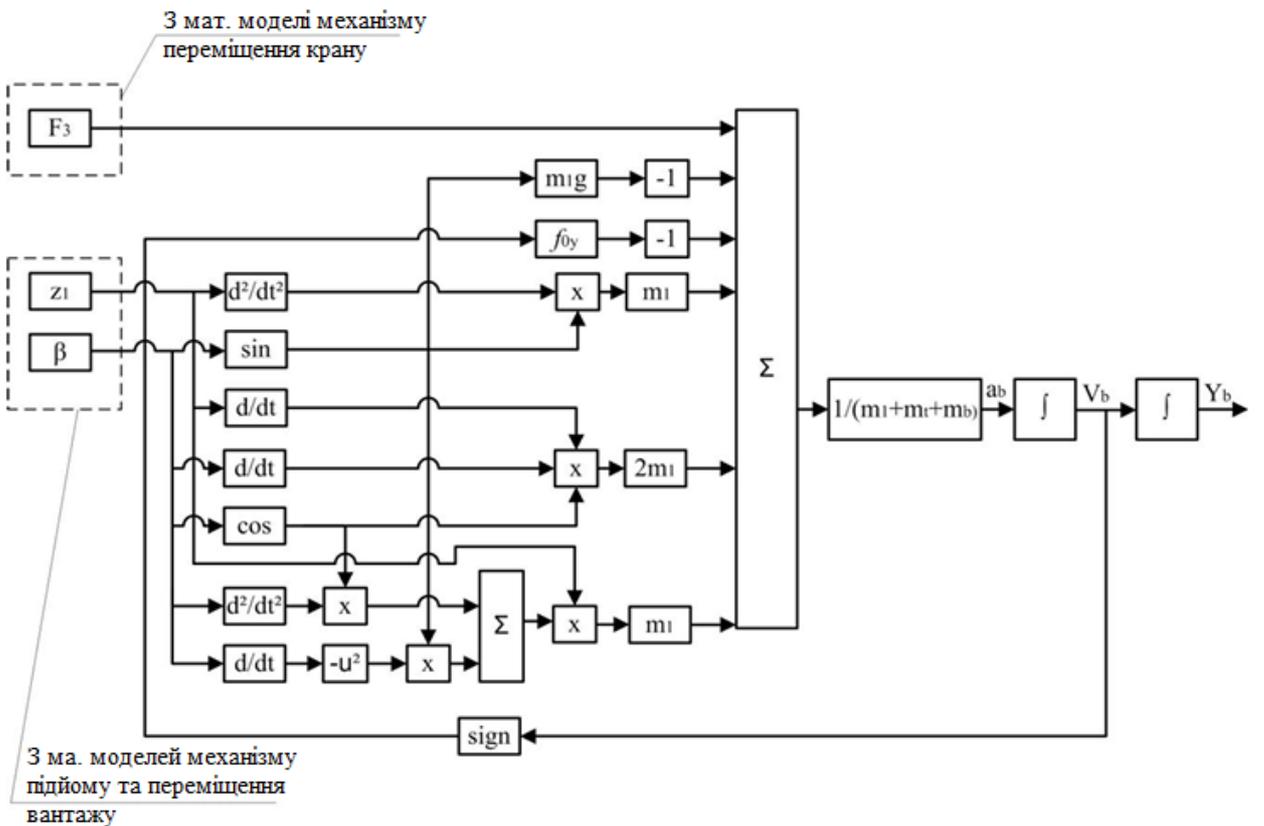


Рисунок 2.7 – Функціональна схема моделі механізму пересування мосту

Функціональна схема математичної моделі руху вантажу приведена на
 рисунку 2.8

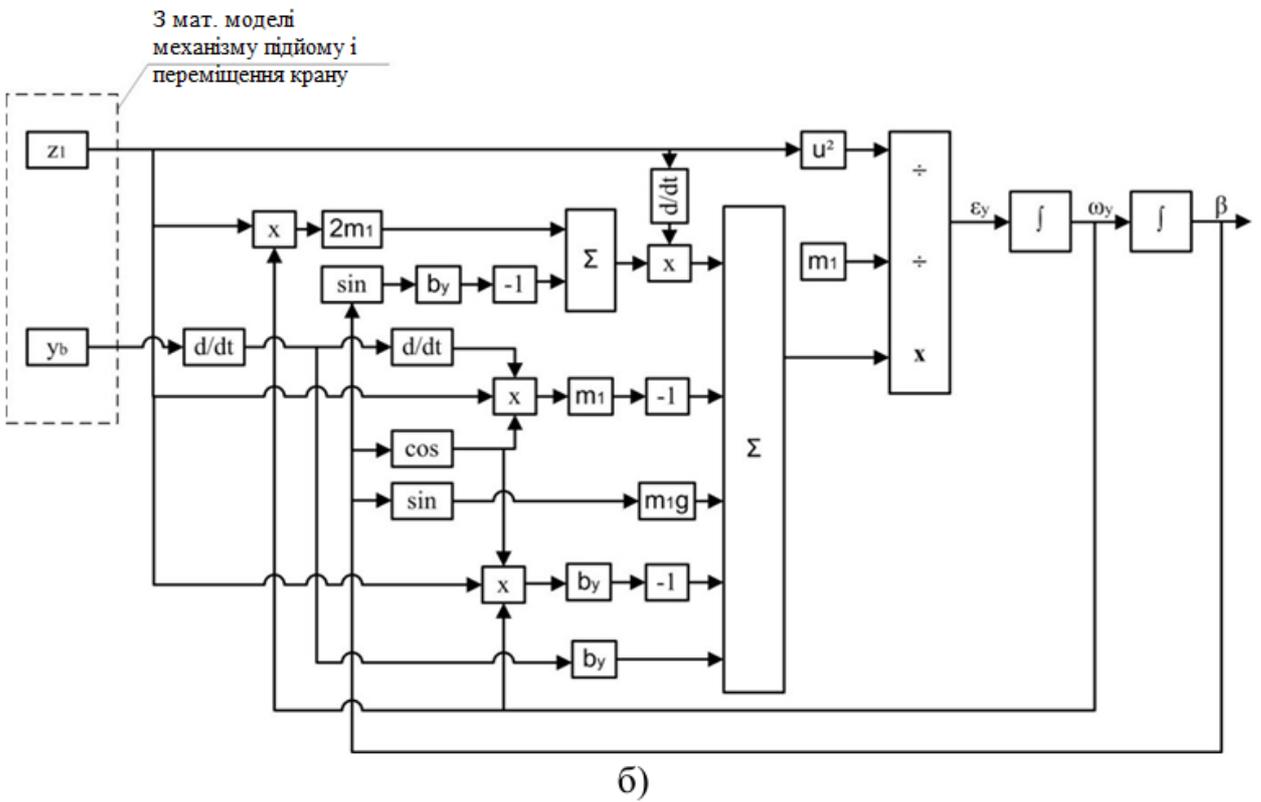
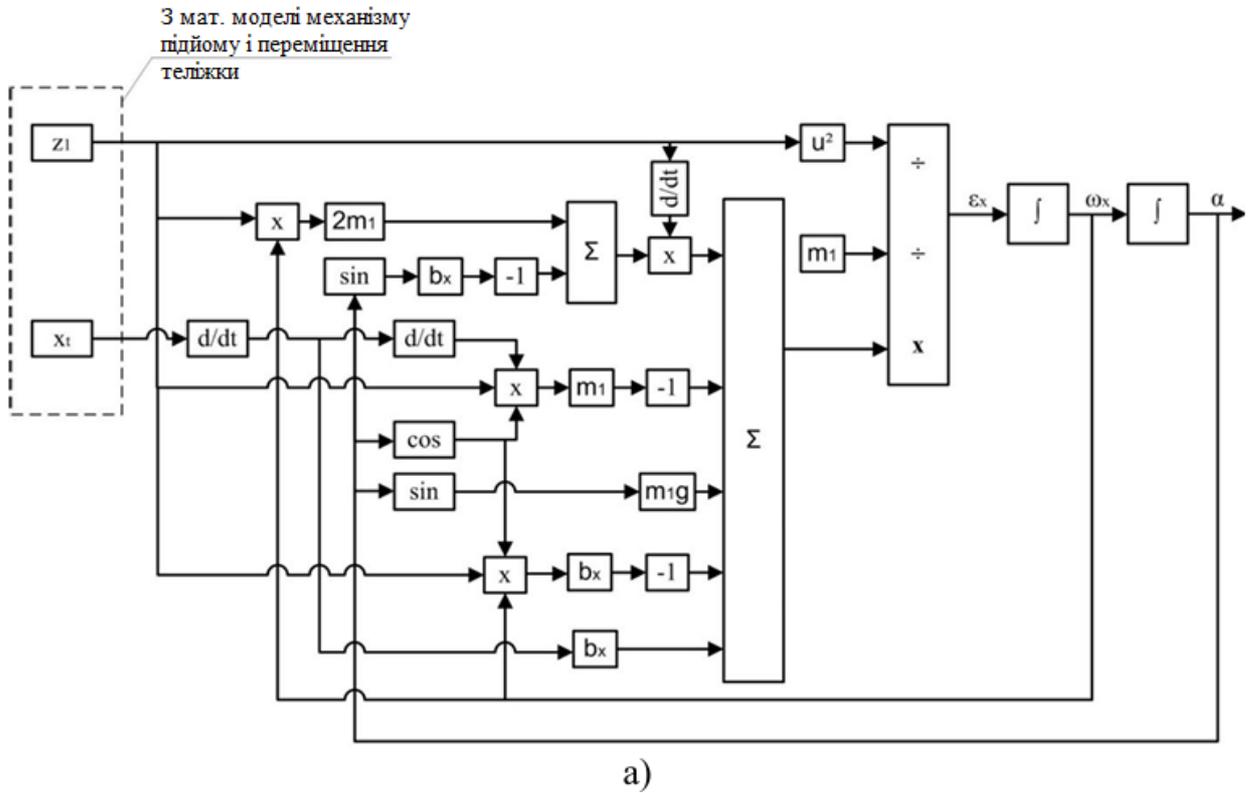


Рисунок 2.8 – Функціональна схема моделі руху підвішеного вантажу:
 а) по осі руху X; б) по осі руху Y

Всі функціональні схеми представлені в тому самому вигляді, в якому на виході системи є виражена величина узагальненої координати пересування або кута повороту. Як видно зі структурних схем різних механізмів мостового крана, величину прискорення механізму формує як система електроприводу та й додаткові впливи інших механізмів крана. Прикладом може бути вплив розгойдувань вантажу під час руху механізму пересування вантажного візка. На величину прискорення візка впливає додаткова величина, що діє по осі руху механізму і залежить від знака та величини кута відхилення вантажу. Зазначені додаткові зусилля передаються в систему електроприводу механізму, який при певному налаштуванні параметрів може вносити додаткову коливання роботи всього механізму.

Математична модель системи ПЧ-АД із скалярним регулюванням, функціональна схема якої приведена на рисунку 2.4, дозволяє будувати комп'ютерні моделі, використовуючи пакет прикладних програм Matlab. Побудова комп'ютерної моделі починається із моделі перетворювача частоти (рисунок 2.9).

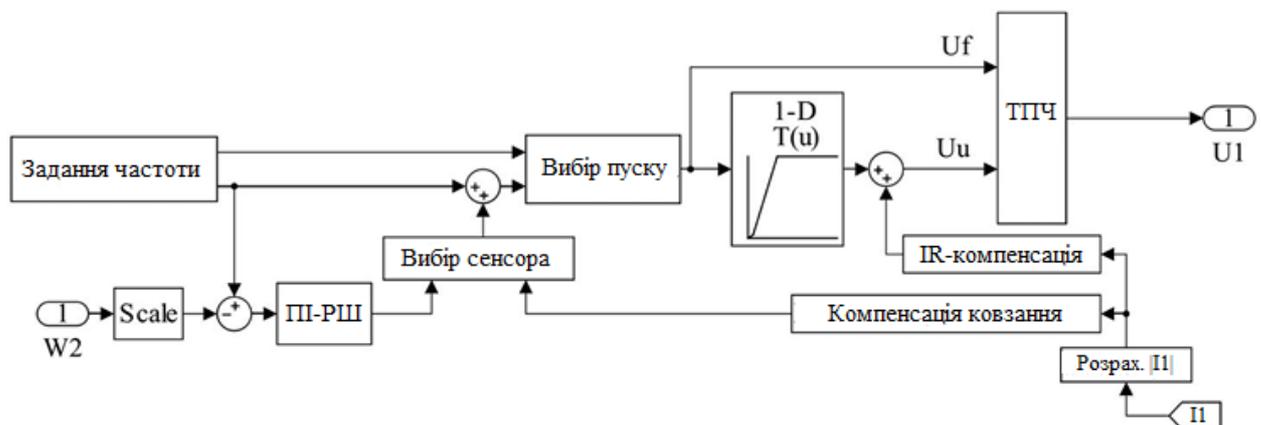


Рисунок 2.9 – Комп'ютерна модель перетворювача частоти

До складу комп'ютерної моделі перетворювача частоти (рисунок 2.9) включені такі блоки:

- Завдання частоти – блок визначає задану величину частоти та темп задатчика інтенсивності.

- Вибір пуску – використовується для моделювання прямого пуску двигуна шляхом встановлення прапора у діалоговому вікні. У протилежному випадку використовується пуск від задатчика інтенсивності.

- Scale – використовується для масштабування сигналу швидкості ротора;

- ПІ-РШ – пропорційно-інтегральний регулятор швидкості, з можливістю відключення інтегральної частини шляхом завдання нульового коефіцієнта.

- Вибір датчика – блок вибору використання зворотного зв'язку за швидкістю.

Інші блоки комп'ютерної моделі рисунку 2.9 збігаються з блоками функціональної схеми системи ПЧ-АД (рисунок 2.4).

Об'єднання двох комп'ютерних моделей (модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і модель перетворювача частоти) в одну дозволяє моделювати процеси в системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Комп'ютерна модель системи ПЧ-АД приведена на рисунку 2.10.

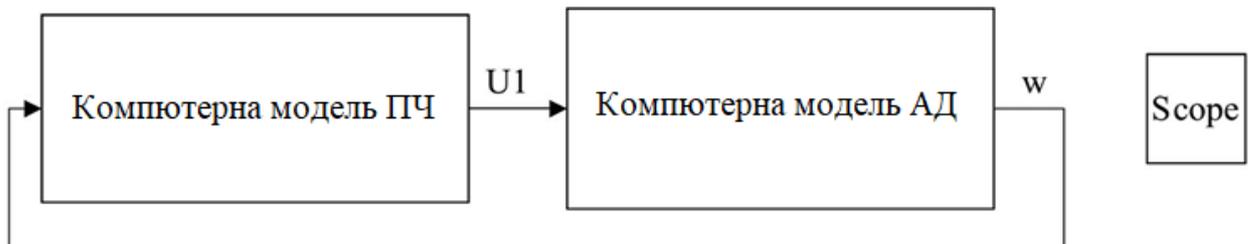


Рисунок 2.10 – Комп'ютерна модель системи

"Перетворювач частоти - Асинхронний двигун"

Блок Scope малюнку 2.10 використовується візуалізації результатів моделювання, перекладу змінних системи ПЧ-АД у відносні одиниці, і навіть збереження змінних у базі даних поля Workspace.

Достовірність моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можна визначити при моделюванні процесу прямого пуску двигуна.

Сигнал, що моделює напругу статора двигуна U_s , формується трьома синусоїдами, зрушеними на 120 ел. градусів та частотою 50 Гц.

Для перевірки достовірності моделі використовуються два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором [4] (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Параметри двигунів для перевірки комп'ютерної моделі

Параметр	Позн-я	Од. вим.	Механізм переміщення візка	Механізм переміщення крану
			Двигун 4A90L4Y3	Двигун МТКН312-6
Номінальна потужність	$P_{2н}$	кВт	2,2	15
Номінальна частота обертання	n_n	об/хв	1425	930
Номінальний струм статора обмотки	$I_{пн}$	А	5	36
Номінальний момент	M_n	Нм	14,7	124,8
Номінальний ККД	η_n	%	80	81
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_n$	-	0,83	0,78
Кратність пускового моменту	$M_{п}/M_n$	-	2,1	3,1
Кратність максимального моменту	M_m/M_n	-	2,4	3,2
Кратність пускового струму	$I_{п}/I_n$	-	4,5	5
Момент інерції ротора	J_d	кг·м ²	0,056	1,2

Перехідні процеси пуску двигунів від задатчика інтенсивності приведені на рисунку 2.11.

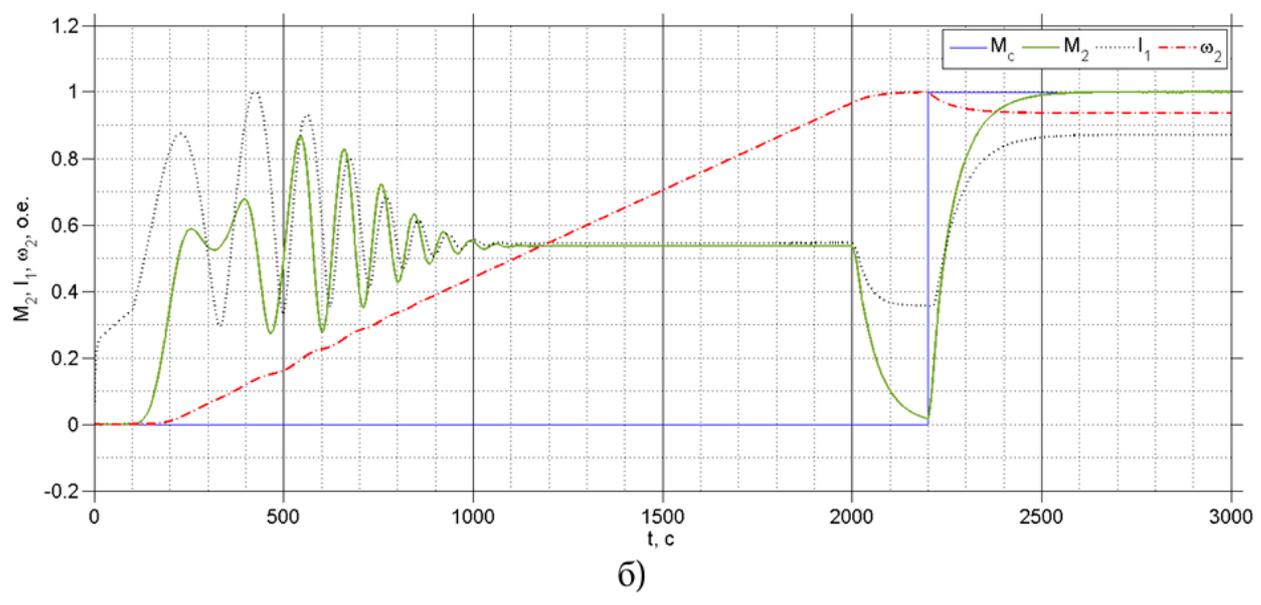
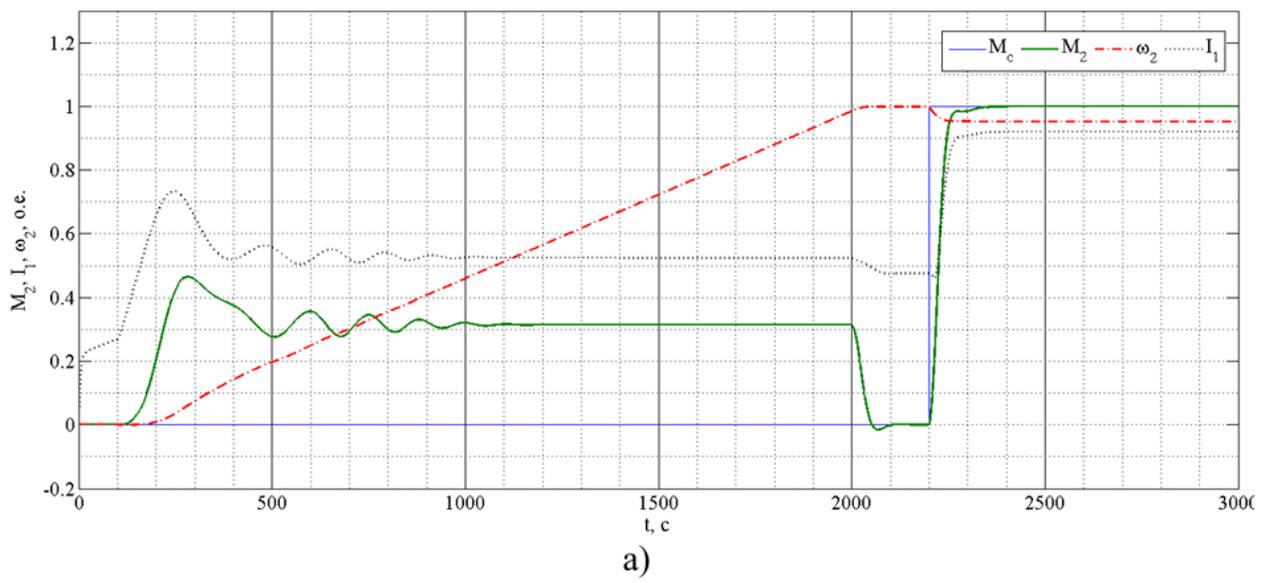


Рисунок 2.11 – Перехідні процеси запуску від задатчика інтенсивності:
а) 4A90L4Y3; б) MTKH312-6

Побудована комп'ютерна модель адекватно відображає перехідні та статичні процеси системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун».

2.4 Висновки

При аналізі механічної системи мостового крана використовуються 4 елементи мостового крана: механізм підйому, механізми пересування крана та вантажного візка, а також вантаж на підвісі. Система підвісу вантажу розкладається на дві підсистеми по двох горизонтальних осях руху. Таким чином мостовий кран є багатомасовою взаємозалежною системою із взаємними зворотними зв'язками між чотирма масами механізмів крана.

На основі математичної моделі механічної системи мостового крана розроблено комп'ютерну модель системи електропривода. Моделювання виконується за допомогою пакету прикладних програм для чисельних розрахунків та візуалізації MATLAB (MathWorks) з бібліотекою Simulink. Комп'ютерна модель мостового крана включає модель кранового електроприводу по системі «перетворювач частоти – асинхронний двигун».

3 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОСТОВОГО КРАНУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

3.1 Система керування електропривода мостового крану для зменшення коливань вантажу

Метою данного розділу є розробка принципів та технічних засобів, що дозволяють зменшити або повністю компенсувати розгойдування вантажу у динамічних та статичних режимах роботи.

Для зменшення коливань вантажу необхідно задавати швидкість механізмів у певний спосіб, формуючи певне прискорення механізму пересування. У ручному режимі такий спосіб регулювання є набір послідовних операцій машиніста за схемою «пуск гальмування-пуск» або «гальмування-пуск-гальмування» [22]. Під час пуску системи електроприводу задається команда «Пуск». Механізм пересування починає рух уперед із деяким прискоренням, у своїй вантаж відстає від механізму пересування внаслідок інерції (рисунок 3.1).

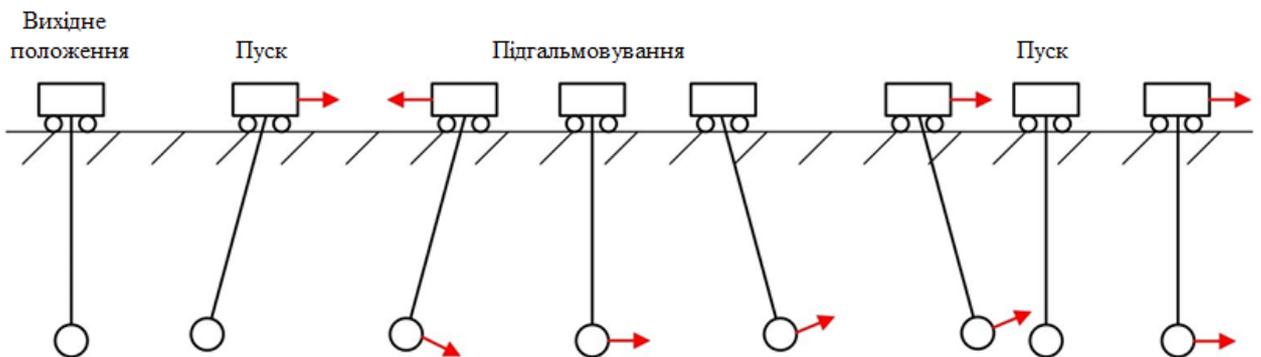


Рисунок 3.1 – Принцип гасіння розгойдувань вантажу у ручному режимі

Потім машиніст дає завдання на гальмування механізму, і вантаж починає «обганяти» механізм пересування. Далі машиніст знову дає команду «Пуск» системі електроприводу та механізм пересування займає позицію безпосередньо під вантажем, рухаючись у тому самому напрямку.

Подальший рух вантажу та механізму пересування продовжується з однаковою швидкістю та координатою.

Існують автоматичні способи гасіння коливань підвішеного вантажу. У разі машиністу необхідно лише задати швидкість пересування механізму, а система управління коригує цю швидкість із метою зменшення коливань.

Відповідно до виразів (1.3) - (1.6) для автоматичного демпфування коливань вантажу у всіх режимах необхідно сформулювати необхідний динамічний момент системи електроприводу або необхідне прискорення електроприводу механізму пересування. Для реалізації способу демпфування коливань вантажу шляхом формування динамічного зусилля необхідно мати значення довжини підвісу і маси вантажу в реальному часі, а для реалізації другого способу (формування прискорення механізму) необхідно знати тільки значення довжини підвісу. Обидві зазначені технологічні величини (довжина підвісу і маса вантажу) можна виміряти прямими чи опосередкованими способами, проте найкращим способом реалізації системи демпфування коливань вантажу є спосіб формування прискорення, т.к. він простіший.

Удосконалена система управління електроприводами мостового крана для демпфування коливань вантажу заснована на наявності інформації про вугілля відхилення вантажу у кожний момент часу. Це завдання можна виконати двома способами: програмно (за допомогою математичної моделі крана, яка розраховує кут відхилення вантажу) та апаратно (із застосуванням датчиком відхилення кута) [36, 49]. У випадку функціональна схема системи електроприводу має вигляд, приведений на рисунку 3.1 [5-6].

У вдосконаленій СУЕП може використовуватися система управління з математичною моделлю, або система з датчиком положення вантажу [12].

Структурну схему вдосконаленої СУЕП для демпфування коливань підвішеного вантажу приведено на рисунку 3.3.

Якщо величину демпфування (коефіцієнт $K_{0\alpha}$) зробити величиною постійною, то це технічне рішення функціонуватиме лише на певній довжині підвісу вантажу (рисунок 3.11). Може виникнути ситуація, коли коефіцієнт зворотного зв'язку з кута відхилення вантажу підібраний для найбільшої довжини підвісу l_1 , а кран працює з малою величиною довжини підвісу l_2 . Це може призвести до того, що механізм пересування мостового крана обганятиме вантаж при кожному його коливанні і призведе до негатовних або резонансних коливань. Якщо коефіцієнт зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу системи налаштований на найменшу довжину підвісу, то при роботі крана на рівні підлоги промислового майданчика демпфування коливань вантажу не буде. Отже, ступінь демпфування залежить від довжини підвісу, т.к. при великій довжині підвісу координата вантажу по горизонтальній осі при тому самому відхиленні буде більше, ніж при малій довжині підвісу.

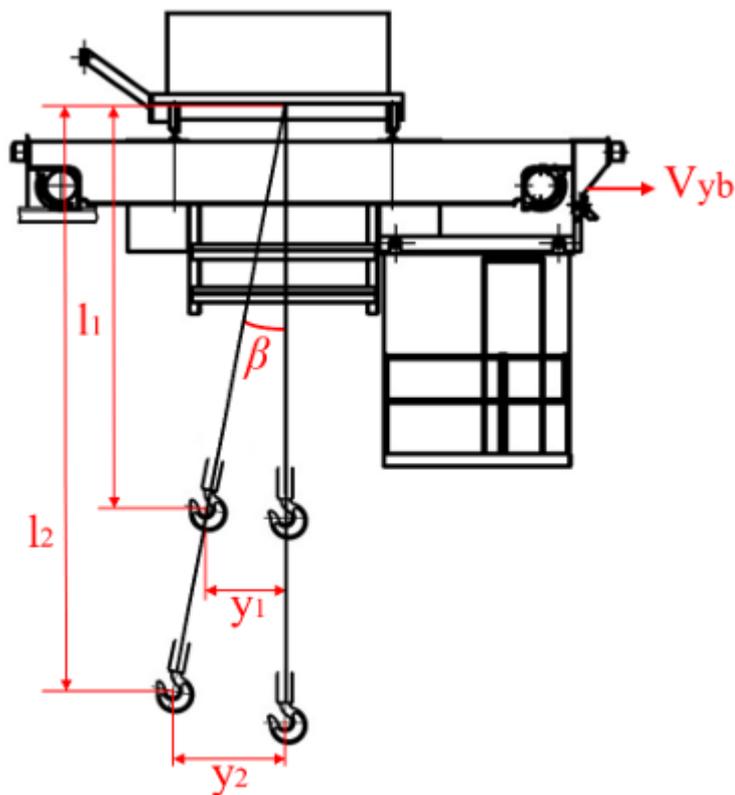


Рисунок 3.4 – Залежність координати вантажу від величини довжини підвісу

Існуючі СУЕП для демпфування коливань вантажу мостового крана розраховують значення довжини підвісу за допомогою датчика швидкості або положення на валу двигуна електроприводу підйому шляхом функціональних залежностей або вручну машиністом крана. Одним із точних способів визначення довжини підвісу є застосування абсолютних або інкрементальних енкодерів.

У цій роботі пропонується новий метод непрямого визначення довжини підвісу мостового крана, який базується на аналізі сигналу зворотного зв'язку з кута відхилення вантажу. Сигнал з датчика кута відхилення вантажу дозволяє визначати характеристики коливань вантажу, зокрема період його коливань під час розгону та гальмування механізму крана. Оскільки період коливань вантажу безпосередньо залежить від довжини підвісу, використання цього сигналу дає можливість оцінювати довжину підвісу без додаткових сенсорів або механічних вимірювань. Такий підхід дозволяє інтегрувати систему з існуючими електроприводами та підвищує точність контролю коливань вантажу в динамічних режимах.

Проте в практичних умовах роботи крана період коливань вантажу часто порівнянний за часом із тривалістю розгону або гальмування механізму. Це означає, що система непрямого визначення довжини підвісу може ефективно працювати лише в режимах усталеного руху, коли механізм досягнув стабільної швидкості і коливання вантажу мають стійку періодичність. В режимах розгону та гальмування точність оцінки довжини підвісу може знижуватись, що в свою чергу обмежує оперативне застосування системи для динамічних маневрів. Таким чином, хоча запропонований метод дозволяє зменшити кількість сенсорів і спростити конструкцію крана, він накладає певні обмеження на продуктивність та швидкість роботи механізму, особливо під час частих змін швидкості та режимів пересування вантажу.

В основі нового принципу визначення довжини підвісу лежить алгоритм визначення періоду власних коливань вантажу за час, що дорівнює

1/4 періоду. На рисунку 3.5 приведені розрахункові графіки перехідних процесів пуску з різною довжиною підвісу, розраховані за рівняннями (1.4) – (1.6). Час пуску приймається рівним 1 с, довжини підвісу набирають значення $l_1 = 5$ м і $l_2 = 10$ м, прискорення механізму $a_{\text{мех}} = 0,25$ м/с², маса вантажу в 3,7 рази більше маси механізму ($m_T/m_{\text{мех}} = 3,7$).

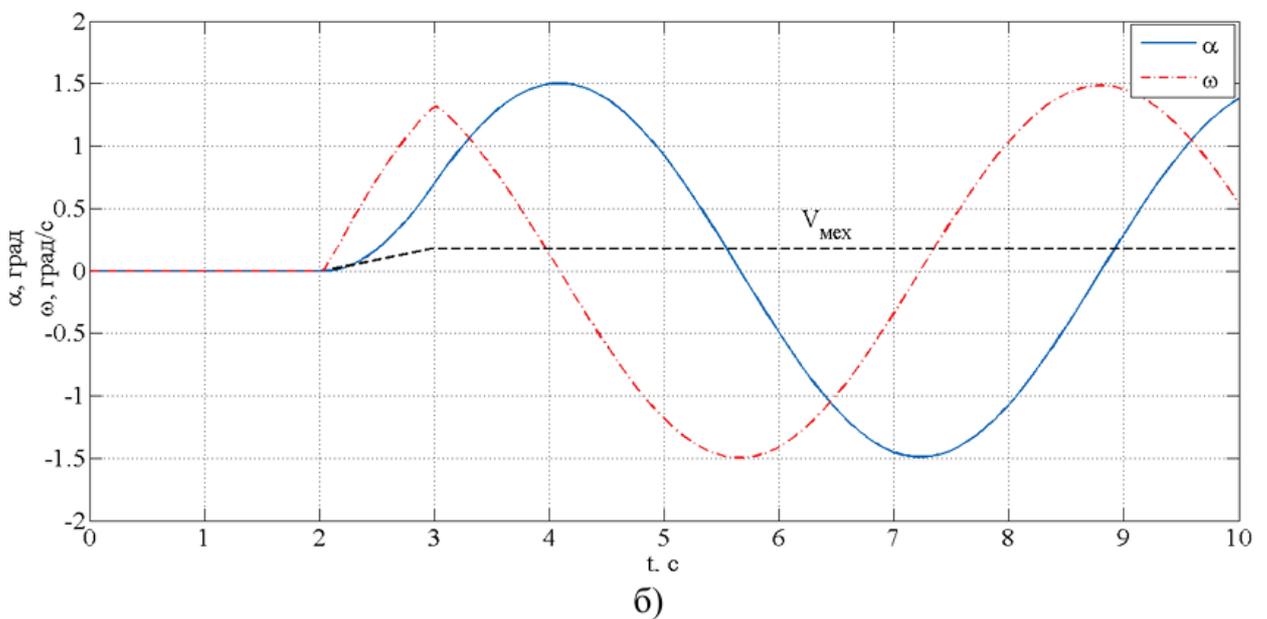
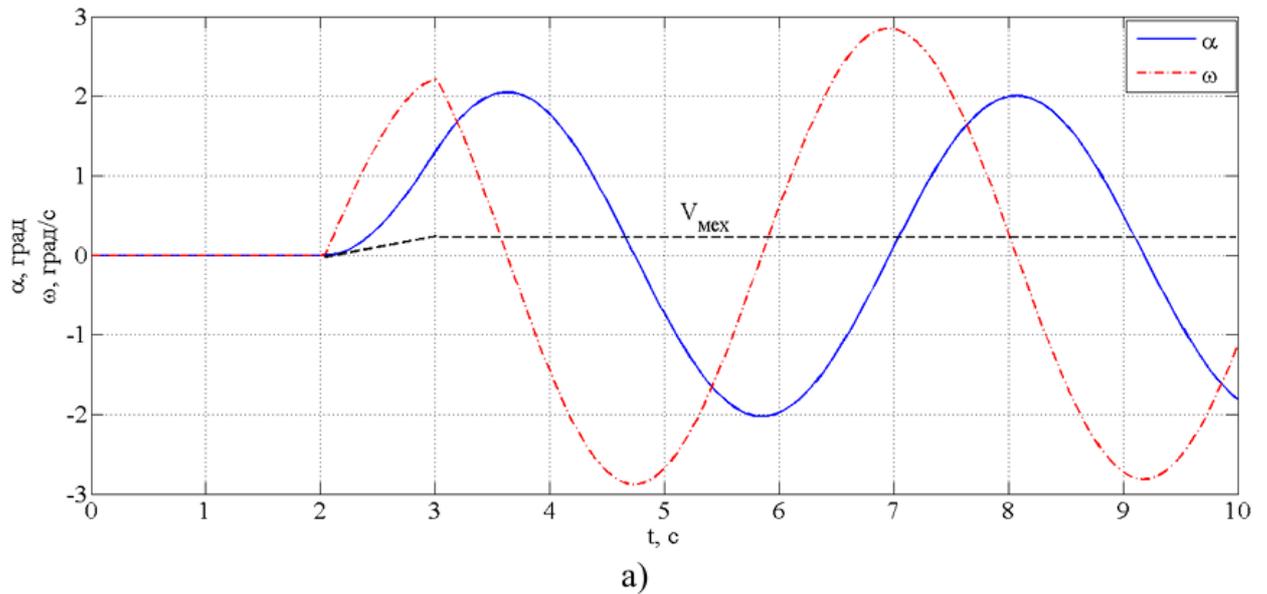


Рисунок 3.5 – Розрахункові перехідні процеси координати та швидкості вантажу при пуску на підвісі завдовжки:
а) $l_1 = 5$ м; б) $l_2 = 10$ м

Перехідні процеси прискорення вантажу, представлені малюнку 3.5 мають різні моменти часу перетину кривої з віссю абсцис, які відповідають $1/4$ періоду власних коливань вантажу. На малюнку 3.6 для порівняння подано два графіки зміни кутової швидкості вантажу, підвішеного на різній висоті.

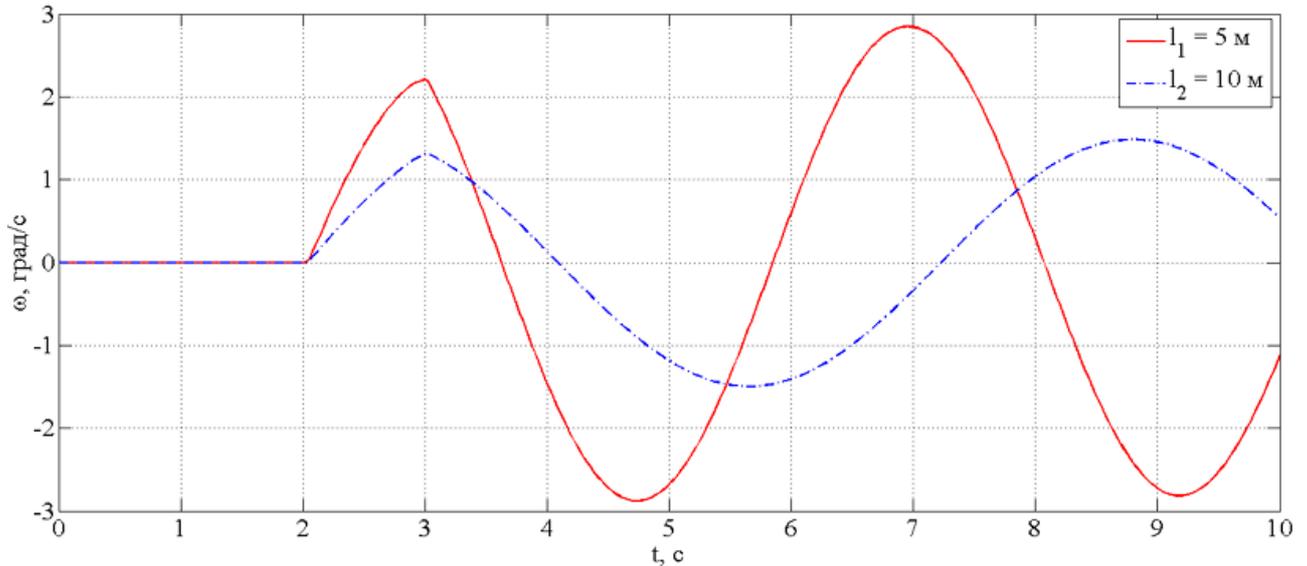


Рисунок 3.6 – Графіки кутової швидкості вантажу на різній висоті підвісу

Для варіанта пуску механізму з довжиною підвісу $l_1 = 5$ м максимум кривої швидкості досягається в момент часу 1,13 с, отже період коливань вантажу дорівнює 4,52 с. Розрахункове значення періоду коливання для довжини підвісу 5 м дорівнює

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{\text{ван.}}} = 2\pi\sqrt{l_1/g} = 2\pi\sqrt{5/9,81} = 4,49 \text{ с.} \quad (3.1)$$

Помилка визначення періоду коливань вантажу становить 0,7%.

З певного значення $1/4$ періоду коливань можна здійснити зворотне завдання, тобто. визначити довжину підвісу за формулою:

$$l_1 = g \cdot \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2 = 9,81 \cdot \left(\frac{4 \cdot 1,13}{2\pi} \right)^2 = 5,08 \text{ м.} \quad (3.2)$$

Помилка визначення довжини підвісу запропонованим способом

становить 16%. Поданий метод дозволяє з високою точністю визначати значення часу періоду коливань.

Даний спосіб лежить в основі створення алгоритму визначення коефіцієнта посилення зворотного зв'язку по куті відхилення підвішеного вантажу koa у функції періоду коливань вантажу. Інакше кажучи, можна реалізувати систему управління, яка коригує коефіцієнт koa у процесі роботи крана. На рисунку 3.7 приведений алгоритм визначення коефіцієнта зворотний зв'язок виходячи з розрахунку періоду коливань вантажу.

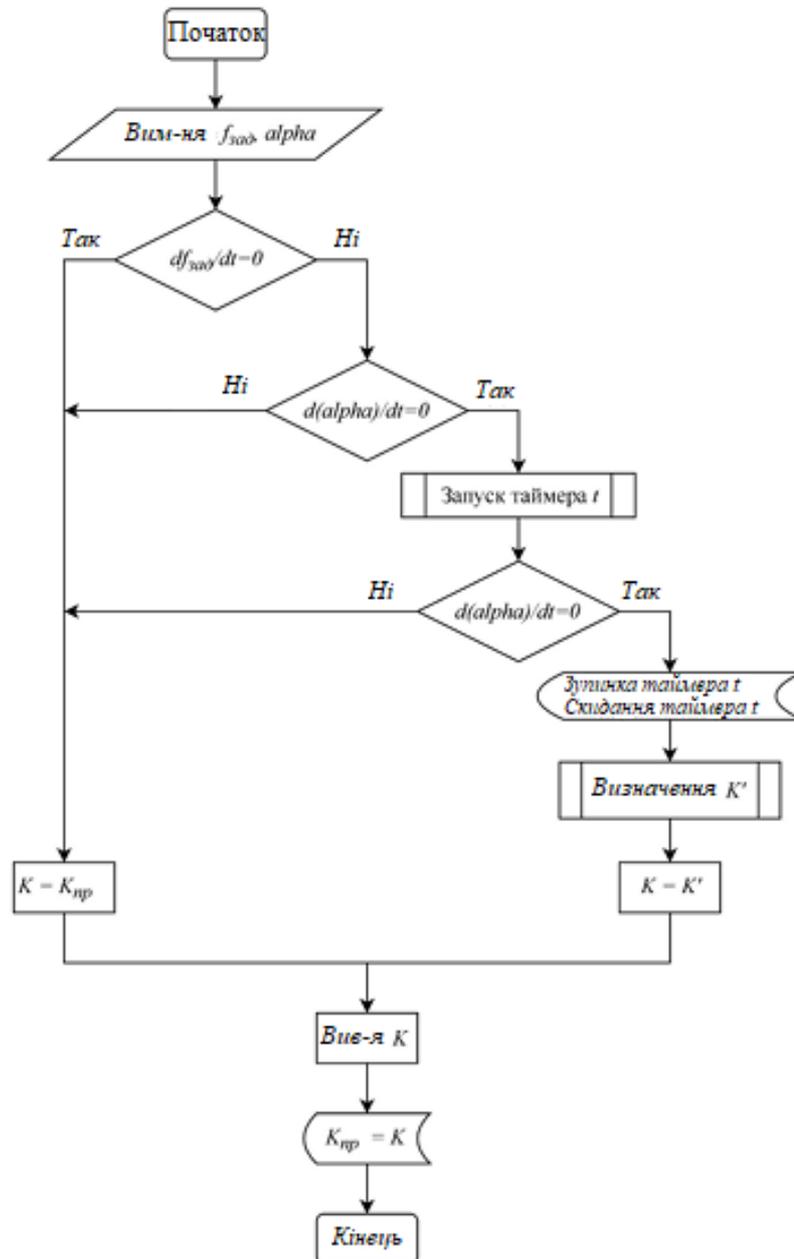


Рисунок 3.7 – Алгоритм визначення коефіцієнта зворотного зв'язку по куту відхилення вантажу

Алгоритм визначення коефіцієнта зворотного зв'язку включає безперервний процес визначення або вимірювання двох змінних: $f_{зад}$ - величина завдання швидкості електроприводу пересування механізму (як правило, це величина завдання частоти в Гц), яка може бути визначена як вбудована змінна перетворювача частоти засобами і можливостями промислових мереж; α – кут відхилення вантажу.

У блоці «Вимірювання $f_{зад}$, α » за допомогою промислової мережі визначається величина завдання швидкості системи електроприводу та вимірюється величина кута відхилення вантажу за допомогою датчика. Далі в блоці « $df_{зад}/dt=0$ » проводиться перевірка зміни завдання швидкості для того, щоб визначити момент початку переходного процесу швидкості механізму пересування. Якщо машиніст не змінює величину швидкості механізму, коефіцієнт K не змінюється. Якщо механізм пересування рухається рівноприскорено або рівнозамедлено, далі починається процес визначення моменту часу з нульовим кутовим прискоренням вантажу (блок « $d(\alpha)/dt=0$ »). У момент часу, коли кутове прискорення вантажу дорівнює нулю, запускається таймер (блок «Запуск таймера t »), що відраховує період часу (блок $d(\alpha)/dt=0$) до наступного переходу кривої прискорення через нульове значення (рисунок 3.12). Потім значення таймера зберігається для розрахунку в блоці "Визначення K " і скидається. Після розрахунку нового коефіцієнта посилення K його значення зберігається і застосовується в системі демпфування коливань вантажу.

Особливістю представленого алгоритму і те, що коефіцієнт демпфування D коригується безупинно у процесі роботи крана. У проміжках часу, які лежать у межах $1/4$ періоду коливань вантажу, коефіцієнт зберігається на розрахованому раніше значенні $K_{пр}$. Такий підхід дозволяє впливати на систему електроприводу механізму при ненульових початкових умовах і одночасної роботі декількох механізмів крана (наприклад, коли одночасно працює механізм пересування і підйому). Блок «Визначення K' » малюнку 3.7 має свій алгоритм розрахунку коефіцієнта.

Особливістю проекрованої системи є її універсальність і широке застосування практично в будь-якій системі частотно-регульованого електроприводу. Для організації роботи системи потрібна лише наявність промислового інтерфейсу у складі перетворювача частоти або додаткових аналогових входів, що мають функцію зміни величини завдання швидкості. Система не передбачає зміни внутрішньої структури організації системи керування швидкістю електроприводу, а також не потребує застосування додаткових регуляторів (наприклад, ПД-регулятора).

Для моделювання роботи системи електроприводу мостового крана приймається кран, технічні характеристики якого вказані у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні дані мостового крана, прийнятого для моделювання

Параметр	Од. вим-я	Значення
Вантажопідйомність крана	т	10
Група режиму роботи крану	-	A7
Довжина прольоту	м	16,5
Висота підйому	м	20
Швидкість підйому	м/с	0,66
Швидкість переміщення крану	м/с	1,6
Швидкість переміщення візка	м/с	0,66
Повна маса крану, не більше	т	27
Маса візка	т	5
Діаметр коліс крану	мм	400
Діаметр коліс візка	мм	250
Діаметр барабанумеханізму підйому	мм	420
Потужність двигуна механізму підйому	кВт	22
Номінальна швидкість двгуна механізму підйому	об./хв.	975
Потужність двигуна механізму переміщення моста	кВт	2x5,5
Номінальна швидкість двгуна механізму переміщення мосту	об/хв	1420
Потужність двигуна механізму переміщення візка	кВт	2,2
Номінальна швидкість двгуна механізму переміщення візка	об/хв	1420

Для аналізу проектованої системи демпфування коливань вантажу моделюються процеси пуску та гальмування механізму пересування вантажного візка, причому час пуску та гальмування різні для різних режимів, що моделюються.

Для аналізу проектованої системи демпфування коливань вантажу моделюються процеси пуску та гальмування механізму пересування вантажного візка, причому час пуску та гальмування різні для різних режимів, що моделюються.

Для аналізу працездатності проектованої системи змодельовано два процеси роботи механізму за трапецеїдальною тахограмою.

У першому випадку моделюється пуск та гальмування системи електроприводу механізму пересування візка (час пуску та гальмування приймаються рівними 5 с), довжина підвісу приймається рівною 20 м (рисунок 3.8).

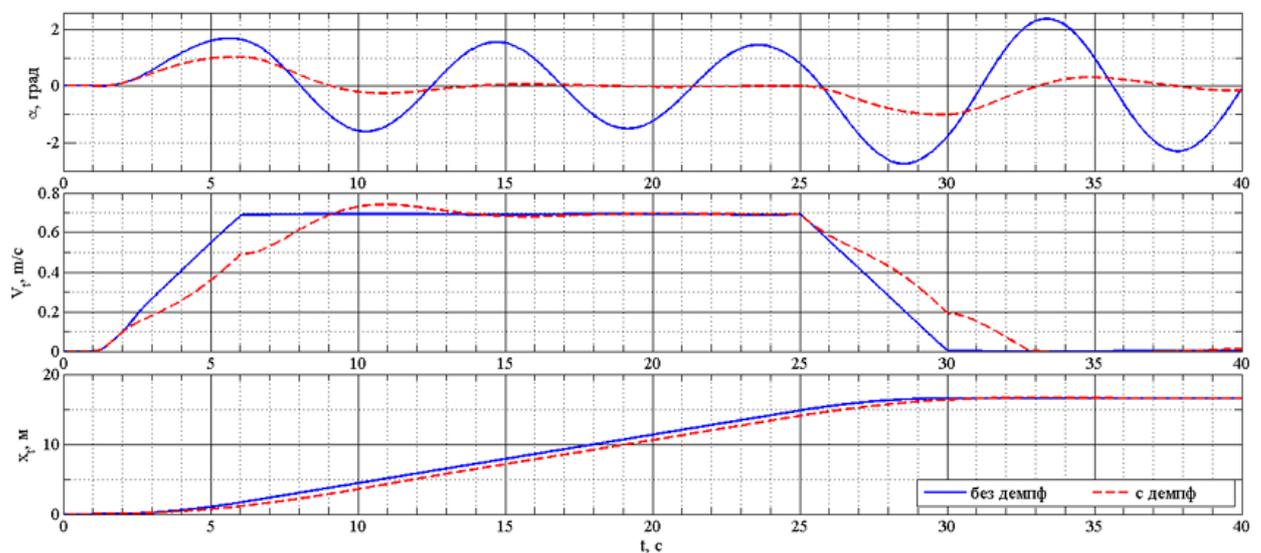


Рисунок 3.8 – Перехідні процеси швидкості, координати візка та відхилення вантажу

За час роботи системи електроприводу механізм пересування візка проходить шлях, що дорівнює $x_t = 16$ м, розвиваючи номінальну швидкість пересування $V_t = 0,66$ м/с. Система кранового електроприводу без системи

демпфування коливань вантажу призводить до значних відхилень вантажу від вертикального положення. Як очевидно з графіків малюнку 3.18 максимальна величина відхилення вантажу, під час роботи без системи демпфування коливань, становить $\alpha = 2,9$ градуса. При довжині підвісу, що дорівнює $L = 20$ м, величина абсолютного відхилення вантажу в горизонтальній площині досягає 1 м.

Проектована система демпфування коливань вантажу дозволяє зменшити амплітуду та тривалість коливань і робить процес коливань вантажу аперіодичним або загасаючим з великим декрементом загасання (рисунок 3.8). Це досягається шляхом обмеження прискорення механізму пересування візка шляхом завдання певного профілю швидкості.

Різниця часу досягнення заданих значень швидкості досягає 4 секунд, проте процес гасіння коливань системи без засобів демпфування коливань займає набагато більше часу. Для даного прикладу час зупинки розгойдувань вантажу під час руху візка становить 2 хв.

Збільшення час пуску і гальмування, що виникає під час роботи вдосконаленої СУЕП впливає величину динамічного моменту двигуна, отже величину відхилення вантажу в перехідних режимах роботи. Може здатися, що цей факт є визначальним під час гасіння коливань вантажу і для вирішення проблеми коливань буде достатнім збільшити час пуску та гальмування електричного приводу без застосування додаткових контурів та систем.

Для перевірки можливості гасіння коливань вантажу без застосування вдосконаленої СУЕП, а за рахунок збільшення часу пуску та гальмування механізму пересування вантажного візка, змодельовані процеси, в яких забезпечується однаковий розгін приводу у вдосконаленому та існуючому СУЕП (рисунок 3.9). Для цього час пуску та гальмування системи електроприводу змінені до значень 9 с, яке приблизно дорівнює часу досягнення заданої швидкості під час роботи вдосконаленої СУЕП.

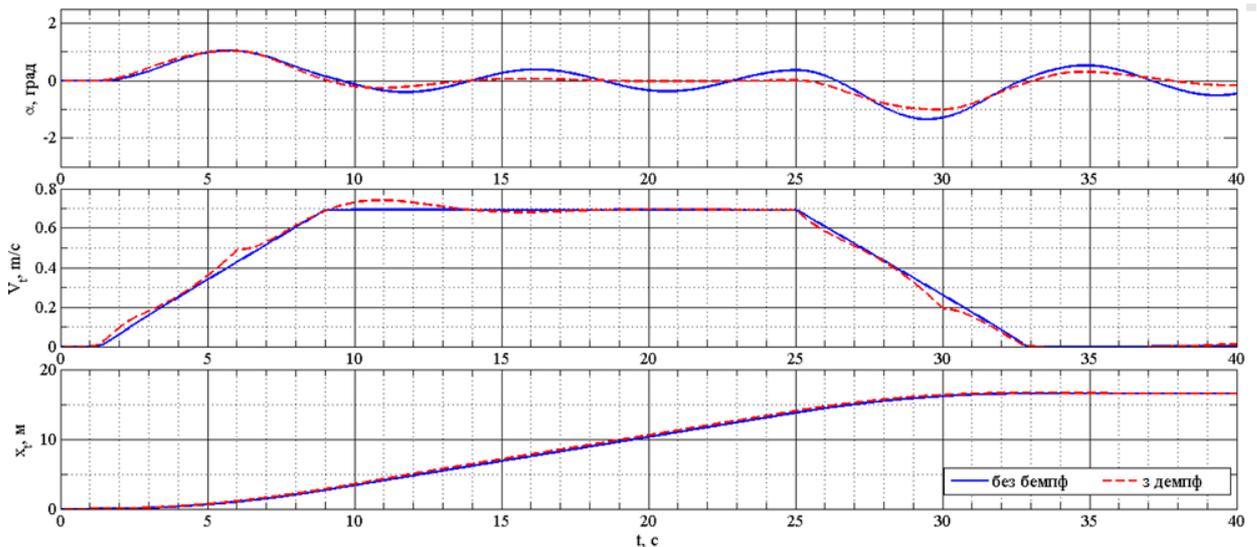


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси швидкості, координати візка та відхилення вантажу за однакових темпів розгону приводу в удосконаленій та існуючій СУЕП

З метою моделювання всіх можливостей сучасної системи електроприводу ПЧ-АД тахограма задана у вигляді S-подібної характеристики, що також сприяє зменшенню динамічного моменту та ривка, що викликають хитання вантажу. Перехідні процеси швидкості та координати пересування системи електроприводу механізму пересування візка мостового крана у існуючій та вдосконаленій СУЕП (рисунок 3.9) приблизно збігаються, а графіки відхилення вантажу від вертикального положення мають значні відмінності. У проектованій системі демпфування коливань вантажу за період розгону гойдання вантажу практично припиняються, тоді як у стандартній системі електроприводу зі зменшеними темпами розгону і гальмування гойдання вантажу продовжуються і в режимах роботи, що встановилися.

Хоча значення кутів відхилення для останнього випадку не досягають великих значень (максимальне значення кута відхилення вантажу в режимі роботи не перевищує 1,5 градуса), наявність хитань вантажу говорить про неможливість вирішення проблеми без застосування додаткових способів управління швидкістю вантажного візка мостового крана.

Для скорочення часу розгону з активною системою демпфування коливань підвішеного вантажу мостового крана є можливість збільшення темпу завдання швидкості, а вдосконалена СУЕП автоматично змінить цей темп. Таким чином, можна отримати такий перехідний процес, який повторюватиме роботу стандартної системи електроприводу вантажного візка (час розгону, час гальмування, час досягнення кінцевої координати), але без розгойдування вантажу (рисунок 3.10). На графіці представлені перехідні процеси при темпі розгону та гальмування 4 с.

Збільшення темпу розгону при роботі системи демпфування коливань підвішеного вантажу дозволяє скоротити час розгону та гальмування системи електроприводу механізму пересування візка, зменшити амплітуду розгойдувань, а також зробити процес гойдання вантажу загасаючим з великим декрементом згасання, що впливає на точність зупинки вантажу.

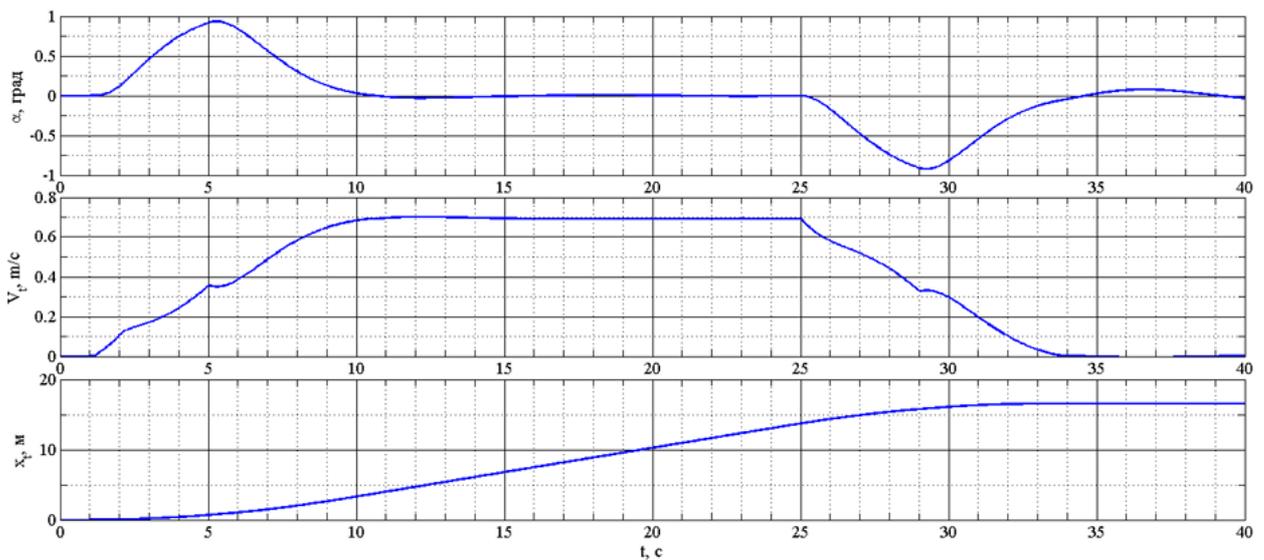


Рисунок 3.10 – Перехідні процеси швидкості, координати візка та відхилення вантажу при збільшенні темпу розгону приводу у вдосконаленій СУЕП

Особливістю роботи проекрованої системи демпфування коливань вантажу є наявність активного каналу на швидкість системи електроприводу. На рисунку 3.11 приведені графіки перехідних процесів швидкості та

координати візка, при нульовому завданні швидкості приводу та ненульовому значенні кута відхилення підвісу.

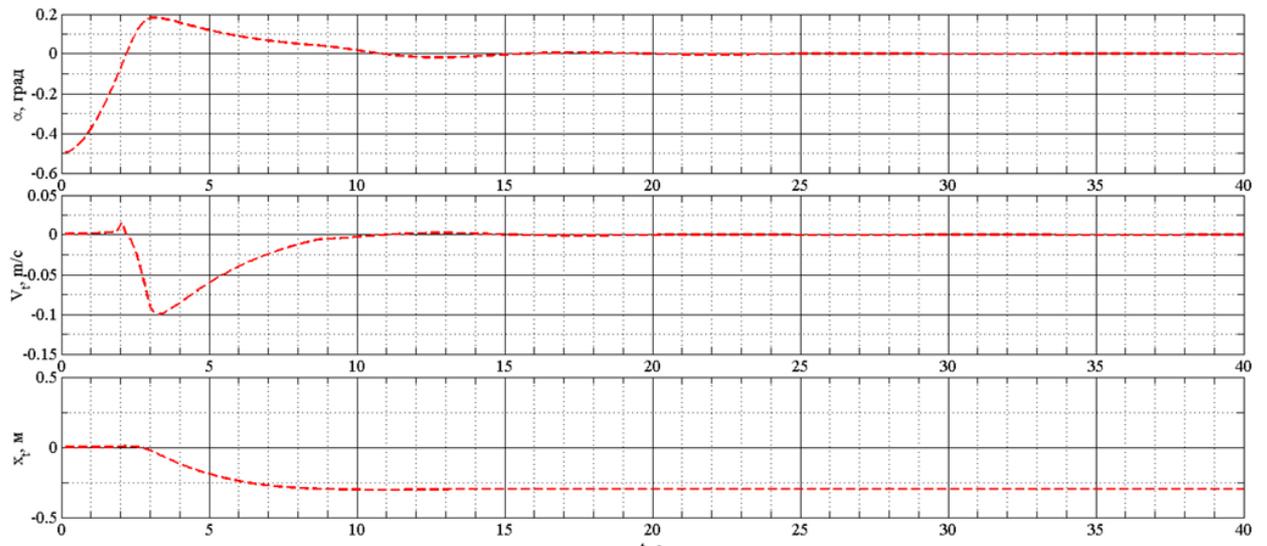


Рисунок 3.11 – Перехідні процеси швидкості та координати візка при примусовому відхиленні вантажу від вертикального положення

На рисунку 3.11 змодельовано режим форсованого виведення системи підвісу з вертикального положення, що характерно, наприклад, при наїзді вантажем на будь-які перешкоди на шляху траєкторії. Система електроприводу реагує на такі умови завданням на швидкість і візок проходить деяку відстань, щоб врівноважити положення вантажу.

Не менш важливим завданням під час роботи з підйомно-транспортними механізмами є завдання позиціонування вантажу. Часто використовується режим роботи двох механізмів пересування одночасно, і візок з підвішеним вантажем рухається у двомірній площині. Удосконалена СУЕП дозволяє підтримувати сталість положення вантажу під рухомим механізмом пересування для цього випадку в статичних режимах роботи, але дає невелику помилку регулювання в динамічних режимах (рис. 3.12)..

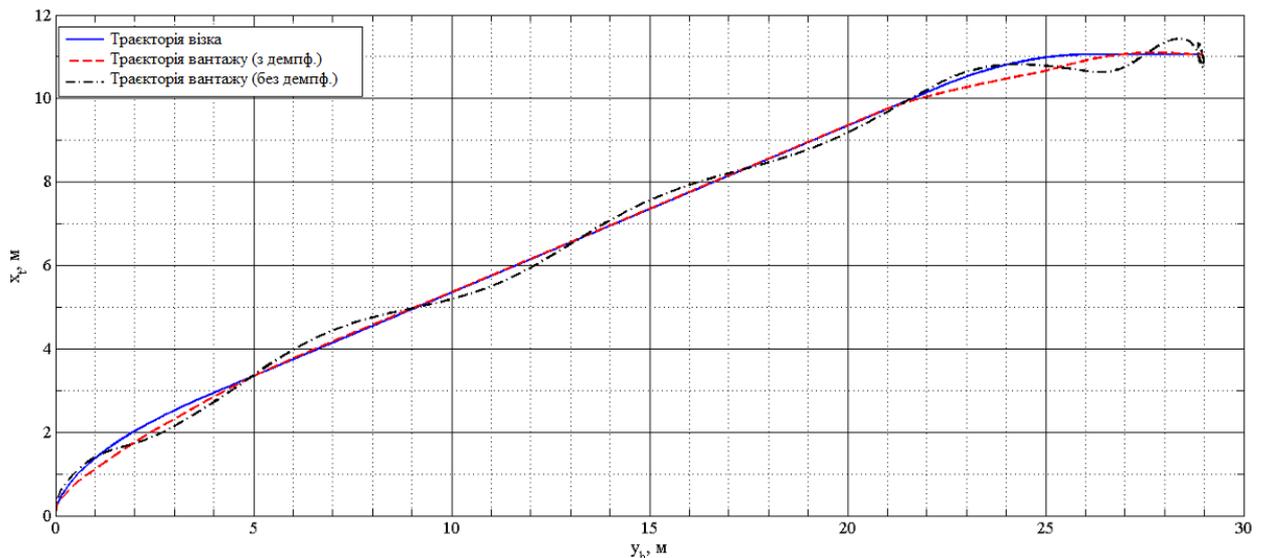


Рисунок 3.12 – Траекторії пересування вантажного візка та вантажу

Застосування вдосконаленої СУЕП мостового крана для демпфування коливань підвішеного вантажу можливе лише в системі частотно-регульованого кранового електроприводу з вбудованими або додатковими інтерфейсами промислових мереж. Також реалізація системи, що проектується, вимагає наявності програмованого контролера (ПЛК), який є складовою систем управління крановими електроприводами.

Для організації вдосконаленої СУЕП застосовується спосіб зміни швидкості приводу пересування функції кута відхилення вантажу шляхом підсумовування або віднімання додаткової величини завдання швидкості (рисунок 3.13).

В удосконаленій СУЕП отримано перехідні процеси частоти обертання двигуна та кута відхилення вантажу (рисунок 3.14). Цей досвід здійснюється при заданій швидкості обертання двигуна 1500 об/хв. На момент закінчення досвіду величина кута відхилення вантажу становить 0,6 градуса.

3.1 Висновки

Виконано аналіз можливих способів реалізації удосконаленої СУЕП для демпфування коливань підвішеного вантажу з прямим виміром кута відхилення вантажу. Вибрано систему з жорстким негативним зворотним зв'язком по куту відхилення вантажу, який охоплює всю систему і діє на величину завдання швидкості системи електроприводу механізму пересування. Даний варіант реалізації системи керування дозволяє збільшити коефіцієнт демпфування механічних коливань вантажу.

Результати комп'ютерного моделювання вказують на необхідність зміни коефіцієнта $ko\alpha$ у каналі зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу.

Час пуску та гальмування в системах механізмів пересування мостового крана менше величин періоду власних коливань вантажу. За реалізації обраної системи управління враховуються лише статичні режими роботи механізмів пересування мостового крана. З цього висновку зроблено висновок, що коефіцієнт каналі зворотний зв'язок з куту відхилення вантажу залежить від довжини підвісу вантажу.

Розроблено алгоритм визначення коефіцієнта $ko\alpha$ у каналі зворотного зв'язку по кутку відхилення вантажу. Алгоритм заснований на вимірі величини відхилення вантажу та на параметрах, отриманих при пуско-налагоджувальних роботах. Алгоритм дозволяє за $1/4$ періоду власних коливань вантажу визначити довжину підвісу, виходячи з якої розраховується коефіцієнт зворотний зв'язок.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Визначення величини витрат запропонованого варіанту

Сучасний автоматизований електропривод мостового крана є складною системою керування, яка не лише забезпечує генерацію механічної енергії для руху крана та візка, але й здійснює збір даних про параметри роботи (швидкість, положення вантажу, струм двигунів), їх обробку та формування керуючих сигналів для електроприводів, що гарантує точне та безпечно переміщення вантажу. Будь-який електропривод крана можна розглядати як систему, що приймає вхідні сигнали та формує вихідні команди для двигунів.

Виділяють три основні типи систем керування електроприводами мостових кранів: розімкнені, замкнені та комбіновані, які поєднують елементи обох попередніх типів. У розімкнених системах відсутнє вимірювання та контроль вихідних параметрів, сигнал керування формується лише вихідною величиною. Такі системи застосовуються для керування пуском, гальмуванням або підтримки швидкості руху вантажу в обмеженому діапазоні, проте мають невисоку точність регулювання.

Системи векторного керування забезпечують високу точність і динамічність електроприводів, але їх використання обмежене. Наприклад, неможливо застосувати векторне керування при паралельному підключенні декількох двигунів до одного частотного перетворювача, а також у приводах із трансформаторним підвищенням напруги. Крім того, векторне управління вимагає складних обчислювальних алгоритмів, точного введення параметрів двигуна та може спричиняти пульсації швидкості при постійному навантаженні.

У сучасних частотних перетворювачах для електроприводів мостових кранів часто застосовується скалярне управління, що базується на регулюванні амплітуди напруги у функції частоти. Це зазвичай розімкнені системи з невеликим діапазоном регулювання швидкості, проте вони відзначаються простотою реалізації та надійністю роботи. Для розширеного

діапазону швидкості застосовують замкнені системи, наприклад, скалярного частотно-струмового управління, які забезпечують більшу точність, але відрізняються складністю технічної реалізації.

У якості базового варіанту електропривода досліджуваного мостового крана приймається частотний перетворювач з асинхронним двигуном (ПЧ-АД), який підлягає модернізації. Одночасно розвиваються альтернативні принципи побудови електроприводів для стабілізації швидкості асинхронного двигуна зі скалярним керуванням, що дозволяє поєднувати простоту конструкції та достатню точність позиціонування вантажу в динамічних режимах роботи крана.

Дослідження в роботі виконувались на основі досліджуваних зразків систем електропривода, побудованих на основі асинхронного двигуна з КЗ ротором. Відповідно економічний розрахунок пропонується виконати на основі цієї ж досліджуваної системи електроприводу в порівнянні із її морально та фізично застарілим аналогом – релейноконтакторної схеми.

В таблиці 4.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на модернізацію електропривода степенів рухомості промислового робота.

Таблиця 4.1 – Капітальні витрати на електроустаткування базового та нового варіантів

Найменування електрообладнання	Кошторисна вартість варіанту	
	Базова (ПЧ-АД з КР)	Нова (ПЧ-АД з ФР)
Вартість двигуна механізму підйому 4MT200LA6 (P=22 кВт)	56 700,0	56 700
Вартість системи керування (Chint NVF2G-22/TS4, 22кВт, 380В 3Ф)	69402,0	69402,0
Кабелі, апарати захисту, сенсори та інше обладнання	14260	16440
Вимірювальні прилади, показчики, реєстратори захищеного виконання	8200	8200
Спеціалізований інструментарій	4370	4370
PLC-модуль	—	14800
Мікроконтролер, WI-FI модуль та сенсор кута відхилення вантажу	—	9250
Разом капіталовкладення:	152 932	179 162
Транспортні витрати 13%	19881,16	23291,06
Всього ціна обладнання	172 813,00	202 453,00
Монтажні роботи 10%	17281,3	20245,3
Капітальні витрати	190 094,00	222 698,00

Отже, $K_6 = 190\,094,00$ грн.; $K_H = 222\,698,00$ грн.

4.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік .

Експлуатаційні витрати включають такі складові:

1. Амортизаційні відрахування E_a .
2. Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату).
3. Витрати на силову електроенергію E_e .
4. Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$.
5. Інші витрати $E_{ін}$.

Вираз, який включає в себе усі вище перераховані складові експлуатаційних витрат, має вигляд:

$$З = E_a + E_{зп} + E_e + E_{пр} + E_{ін}. \quad (4.1)$$

4.2.1 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування для базового та нового варіантів становлять (норма амортизації становить 10 % в рік):

$$E_{аб} = 190\,094,00 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 19\,009,4 \text{ грн.};$$

$$E_{ан} = 222\,698,00 \text{ грн.} \cdot 0,10 = 22\,269,8 \text{ грн.}$$

4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Таблиця 4.1 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_z = E_{z0} + E_{zd}, \quad (4.2)$$

де E_{z0} – основна заробітна плата по тарифу;

E_{zd} – додаткова заробітна плата;

$$E_{z0} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эф}} \cdot K_c \cdot \beta, \quad (4.3)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують систему частотного керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором ($N = 1$ чол.);

T_1 – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду. Залежить від мінімальної заробітної платні, яка станом на 2025 рік складає 8000 грн. Тому розмір ставки робітника 1-го розряду приймаємо рівним 45 грн./год;

K – тарифний коефіцієнт ($K_6 = 1,8$, $K_H = 2,03$);

$\Phi_{\text{эф}}$ – ефективний фонд робочого часу за рік (приймаємо рівним 280 год.);

K_c – коефіцієнт співвідношень, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$ для базового варіанту, $\beta = 0,74$ для нового варіанту).

Розрахуємо E_{z0} для базового та нового варіантів.

$$E_{z0\text{б}} = 1 \cdot 45 \cdot 1,8 \cdot 280 \cdot 1 \cdot 1 = 22680,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{z0\text{н}} = 1 \cdot 45 \cdot 2,03 \cdot 280 \cdot 1 \cdot 0,74 = 18927,7 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата E_{zd} (за професійну та майстерну діяльність) становить 10 % основної заробітної плати. E_{zd} для базового та нового варіантів відповідно становить:

$$E_{zd\text{б}} = 22680,0 \cdot 0,10 = 2268,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{zd\text{н}} = 18927,7 \cdot 0,10 = 1892,8 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату для базового та нового варіантів зведемо в таблицю 4.2.

Таким чином в результаті виконання підстановки у вираз (4.2) маємо:

$$E_{зб} = 22680,0 + 2268,0 = 24948,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{зн} = 18927,7 + 1892,8 = 20820,5 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Базовий варіант	Новий варіант
Основна заробітна плата, $E_{зо}$, грн.	22680,0	18927,7
Додаткова заробітна плата, $E_{зд}$, грн.	2268,0	1892,8
ВСЬОГО з нарахуванням, грн.	24948,0	20820,5

4.2.3 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} \cdot V \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_{\text{вм}} \cdot K_z, \quad (4.4)$$

де V – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для малих побутових споживачів, електроустановки яких приєднані до електричних мереж згідно з класом напруги та групою електроспоживання (група А чи В), яка включає в себе вартість кВт год електричної енергії та вартості розподілу, з ПДВ складає приблизно 9,5 грн/кВт год. (5,9 грн/кВт – вартість кВт/год без ПДВ, 2,02 грн./кВт – вартість розподілу кВт/год без ПДВ).

P – встановлена потужність приводного двигуна (22 кВт);

η – ККД установки;

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу роботи в рік;

$K_{\text{вм}}$ – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом);

K_z – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Коефіцієнт корисної дії обчислено як добуток ККД двигуна і силового перетворювача. Для базового варіанту ККД складає 0,86, для нового варіанту ККД приймаємо рівним 0,92. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,82 в обох варіантах, а коефіцієнт завантаження для базового варіанту рівний 0,78, а для нового – 0,8.

Ефективний фонд робочого часу для двох варіантів при режимі роботи в 1 зміну протягом 95 % часу за рік становить:

$$\Phi_{\text{еф}} = 250 \text{ днів} \cdot 8 \text{ год.} \cdot 0,95 = 1900 \text{ (год.)}$$

Отже, з виразу (4.4) для базового та нового варіантів маємо:

$$E_{\text{ЕБ}} = \frac{22}{0,86} \cdot 9,5 \cdot 1900 \cdot 0,82 \cdot 0,78 = 295431,9 \text{ (грн./рік)}.$$

$$E_{\text{ЕН}} = \frac{22}{0,92} \cdot 9,5 \cdot 1900 \cdot 0,82 \cdot 0,8 = 283231,9 \text{ (грн./рік)}.$$

4.2.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів, у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Графік планово-попереджувальних ремонтів для базового та нового варіантів наведено в таблицях 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3 – Графік ремонтів для базового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	7			6			7			7		8	35
АД з КЗ		6			6			6			5		23
Кабельна мережа	5					5					6		16
Апарати ком-ії та захисту		10				11				11			32
Сенсори		4				4				4			12
Загальна трудомісткість												118	

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електрик п'ятого розряду для базового варіанту та шостого – для нового (система на базі новітнього обладнання потребує вищої кваліфікації працівника). Із врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт, (4.3) прийме вигляд:

$$E_{30} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{эф}}, \quad (4.5)$$

Таблиця 4.4 – Графік для нового варіанту

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудо- місткість, люд-год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Система керування ПЧ	6			5			5			6		5	27
АД з КЗ		5			5			5			5		20
Кабельна мережа	4					4				4			12
PLC-модуль		4			5			4			5		18
Мікроконтролер, WI-FI модуль та сенсор кута відхилення вантажу	4			4				4				3	15
Апарати ком-ії та захисту		6				6				6			18
Загальна трудомісткість												110	

З попередніх розрахунків відомо, що $T_1 = 40$ грн./год, отже, маємо:

$$E_{\text{зо б}} = 45 \cdot 2,7 \cdot 118 = 14337,0 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зо н}} = 45 \cdot 2,33 \cdot 110 = 11533,5 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату (38 %):

$$E_{\text{зн б}} = 14337,0 \cdot 0,38 = 5448,1 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{зн н}} = 11533,5 \cdot 0,38 = 4382,7 \text{ (грн.)}.$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

- для базового варіанту: $14337,0 + 5448,1 = 19785,1$ (грн.),
- для нового варіанту: $11533,5 + 4382,7 = 15916,2$ (грн.).

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймаємо рівними 15 % витрат на основну заробітну плату. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становлять:

- для базового варіанту: $19785,1 \cdot 0,15 = 2967,8$ (грн.);
- для нового варіанту: $15916,2 \cdot 0,15 = 2387,4$ (грн.).

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{\text{пр б}} = 19785,1 + 2967,8 = 22752,9 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{пр н}} = 15916,2 + 2387,4 = 18303,6 \text{ (грн.)}.$$

4.2.5 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{\text{ін б}} = (19\,009,40 + 24948,0 + 295431,9 + 22752,9) \cdot 0,05 = 18107,11 \text{ (грн.)},$$

$$E_{\text{ін н}} = (22\,269,80 + 20820,5 + 283231,9 + 18303,6) \cdot 0,05 = 17231,29 \text{ (грн.)}.$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат за (6.1) наведемо у вигляді таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Базовий варіант	Новий варіант
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	19 009,40	22 269,80
Заробітна плата $E_{зп}$ обслуговуючого персоналу, грн.	24948,0	20820,5
Витрати на електроенергію E_e , грн.	295431,9	283231,9
Витрати на поточний ремонт $E_{пр}$, грн.	22752,9	18303,6
Інші витрати $E_{ін}$, грн.	18107,11	17231,29
Всього експлуатаційні витрати Z, грн.	380 249,31	361 857,09

Оскільки ми розраховуємо ефективність нової системи після модернізації, то необхідно порівняти експлуатаційні витрати, використовуючи відносні показники.

Для порівняння експлуатаційних витрат розрахуємо показник відносної економії (зменшення) витрат:

$$\lambda_B = \frac{Z_B - Z_H}{Z_B} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

$$\lambda_B = \frac{380249,31 - 361857,09}{380249,31} \cdot 100\% = 4,84\%$$

З результатів наведених розрахунків робимо висновок, що модернізація системи стрічкового конвеєра є економічно доцільною. При цьому досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 4,84 %.

4.3 Визначення терміну окупності нового рішення

При оцінці ефективності використання нового варіанта визначаються і порівнюються також термін окупності додаткових капітальних затрат, рік:

$$T_{ок} = (K_H - K_Б) / (Z_{еб} - Z_{ен}), \quad (4.7)$$

$$T_{ок} = (222\,698,00 - 190\,094,00) / (380249,31 - 361857,09) = 1,77 \text{ (роки)}.$$

Отже, розраховані економічні показники свідчать про цілком виправдану економічну доцільність модернізації системи частотного керування асинхронним двигуном з КЗ ротором в функції праметру розхитування вантажу та дуже високу експлуатаційну надійність та ефективність, підвищенню якої присвячені дослідження в даній роботі.

Висновки: Вдосконалення системи частотного керування асинхронним двигуном з КЗ ротором в функції праметру розхитування вантажу за рахунок дообладнання системи електропривода є економічно доцільним та виправданим. За рахунок модернізації системи електропривода досягається економія річних експлуатаційних витрат у розмірі 4,84 %, що підтверджує правильність виконаних досліджень та економічну доцільність впровадження даного технічного рішення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуті питання з охорони праці, що були враховані під час розробки заходів з підвищення ефективності частотного асинхронного електропривода мостового крану. На електротехнічний персонал, що буде здійснювати оперативне обслуговування системи управління електроприводом, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [29-31].

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря. Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил). Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць під час оперативного обслуговування електроустановок

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як місцевими оперативними чи оперативно-ремонтними працівниками, за якими закріплена ця електроустановка, так і виїзними, за якими закріплена група електроустановок. Вид оперативного обслуговування, кількість оперативних працівників в зміну чи на електроустановці визначаються особою,

відповідальною за електрогосподарство, за узгодженням з керівництвом підприємства (організації) і зазначається в місцевих інструкціях. До оперативного обслуговування електроустановок допускаються працівники, які знають оперативні схеми, посадові і експлуатаційні інструкції, інструкції з охорони праці, особливості обладнання і пройшли навчання, дублювання та перевірку знань ПБЕ ЕЕС та ПТЕ ЕЕС.

Оперативні працівники, які обслуговують електроустановки одноосібно, та ті старші в зміні чи бригаді оперативні працівники, за якими закріплені електроустановки, повинні мати групу з електробезпеки IV в електроустановках напругою понад 1000 В і III – в електроустановках напругою до 1000 В. Оперативні працівники повинні працювати за графіком, затвердженим особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства чи структурного підрозділу.

Оперативні працівники, які заступають на чергування, мають прийняти зміну від попереднього чергового, здати зміну наступному черговому у відповідності з графіком. Припинення чергування без здачі зміни забороняється. У виняткових випадках залишення робочого місця є припустимим з дозволу оперативного працівника вищої посади. Під час приймання зміни оперативний працівник зобов'язаний:

- ознайомитися зі схемою і станом та режимом роботи устаткування на своїй ділянці особистим оглядом в обсязі, встановленому інструкцією;
- одержати від чергового, який здає зміну, інформацію про стан устаткування, за яким необхідно вести ретельний нагляд для запобігання аваріям та неполадкам, а також про стан устаткування, що перебуває в ремонті або резерві;
- перевірити і прийняти інструмент, матеріали, ключі від приміщень, засоби захисту, оперативну документацію та інструкції;
- ознайомитися з усіма записами та розпорядженнями за час, що минув з його останнього чергування;
- оформити приймання зміни записом у журналі, відомості, а також в

оперативній схемі власним підписом та підписом працівника, який її здає;

- доповісти старшому зміни про початок чергування та про неполадки, виявлені під час прийняття зміни.

Забороняється прийняття та здача зміни у випадках, коли на дільниці, яка обслуговується, робочі місця не прибрані, устаткування забруднене. Прийняття зміни, коли устаткування несправне чи є відхилення від нормального режиму його роботи, допускається тільки з дозволу особи, відповідальної за електрогосподарство підприємства, або оперативного працівника вищого рівня, про що робиться запис в оперативному журналі. Оперативні працівники під час свого чергування є відповідальними за правильне обслуговування та безаварійну роботу всього устаткування на закріпленій за ними дільниці.

В разі порушення режиму роботи, пошкодженні чи аварії електроустаткування оперативний працівник зобов'язаний негайно вжити заходів з відновлення схеми нормального режиму роботи і повідомити про те, що сталося, безпосередньо старшому у зміни працівнику або особі, відповідальній за електрогосподарство. У випадку неправильних дій оперативних працівників під час ліквідації аварії старший в зміні оперативний працівник зобов'язаний прийняти на себе керівництво і відповідальність за подальший перебіг ліквідації аварії.

Оперативні працівники повинні проводити обходи та огляди устаткування і виробничих приміщень на закріпленій за ним дільниці. Огляд електроустановок може виконуватись одноосібно: адміністративно-технічним працівником з групою V в електроустановках понад 1000 В і з групою IV – в електроустановках до 1000 В; оперативним працівником, який обслуговує цю електроустановку.

Список адміністративно-технічних працівників, яким дозволяється одноосібний огляд, встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство і затверджується керівником підприємства.

Забороняється під час огляду електроустановок виконувати будь-яку

роботу. Огляди, виявлення та ліквідація несправностей в електроустановках без місцевих чергових працівників виконуються централізовано виїзними працівниками, що здійснюють нагляд і роботи на об'єкті (чи групі об'єктів). Періодичність цих робіт встановлюється особою, відповідальною за електрогосподарство, залежно від місцевих умов. Результати оглядів фіксуються в оперативному журналі.

Двері приміщень електроустановок (щитів, збірок тощо) мають бути постійно замкнені. Для кожного приміщення має бути не менше двох комплектів ключів, один з яких є запасним. Ключі від приміщень РУ не повинні пасувати до дверей комірок і камер. Ключі підлягають поверненню щоденно після закінчення роботи.

5.1.2 Електробезпека

Проектування та експлуатація електричних мереж і установок повинна здійснюватися за умови дотримання вимог з їхньої електробезпеки [30]. Живлення силового обладнання заводу та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – особливо небезпечні, так як роботи виконуються назовні приміщень. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [29-30]: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги; електрозахисні засоби захисту (до 1000В) поділяються на основні (ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками) та допоміжні (діелектричні калоші; діелектричні

килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки).

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Категорія робіт, що виконується оперативним персоналом – Па – пов'язано з постійною ходою і перенесенням невеликих вантажів масою до 1 кг [29]. За ступенем впливу на тепловий стан людини мікрокліматичні умови визначаємо як допустимі (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Допустимі параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	Середньої важкості: Па	17-23	75	не > 0,3
Теплий	Середньої важкості: Па	18-27	65 при 26 °С	0,2-0,4

Необхідно, щоб в приміщеннях, що будуються, була постійна циркуляція повітря або встановлений кондиціонер [29]. Влітку при значних вологовтратах і значному часі опромінення інфрачервоною радіацією споживають охолоджену до 15-20°C підсолену (0,5 % HCl) газовану воду. Вживання підсоленої води запобігає згущенню крові, сприяє утриманню її в організмі, покращує самопочуття й підвищує працездатність. Із заходів особистої профілактики після теплових навантажень рекомендуються гідропроцедури.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [29].

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу на будь-якій ділянці вказує на необхідність у вживанні заходів з її очищення. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Вуглецю оксид (СО)	3	1	4

Тому необхідно здійснювати наступні заходи:очищувати пил якнайчастіше, щодня протирати запилені поверхні обладнання з використанням продувки або пилососа. Потрібно планувати прибирання так, щоб воно приходилось на час коли устаткування вимкнене, зокрема в другу половину дня п'ятниці або на вихідні.

5.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [29], роботи з обслуговування електроустановок, потребують освітлення, яке характеризується розрядом зорової роботи III, підрозряд «в». Нормовані значення штучного, природного та суміщеного освітлення наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Високої точності	Від 0,3 до 0,5 включно	III	в	малий середній великий	світлий середній темний	600	200	-	3,0

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

5.2.4 Виробничий шум

Шум вище гранично допустимих рівнів несприятливо діє на людину. Шум у приміщенні широкопasmовий. Нормуємо шум на робочому місці. Рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях мають відповідати вимогам СН 3223-85, ГОСТ 12.1.003-85, ГР 2411-81 [31] і наведені в табл. 6.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні звуку, еквівалентні рівні звуку і рівні звукового тиску в октавних смугах частот

Вид трудової діяльності, робочі місця	Рівні звукового тиску в дБ в октавних смугах із середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Виконання усіх видів робіт на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Устаткування, що є джерелом шуму (вентилятори, електроінструмент, технологічне обладнання), слід використовувати поза межами приміщень.

Для забезпечення допустимих рівнів шуму на робочих місцях слід застосовувати засоби звукопоглинання, вибір яких має обґрунтовуватись спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Акустична обробка приміщень – це облицювання частини внутрішніх поверхонь огорожень звукопоглинаючими матеріалами, а також розміщення в приміщенні штучних звукопоглиначів, які представляють собою вільно підвішені об'ємні поглинаючі тіла довільної форми. Найбільший ефект при акустичній обробці можливо отримати в точках, які розташовані в зоні відбитого звуку; в зоні прямого звуку акустичний ефект від застосування облицювання набагато менший. Звукопоглинаючі облицювання розміщують на стелі і в верхніх частинах стін при висоті приміщення не більше 6-8 м таким чином, щоб акустично оброблена поверхня складала не менше 60 % від загальної площі обмежуючих приміщення поверхонь. У вузьких і дуже високих приміщеннях доцільно облицювання розміщувати на стінах, залишаючи нижні частини стін (до 2 м висотою) не облицьованими, або проектувати конструкцію звукопоглинаючої підвісної стелі.

5.2.5 Виробнича вібрація

Джерелами вібрацій є технологічне устаткування, електроінструмент і вентилятори. Норми виробничої вібрації на постійних робочих місцях в приміщеннях об'єктів будівництва, визначені за [29-31], наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5– Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні полоси з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	32	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	1,3* 108	0,45 99	0,22 93	0,2 92	0,2 92	0,2 92	-	-	-	-

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с}^* 10''$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: створення амортизаторів в яких використовують пружини, гуму та інші пружні матеріали; розміщення будівельних конструкцій на масивних фундаментах; встановлення додаткових реактивних опорів. Також серед технічних заходів уникнення шкідливого впливу вібрації – створення нових конструкцій інструментів і машин, вібрація яких не може виходити за безпечні для людини межі, а зусилля не повинні перевищувати 15- 20 кг. Усі деталі машин та агрегатів, що рухаються, повинні ретельно врівноважуватися, а для зменшення динамічних сил, які спричинюють вібрації, слід застосовувати змащування та ін.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

а) Класи умов праці за показниками важкості праці:

Загальні енергозатрати організму (кг/м): Зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, $\text{кг}/(\text{Вт})$; При регіональному навантаженні (для чоловіків) – 12000(40); При загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – 40000(80); Маса вантажу, що постійно підіймається – до 25.

Стереотипні робочі рухи: При локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук)- до 60 000; При регіональному навантаженні(участь

рук та плечового суглоба) – до 30 000; Статичне навантаження (кг/с): Двома руками (чоловіки) – до 70 000; За участю м'язів тулуба та ніг – до 200 000.

Робоча поза: Періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба: Вимушені нахили протягом зміни – 150 разів; Переміщення у просторі(переходи задля технологічного процесу) – більше 12

б) Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження: Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом; Сприймання інформації та їх оцінка - сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій; Розподіл функцій за ступенем складності завдання - обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження: Зосередження (%за зміну) – до 50; Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150; Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80; Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний; Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці: Тривалість робочого дня – більше 8 год; Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

5.3 Види захисту електродвигунів та систем електропривода

Поломка електродвигуна може призвести до виникнення аварійних ситуацій та виходу з ладу багатьох інших пристроїв, пов'язаних у єдину енергетичну мережу з джерелом живлення. Своєчасний та якісний захист електродвигунів суттєво збільшує робочий ресурс агрегату та забезпечує безпеку обладнання й операторів, що обслуговують його. Установка додаткових пристроїв дозволяє запобігти частим ремонтам електродвигуна та підвищити його ККД.

Оскільки захист електродвигуна робить його суттєво дорожчим, необхідність і доцільність встановлення слід ретельно прорахувати. Велика кількість елементів захисту робить використання електродвигуна економічно не вигідним, а їхня відсутність або неправильно підібрані заходи запобігання перепадам напруги та температур можуть призвести до поломок і передчасного аварійного виходу електромотора з ладу.

Серед видів захисту електродвигунів найважливішим є запобігання: зниженню напруги, зникненню однієї із фаз (фазочутливий захист);

- теплового перегріву;
- короткому замиканню;
- перевантаженню струмом.

Підбирається захист для електродвигуна таким чином, щоб урахувати умови функціонування агрегату, його потужність, передбачуване навантаження, режими роботи, можливість присутності підготовленого персоналу. Однією з найчастіших причин несправності електричного двигуна є перегрів через:

1. перевищення допустимої тривалості безперервної експлуатації; надлишкове навантаження;
2. заклинювання обертового валу внаслідок порушення техніки експлуатації агрегату
3. потрапляння сторонніх предметів; коротке замикання на обмотках;
4. знос частин двигуна; невідповідні умови експлуатації.

Для механічного захисту асинхронних електродвигунів від перевантажень застосовується біметалеве реле, чутливий до нагрівання елемент якого вигинається зі збільшенням температури. Цей елемент замикає/розмикає контакт реле, після чого сигнал про відключення надходить на силовий агрегат.

У роботі з асинхронними електродвигунами слід враховувати можливе зниження напруги в мережі або пропадання однієї фази. У такому разі напруга на обмотках зменшується, а струм збільшується. Щоб захистити

електродвигуни від негативних наслідків такої зміни вольтажу та амперажу, застосовуються реле та теплові сенсори, що встановлюються в обмотки.

Для моментального захисту від короткого замикання використовуються:

1. автомати-вимикачі з електромагнітним роз'єднанням;
2. реле (електронні чи електромеханічні);
3. запобіжники з плавкими одноразовими вставками.

Якщо потужність електродвигуна за нормальних умов роботи не перевищує номінальну, зазначену в технічній документації до агрегату, частина реле може не застосовуватися. Тоді захисні елементи можна налаштувати на нижчий робочий струм.

Перегрів трифазних асинхронних електродвигунів може бути спровокований збільшенням температури:

1. на обмотці статора;
2. на підшипниках;
3. у роторі;
4. у точці електричного підключення.

Зазвичай теплові датчики встановлюються на обмотці – найчастішому джерелі перегріву електродвигуна, розташованому в меншій частині мотора, що обдувається вентилятором. Датчиками перегріву виступають напівпровідникові терморезистори РТС – термістори чи позистори.

Висока ефективність термісторного захисту обумовлена тим, що вона має високу швидкість відповіді на будь-яку з причин перегріву електродвигуна:

1. заклинювання підшипників;
2. навантаження;
3. обрив фази;
4. низька якість вентиляції й охолодження.

Автомати та температурні реле застосовуються для захисту від перевантаження струмом. У цьому випадку захист електродвигунів

налаштовується так, щоб відсікати тривале протікання великого струму, що призводить до перегріву та швидкого зношування ізоляції.

Перетворювачі частоти дозволяють змінювати швидкість обертання валу, регулюючи таким чином частоту напруги та вольтаж. Робочі точки, коректно встановлені на вольтчастотній характеристиці мотора, забезпечують захист силового агрегату від навантаження.

Частотні перетворювачі реалізують захист електричного двигуна програмно й апаратно за допомогою датчиків, виключаючи необхідність у механічному захисті за допомогою редукторів або муфт.

Завдяки частотним перетворювачам контроль роботи електродвигуна відбувається постійно незалежно від присутності технічного персоналу. При зміні навантаження та надходженні відповідних сигналів з датчиків електроживлення двигуна переводиться у відповідний режим, перешкоджаючи перегріву та гарантуючи захист від короткого замикання або заклинювання електродвигуна [29-31].

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу» були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування частотного електропривода мостового крану та отримано такі результати досліджень:

1. Електромеханічні системи механізмів пересування з підвішеним вантажем доцільно розглядати як двомасові системи, що включають жорсткий механізм і гнучкий підвіс. Власні частоти коливань цих підсистем відрізняються більш ніж у 10 разів, що повністю усуває взаємний вплив їх коливальних процесів.

2. Розроблено математичну модель мостового крана з підвішеним вантажем, яка враховує зміну довжини підвіса в діапазоні від 1 до 12 м та формування додаткових навантажень на механізми пересування візка і крана під дією вантажу.

3. Створено комп'ютерну модель мостового крана, що містить перехресні зв'язки між механізмами підйому, пересування візка, пересування крана та системами електроприводів. Модель дає змогу аналізувати перехідні процеси та формування додаткової статичної складової навантаження зі зміною довжини підвіса у статичних і динамічних режимах при швидкостях переміщення до 60 м/хв.

4. Удосконалена система керування для демпфування коливань вантажу побудована на основі коригувального зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу в межах $\pm 15^\circ$. Пропорційна ланка має змінний коефіцієнт підсилення, який автоматично коригується залежно від довжини підвіса, визначеної за показами датчика кута.

5. Ключовим елементом апаратно-програмного комплексу є 3-осьовий MEMS-гіроскоп, який працює автономно. Дані з частотою 136 вимірювань за секунду обробляються мікроконтролером і передаються через Wi-Fi до

системи керування електроприводом для корекції швидкості відповідно до кутових відхилень вантажу.

6. Проведено техніко-економічний розрахунок впровадження системи електропривода, який показав зменшення річних експлуатаційних витрат у середньому на 10–15 %, що підтверджує економічну доцільність застосування запропонованих рішень.

7. Визначено основні вимоги щодо безпечної експлуатації електротехнічного комплексу в умовах впливу шкідливих факторів навколишнього середовища, включно з вібраціями, температурним діапазоном роботи $-20\dots+45$ °С та підвищеною запиленістю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Воскобойник, В. Е., Бородай, В. А., Боровик, Р. О., Нестерова, О. Ю. Основи електропривода виробничих машин та комплексів : навч. посіб. — Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2021. — 254 с.
2. Лавріненко, Ю. М., Марченко, О. С., Савченко, П. І., Синявський, О. Ю., Войтюк, Д. Г. та ін. Основи електропривода : підручник. — Київ : ЛІРА-К, 2020. — 532 с
3. Синявський, О. Ю., Савченко, В. В., Лавріненко, Ю. М. та ін. Електропривод виробничих машин і механізмів : навч. посіб. — Київ : ФОП Ямчинський О. В., 2020. — 444 с.
4. Горбатенко, Ю. П., Семенчук, Р. В. Приводи механізмів вантажопідіймальних машин : навч. посіб. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського (Політехніка), 2023. — 38 с. (електрон. вид.)
5. Мугенов, Д. Д. Частотно-регульований електропривод мостового крану сховища радіоактивних відходів : монографія. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського (Політехніка), 2024. — 154 с.
6. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.
7. Видмиш, А. А., Ярошенко, Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посіб. — Вінниця : Вінницький національний аграрний університет (ВНАУ), 2020. — 387 с.
8. Василега, П. О. Електропривод робочих машин : підручник. — Суми : Сумський державний університет, 2022. — 290 с.
9. Постнікова, М. В., Квітка, С. О. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічних робіт з електропривода : метод. матеріали. — (електронний ресурс) — [рік публікації змінний; див. репозиторій]. — (кількість сторінок у файлі вказана в описі).

10. Kundyukov O.A., Belov M.P., Korolev V.I., Blagodarnyi N.S., Ershov K.K. Analysis and Prospects of De-velopment of Electric Drives of Metalworking Machines. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). 2022. p. 726-730. doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755587.

11. Белов М. П. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів: підручник для студ. вищ. навч. закладів / М.П. Белов, В.А. Новіков, Л. Н. Розсудів. - 3-є изд., вип. - М.: Видавничий центр Академіям, 2007. - 576 с. ISBN 978-5-7695-4497-2

12. Розподілені мікропроцесорні системи: конспект лекцій [Електронний ресурс]: для підготовки докторів філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікація за спеціальністю 171 Електроніка за спеціалізацією «Електронні системи» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. О. Терещенко – Електронні текстові дані (1 файл:5544 кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 192 с.

13. Воронов Р.В – Дисертація: «Тягові електромеханічні системи з живленням двох двигунів від одного інвертора», Харків 2020 1-97с.

14. Бабій, С. М., Мошноріз, М. М., Проценко, Д. П., Паянок, О. А., Жуков, О. А. Моделювання режимів роботи електропривода підйомної лебідки крана в середовищі Matlab. Вінницький нац. техн. ун-т, 2022. — с. 99-107.

15. Толочко О. І. Моделювання та аналіз електромеханічних систем в matlab : метод. вказівки до лабораторних робіт. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — 235 с.

16. Кожухівський А. Д., Кожухівська О. А. Імітаційне моделювання систем та процесів в середовищі MATLAB : практикум. — Черкаси : ЧДТУ, 2009. — 76 с.

17. Човнюк Ю. В., Діктерук М. Г., Почка К. І. «Вплив вертикальних (параметричних) коливань вантажного візка мостового крана на його

динаміку при розгойдуваннях вантажу у процесах пуску/гальмування» // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні, вип. 47, Львів: Львівська політехніка, 2013, с. 103–119.

18. Зубач В. В. «Автоматизована система керування електроприводом мостового крана» — дипломна робота / Національний університет “Львівська політехніка”, 2024.

19. Стрельбицький В., Яременко В. «Експериментальні дослідження динамічних навантажень у приводі підйому мостового крана» // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 2023, № 5(2), с. 118-120.

20. Smoczek J., Szpytko J., Hyla P. «The Anti-Sway Crane Control System Using Dynamic Vision System» // Solid State Phenomena, vol.198, 2013, p. 589-593.

21. Wang X., He Z., Liu C., Du W. «Adaptive Fast Terminal Sliding Mode Control for Overhead Crane Anti-Swing Control under Disturbances and Parameter Uncertainty» // Electronics, 2024, 13(23), 4709.

22. Підйомно-транспортні машини / В. С. Бондарєв, О. І. Дубинець, М. П. Колісник та ін. — Київ : «Вища школа», 2009. — 734 с.

23. Вантажопідйомні машини : навчальний посібник / Н. М. Слободян, І. А. Пономарчук — Вінниця : ВНТУ, 2020. — 87 с.

24. Nyezhtsev O., Kravchenko O., Boiko H., et al. The method of calculation and research of dynamic loads and energy losses during the operation of the lifting mechanism of the overhead crane. Kyiv, 2024. Journal of Mechanical Engineering Research, 12(3), pp. 34–42.

25. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(4), pp. 3031–3043.

26. Anuar K. A. M., et al. Dynamic modelling and analysis of 3D overhead gantry crane system. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2018, 7(2), pp. 56–64.

27. Rudniev Y., Romanchenko J., Linevich A. Study of the Dynamics of the Movement Mechanism of an Overhead Crane as a Complex Electromechanical System. *Electromechanical Systems Journal*, 2022, 15(1), pp. 12–21.

28. Вдосконалення системи керування електроприводом мостового крану із врахуванням коливань вантажу / С.Д. Сівохін, О.М. Нанака, О.А. Паянок – Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)» (22-23 жовтня 2025 року), Електронне наукове видання, Режим доступу URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey2025>, – Вінниця : ВНТУ, 2025. – 2 с.

29. НПАОП 40.1-1.32-01.(ДНАОП 0.00-1.32-01).Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.[Чинний від 2002-01-01].URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01>.

30. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [Чинний від 2017-04-01].Вид. офіц. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

31. КНУБА. Техніка безпеки та охорона праці під час експлуатації машин і механізмів / під ред. В. І. (збірник). — Київ: Міністерство освіти і науки України, 2015. — 300 с. Режим доступу: URL: https://library.knuba.edu.ua/books/1_1_16.pdf?utm.

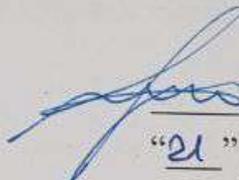
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

«21» 10 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

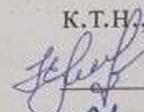
на магістерську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ
КОЛИВАНЬ ПІДВІШЕНОГО ВАНТАЖУ**

08-24.МКР.011.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц.

 Олена НАНАКА

«21» 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-25м

 Сергій СІВОХІН

«21» 10 2025 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки «Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу».

Скорочене найменування розробки – «Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу».

Замовник – Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Розробка призначена для створення високоефективної та безпечної системи керування електромеханічними приводами мостових кранів із підвішеним вантажем. Її мета — забезпечити:

- зменшення коливань вантажу під час руху;
- підвищення точності та стабільності роботи механізмів пересування;
- зниження динамічних навантажень на вузли крана;
- оптимізацію енергоспоживання та експлуатаційних витрат;
- підвищення рівня безпеки роботи електротехнічного комплексу.

Система ґрунтується на математичному та комп'ютерному моделюванні двомасової структури «кран — вантаж», адаптивному керуванні з використанням MEMS-датчиків і Wi-Fi передавання даних, що дозволяє оперативно компенсувати коливання вантажу та коригувати швидкість руху крана.

4 Вимоги до розробки

Функціональні вимоги:

- Система повинна забезпечувати демпфування коливань підвішеного вантажу в діапазоні кутів відхилення до $\pm 15^\circ$.
- Керування електроприводами механізмів пересування крана та візка має здійснюватися з урахуванням змінної довжини підвіса від 1 до 12 м.
- Алгоритм керування повинен адаптивно змінювати коефіцієнт підсилення пропорційної ланки залежно від режиму роботи та параметрів підвіса.
- Система має забезпечувати стабільне формування команд для приводу при швидкості переміщення крана до 60 м/хв.
- Передавання даних від датчиків має працювати з частотою не менше 100–150 вимірювань/с.

5 Комплектація розробки

Апаратне забезпечення

- 3-осьовий MEMS-гіроскоп із автономним живленням для вимірювання кутових відхилень вантажу.
- Мікроконтролер реального часу з підтримкою Wi-Fi для передавання сигналів.
- Комунікаційний модуль бездротового зв'язку (Wi-Fi 2.4 GHz).
- Елементи інтеграції з електроприводом крана (модуль керування, інтерфейсні блоки).
- Сенсори та допоміжні елементи для контролю параметрів підвіса та режимів роботи.
- Програмне забезпечення мікроконтролера для збору, обробки та передавання даних з частотою 136 Гц.
- Програмний модуль системи електропривода для корекції швидкості залежно від кута відхилення вантажу.

6 Джерела розробки

1. Горбатенко, Ю. П., Семенчук, Р. В. Приводи механізмів вантажопідіймальних машин : навч. посіб. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського (Політехніка), 2023. — 38 с. (електрон. вид.)

2. Мугенов, Д. Д. Частотно-регульований електропривод мостового крану сховища радіоактивних відходів : монографія. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського (Політехніка), 2024. — 154 с.

3. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.

4. Математичне моделювання системи електроприводу: метод. вказівки / Харків. політех. ін-т (публ.). — Харків: 2014. — 72 с. — Електронний ресурс. Режим доступу (URL): <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf?utm>

7 Технічні характеристики

Тип електроприводу: асинхронний/синхронний привод змінного струму з векторним або комбінованим керуванням.

Діапазон регулювання швидкості: розширений, забезпечує стабільну роботу в низькошвидкісній та високошвидкісній зонах.

Точність підтримання швидкості: підвищена за рахунок адаптивних алгоритмів та зворотного зв'язку за струмом і швидкістю.

Динамічні показники: знижений час перехідних процесів; покращена реакція на зміну навантаження.

Енергоефективність системи: зменшене енергоспоживання завдяки оптимізованим законам керування та мінімізації втрат у двигуні.

Стійкість до зовнішніх впливів: відсутність прослизання та коливань у режимах різкого навантаження; стабільність у широкому діапазоні робочих умов.

Схема зворотного зв'язку: реалізована через сенсорні або безсенсорні методи контролю швидкості та потоку.

Можливість інтеграції: сумісність з сучасними системами ЧПУ та промисловими контролерами (PLC), підтримка стандартних інтерфейсів зв'язку.

Програмна частина: адаптивні та предиктивні алгоритми регулювання; можливість тонкого налаштування параметрів під конкретний технологічний процес.

Захисні функції: тепловий захист, захист від перенавантаження, короткого замикання та нестабільних режимів роботи.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Елементна база

Елементна база розробленого високоефективного методу керування включає асинхронний або синхронний двигун змінного струму з підвищеним ККД, перетворювач частоти на основі високошвидкісних IGBT-модулів, датчики струму, напруги, швидкості та положення (або безсенсорні засоби оцінювання), мікропроцесорний контролер чи DSP для реалізації алгоритмів керування, а також силові електронні ключі та захисні компоненти. Система доповнюється промисловими інтерфейсами зв'язку, такими як Modbus, CAN або EtherCAT, що забезпечують її інтеграцію в автоматизовані комплекси.

10 Конструктивне виконання

Система керування електроприводом мостового крана виконана як комплексно інтегрований апаратно-програмний модуль, у складі якого електроприводи механізмів пересування крана та візка під'єднані до перетворювачів частоти через захисні комутаційні елементи та силові контактори. Датчики зворотного зв'язку — інкрементальні енкодери, датчики струму, температури та 3-осьовий MEMS-гіроскоп на підвісі

вантаж — розміщені безпосередньо на приводах і конструктивних вузлах для точного контролю швидкості, навантаження та кута відхилення вантажу. Удосконалена система демпфування коливань реалізована на мікропроцесорному контролері, який через промислові інтерфейси (Modbus, CAN, EtherCAT) здійснює взаємодію з інверторами, системою керування підйомом і панеллю оператора. Програмні засоби MATLAB/Simulink застосовуються для моделювання, налаштування та оптимізації алгоритмів керування, а апаратні блоки захисту та аварійного відключення забезпечують безпечну та надійну роботу мостового крана в реальних виробничих умовах.

11 Показники технологічності

Розроблена система керування електроприводом мостового крана забезпечує високу технологічність експлуатації завдяки простій інтеграції з існуючими крановими механізмами, мінімальним змінам конструкції металоконструкцій та приводів, а також зручному налаштуванню параметрів через MATLAB/Simulink. Адаптивне навчання нейроконтролера здійснюється без тривалого простою обладнання, що скорочує час переходу між режимами роботи, підвищує стабільність руху крана та точність позиціонування вантажу, зменшує знос механічних вузлів і інструменту, а також сприяє оптимізації енергоспоживання під час безперервної експлуатації.

12 Технічне обслуговування і ремонт

Система керування електроприводом мостового крана передбачає планове технічне обслуговування, яке включає перевірку стану двигунів, перетворювачів частоти та датчиків, очищення та змазку механічних вузлів, контроль і калібрування енкодерів та тахогенераторів, а також оновлення і переналаштування параметрів нейроконтролера в середовищі MATLAB/Simulink. Крім того, проводиться тестування всіх захисних блоків та аварійних систем. Ремонтні роботи здійснюються шляхом заміни пошкоджених компонентів, електричних з'єднань або елементів захисту, при цьому конструкція системи забезпечує швидкий доступ до вузлів, що значно скорочує час простою крана.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконано напругою 380 В від силової мережі підприємства.

14 Порядок контролю та прийняття

Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНА ДЛЯ
ЗМЕНШЕННЯ КОЛИВАНЬ ПІДВІШЕНОГО ВАНТАЖУ**

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження

Актуальність теми дослідження. Робота мостового крана супроводжується механічними коливаннями вантажу на гнучкому підвісі, які збільшують час вантажно-розвантажувальних операцій, викликають додаткові циклічні навантаження в системі електроприводів механізмів підйому, мосту та візка та ускладнюють завдання позиціонування вантажу. На стадії проектування механічного та електричного обладнання мостового крана одним із головних факторів, що обмежують максимальні робочі швидкості механізмів пересування, є розгойдування вантажу.

Об'єктом є електромеханічна система, що складається з приводів мостового крана.

Предметом дослідження є режими роботи, статичні та динамічні характеристики асинхронних електроприводів змінного струму мостового крана.

Метою роботи є підвищення продуктивності мостового крана за рахунок демпфування коливань підвішеного вантажу шляхом удосконалення системи керування електроприводами мостового крана.

До **задач** магістерської кваліфікаційної роботи можна віднести:

- аналіз електромеханічної системи мостового крана як об'єкта регулювання, аналіз існуючих систем управління електроприводами для демпфування коливань вантажу під час роботи мостового крана;
- розробка математичної та комп'ютерної моделей електромеханічної системи мостового крана, що описують рух механізмів мостового крана з урахуванням одночасної роботи всіх механізмів у динамічних та статичних режимах роботи;
- розробка структурної схеми вдосконаленої системи управління електроприводами пересування механізмів для демпфування механічних коливань вантажу в усіх режимах роботи крана по двох осях переміщення;
- розробка методу розрахунку та алгоритму визначення коефіцієнта зворотного зв'язку по куту відхилення вантажу;
- виконати техніко-економічний розрахунок величини витрат запропонованого варіанту системи електроприводу та обґрунтувати правильність виконання досліджень та економічну доцільність впровадження технічних рішень;
- визначити основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваного електротехнічного комплексу в умовах дії шкідливих факторів оточуючого середовища.

Загальні характеристики вантажопідійомних пристроїв

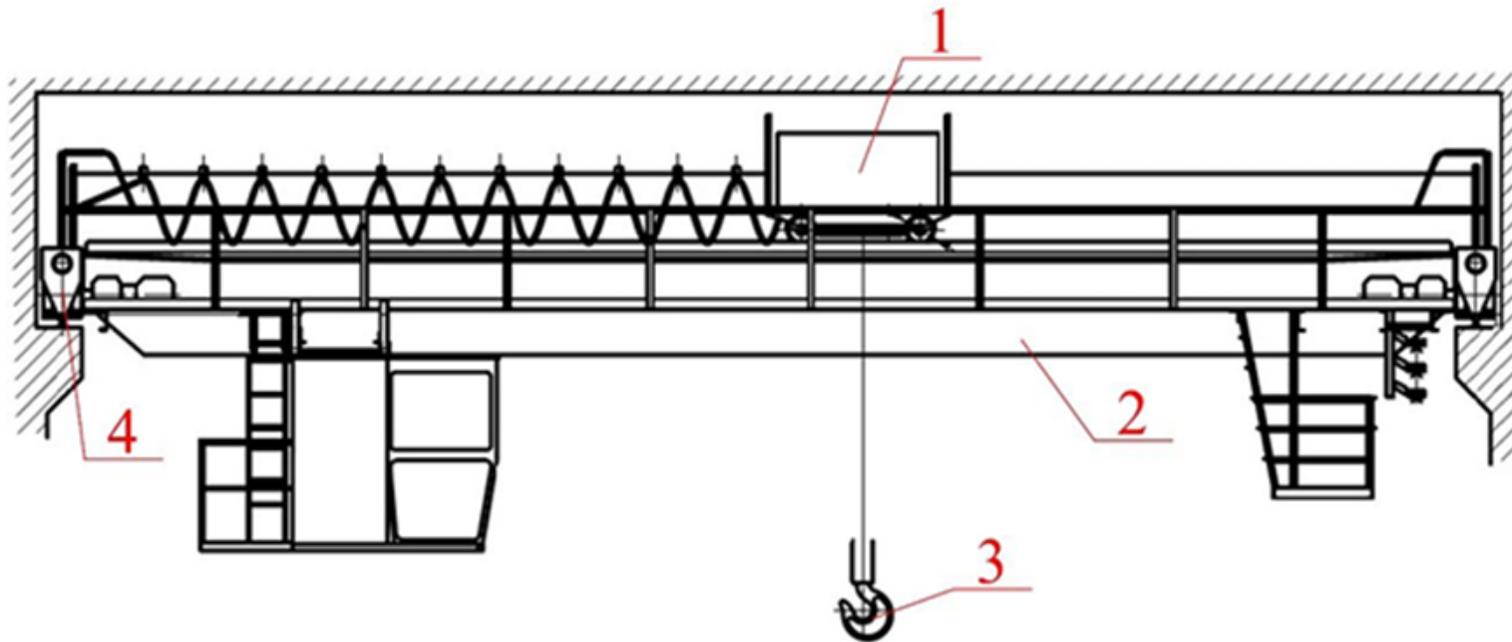


Рисунок 1.1 – Схема мостового крана з основними елементами та механізмами

Вантажний візок 1 (рисунок 1.1) переміщається по рейкових коліях уздовж бруківки несучої конструкції крана 2. Ця конструкція, в загальному випадку, являє собою дві балки прямокутного перерізу. На вантажному візку встановлюється електричний привід підйому, який приводить в рух механізм підйому з вантажозахоплювальним пристроєм 3. Весь механізм крана пересувається по кранових коліях 4. На підрейкових рейках і кранових коліях встановлюють обмежувачі крайніх положень візка і крана

Загальні характеристики вантажопідійомних пристроїв

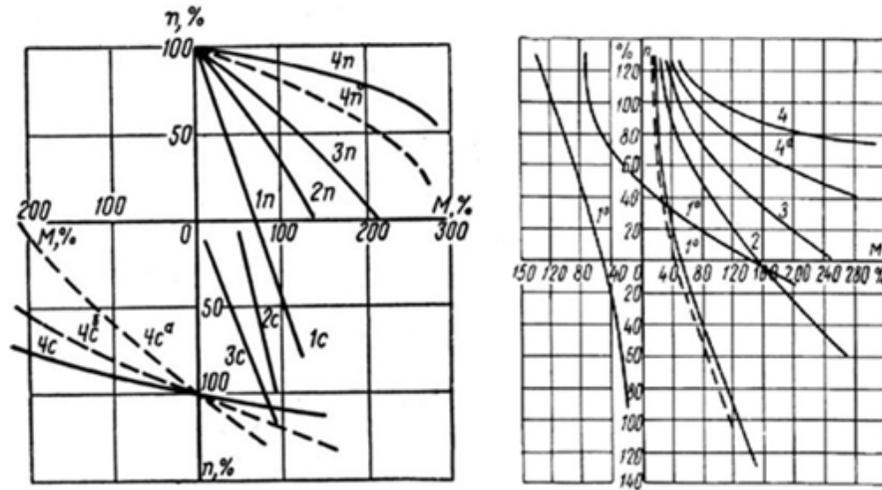


Рисунок 1.1 – Механічні характеристики системи управління: а) механізмом підйому мостового крана за допомогою магнітного контролера ТСА; б) механізмом пересування мостового крана за допомогою контролера ПІ

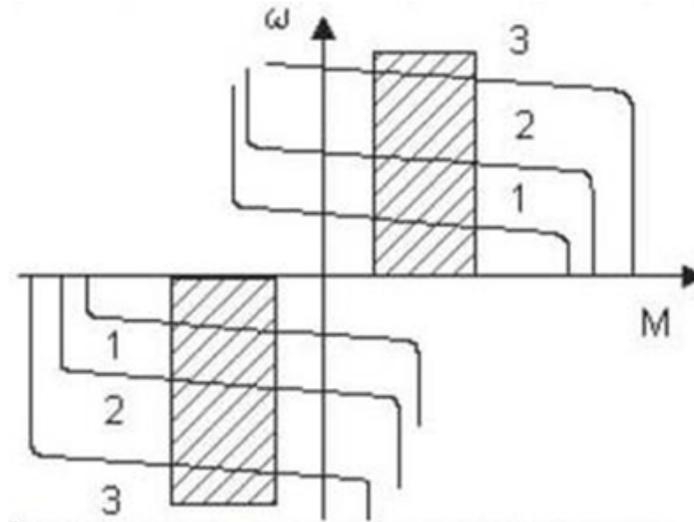


Рисунок 1.3 – Механічні характеристики електроприводу механізму пересування

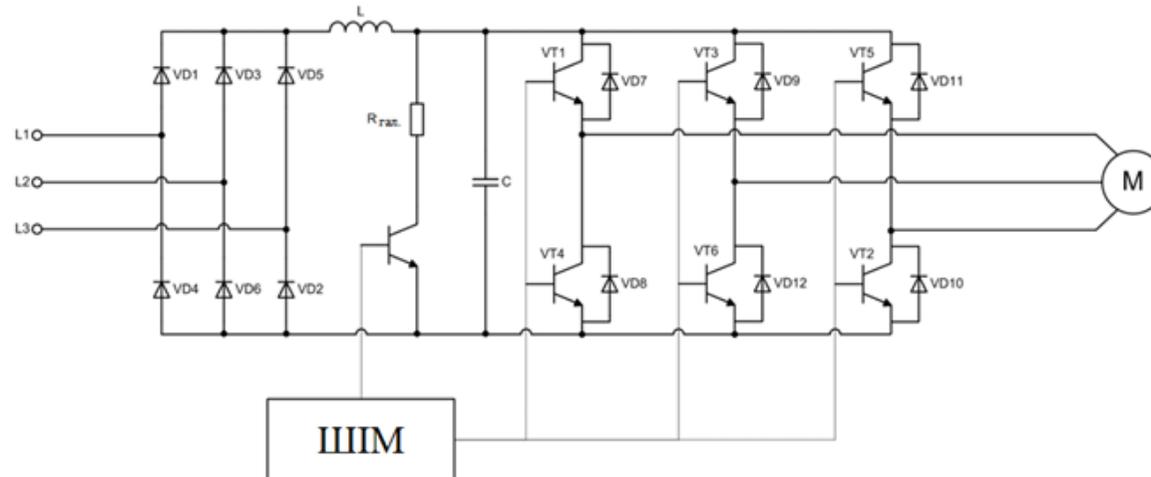


Рисунок 1.2 – Принципова схема системи ПЧ-АД

Аналіз процесу коливань вантажу під час роботи мостового крана

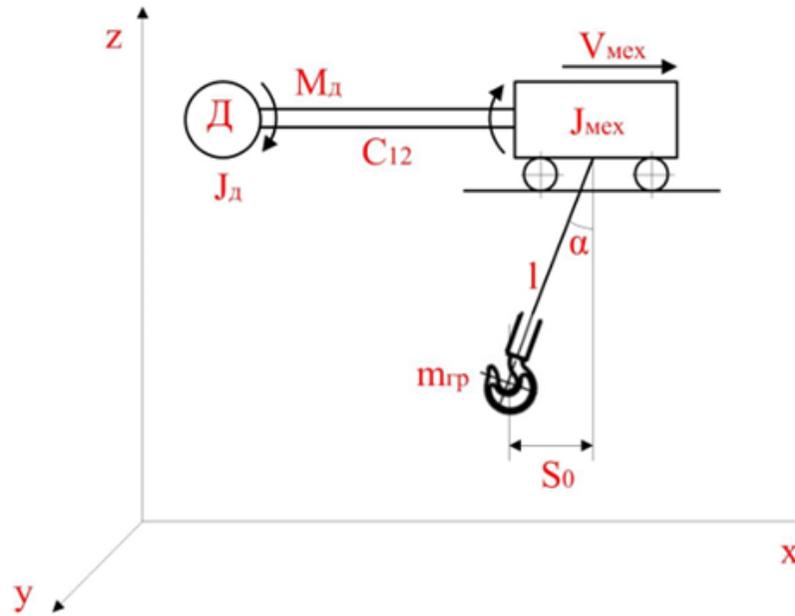
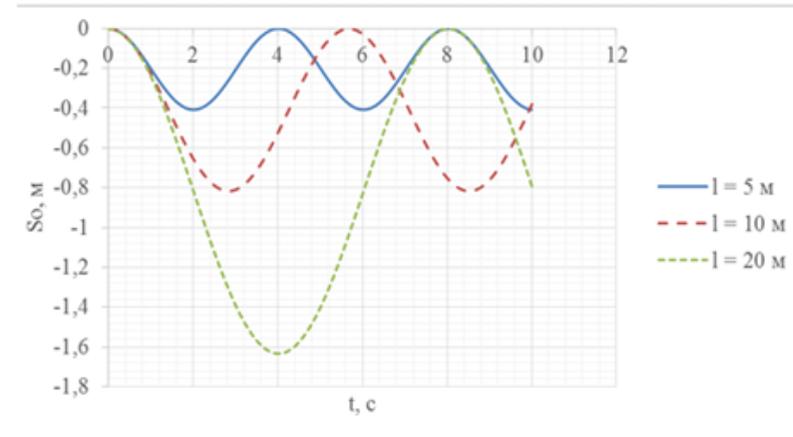


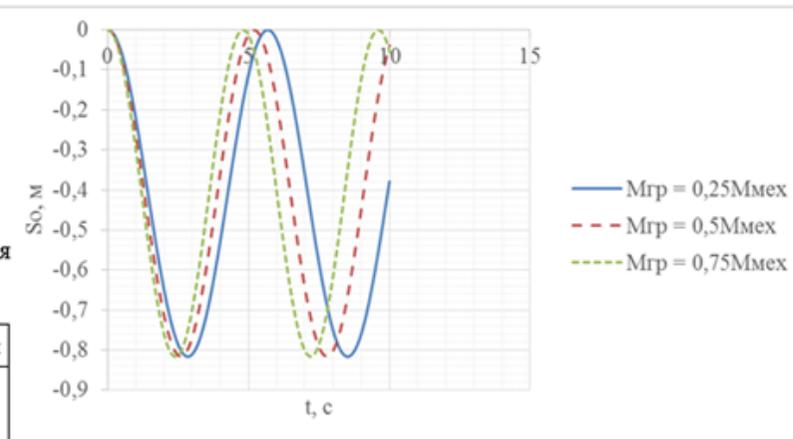
Рисунок 1.3 – Розрахункова схема механізму пересування візка мостового крана

Таблиця 1.1 – Величини коливань у системі механізму пересування мостового крана

Вид коливань	Параметр	Значення	Параметр	Значення
Пружні коливання у механічних зв'язках	Частота власних коливань ω_{12}, c^{-1}	> 25	Період коливань T, c	$< 0,04$
Колівання гнучкого підвісу	Частота власних коливань $\omega_{гру}, c^{-1}$	< 3	Період коливань T, c	$> 0,5$



а)



б)

Рисунок 1.4 – Залежність кута відхилення вантажу під час пуску від: а) довжини підвісу; б) маси вантаж

Аналіз технічних рішень для зменшення коливань підвішеного вантажу

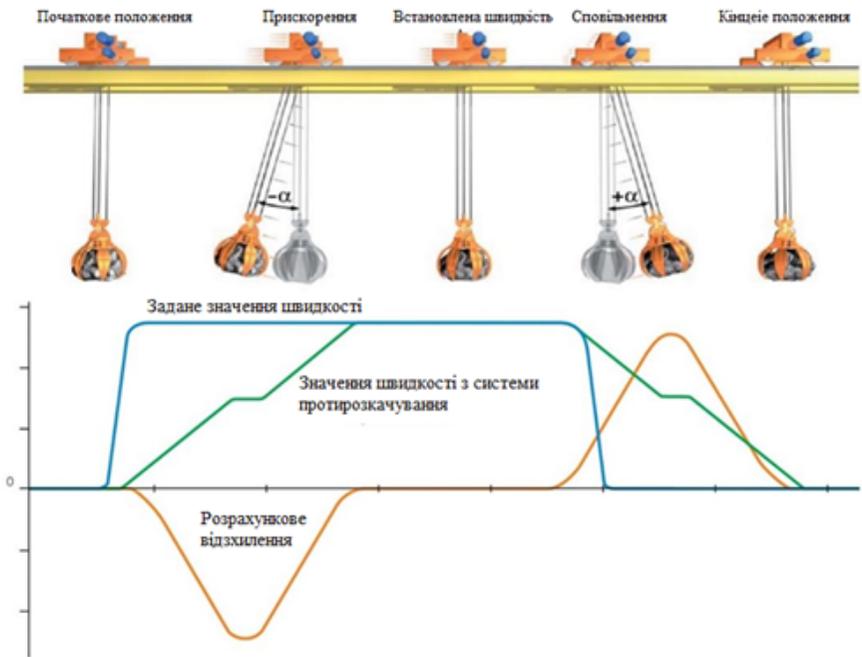


Рисунок 1.6 – Принцип роботи системи протирозгойдування вантажу фірми АВВ

Рисунок 1.10 – Розрахунок довжини підвісу за допомогою кінцевих вимикачів приводу підйому

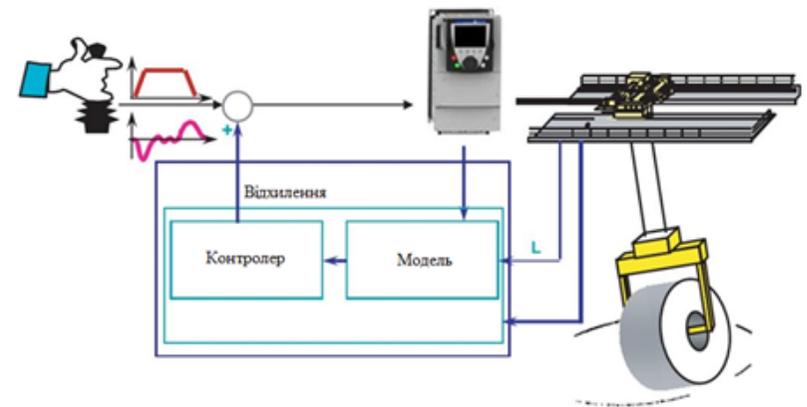
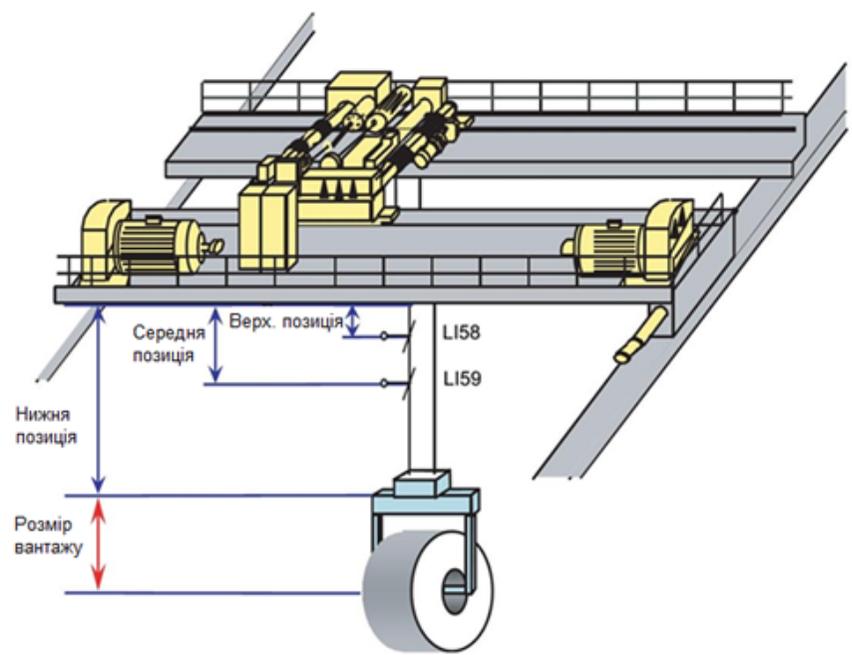


Рисунок 1.9 – Система гасіння розгойдування вантажу фірми Schneider Electric



Математичні моделі системи електроприводу мостового крана

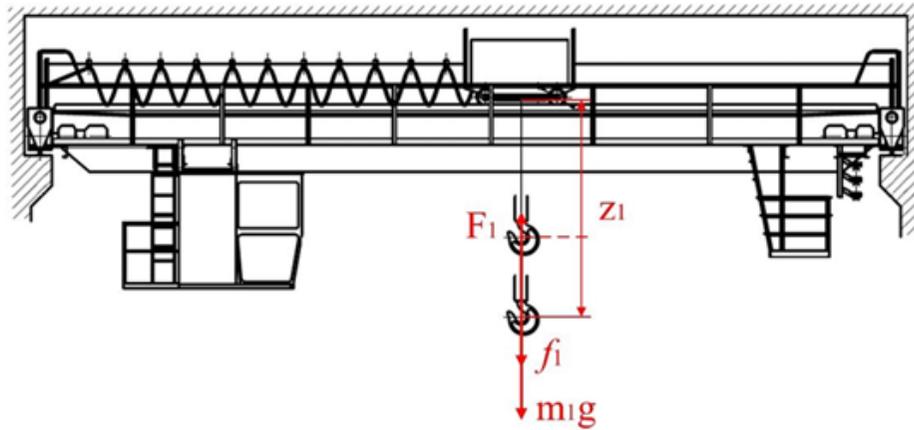


Рисунок 2.1 – Узагальнена координата та сили, що діють на механізм підйому

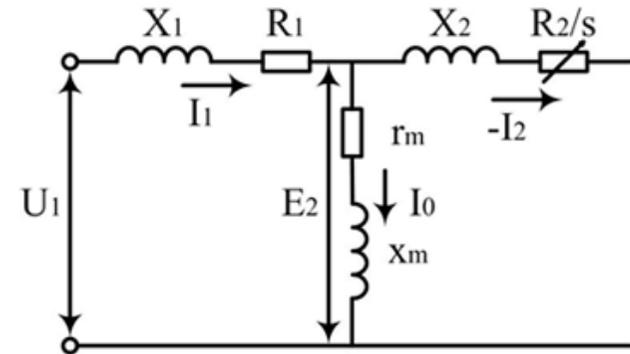


Рисунок 2.3 – Схема заміщення асинхронного двигуна

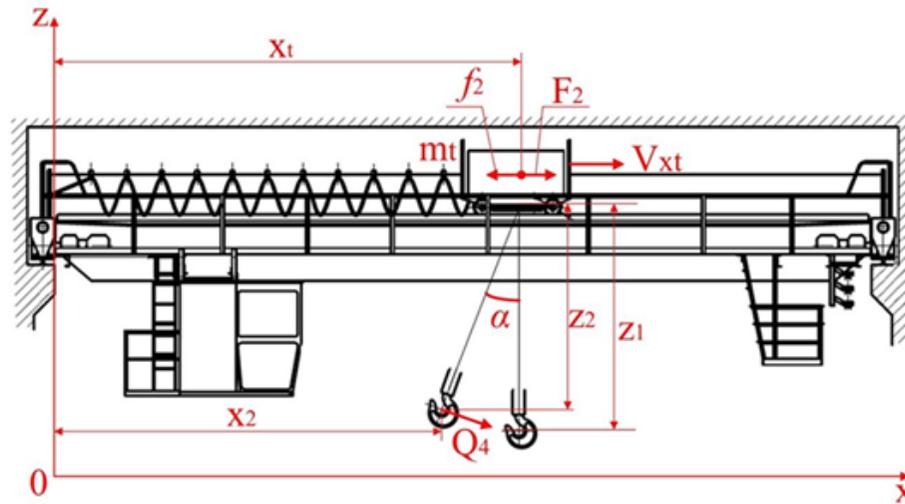


Рисунок 2.2 – Узагальнені координати та сили, що діють на механізм пересування вантажного візка

Математичні моделі системи електроприводу мостового крана

На рисунку 2.4 приведено функціональну схему скалярної системи ПЧ АТ, що реалізується більшістю виробників перетворювачів частоти

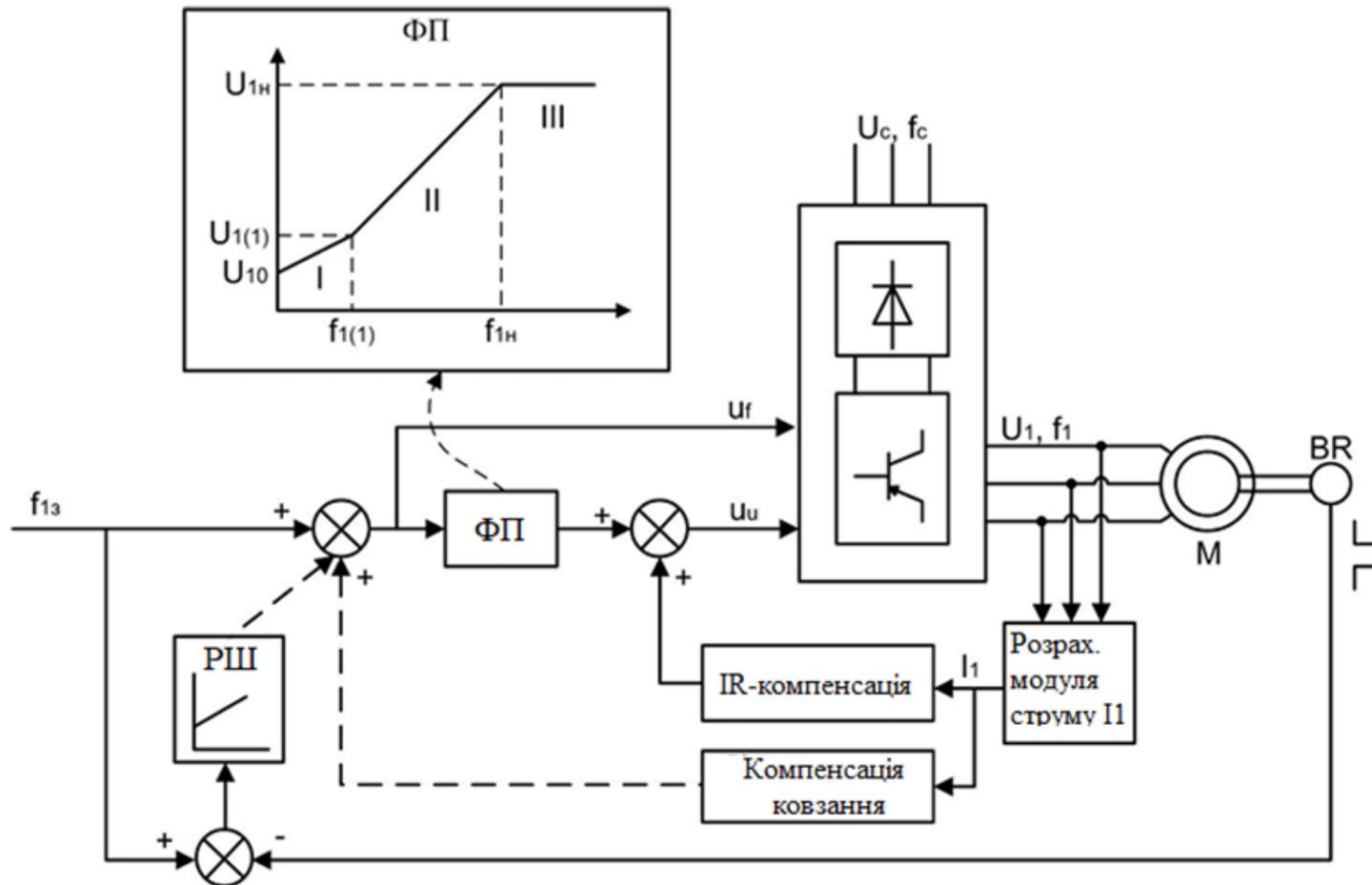


Рисунок 2.4 – Функціональна схема системи ПЧ-АД зі скалярним керуванням

Математичні моделі системи електроприводу мостового крана

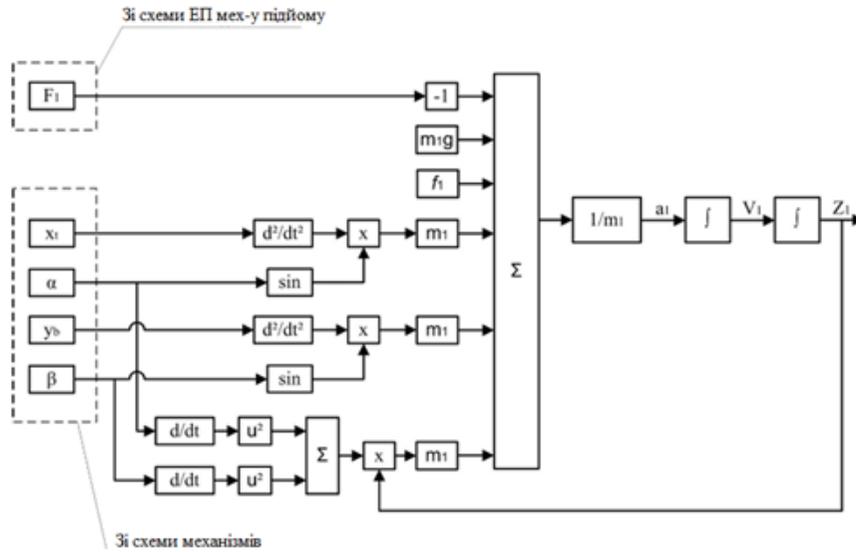


Рисунок 2.5 – Функціональна схема моделі механізму підйому

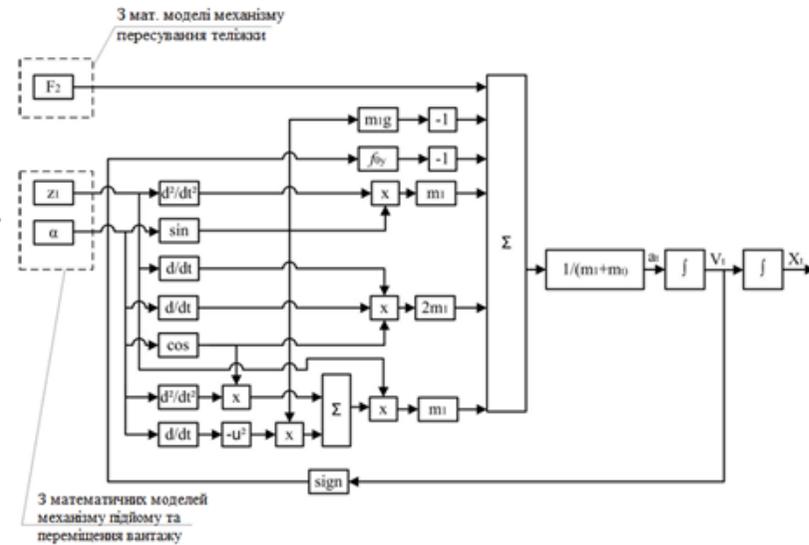
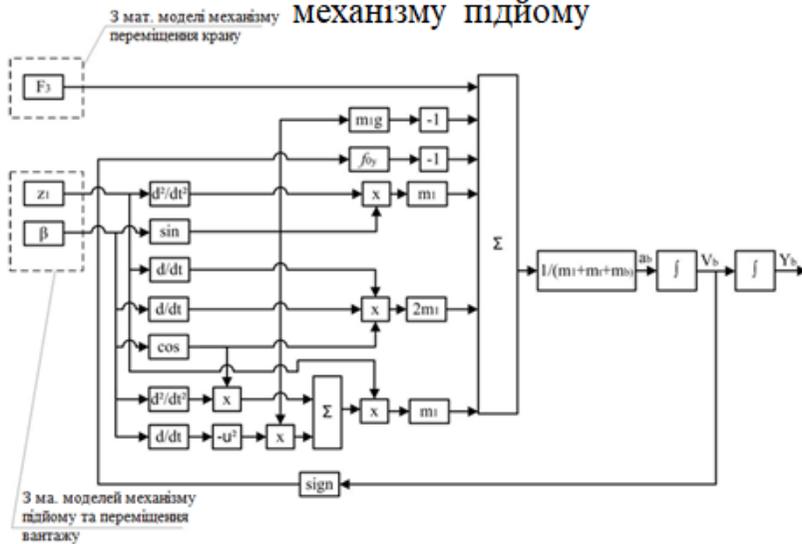


Рисунок 2.6 – Функціональна схема моделі механізму пересування вантажного візка

Рисунок 2.7 – Функціональна схема моделі механізму пересування мосту

Математичні моделі системи електроприводу мостового крана

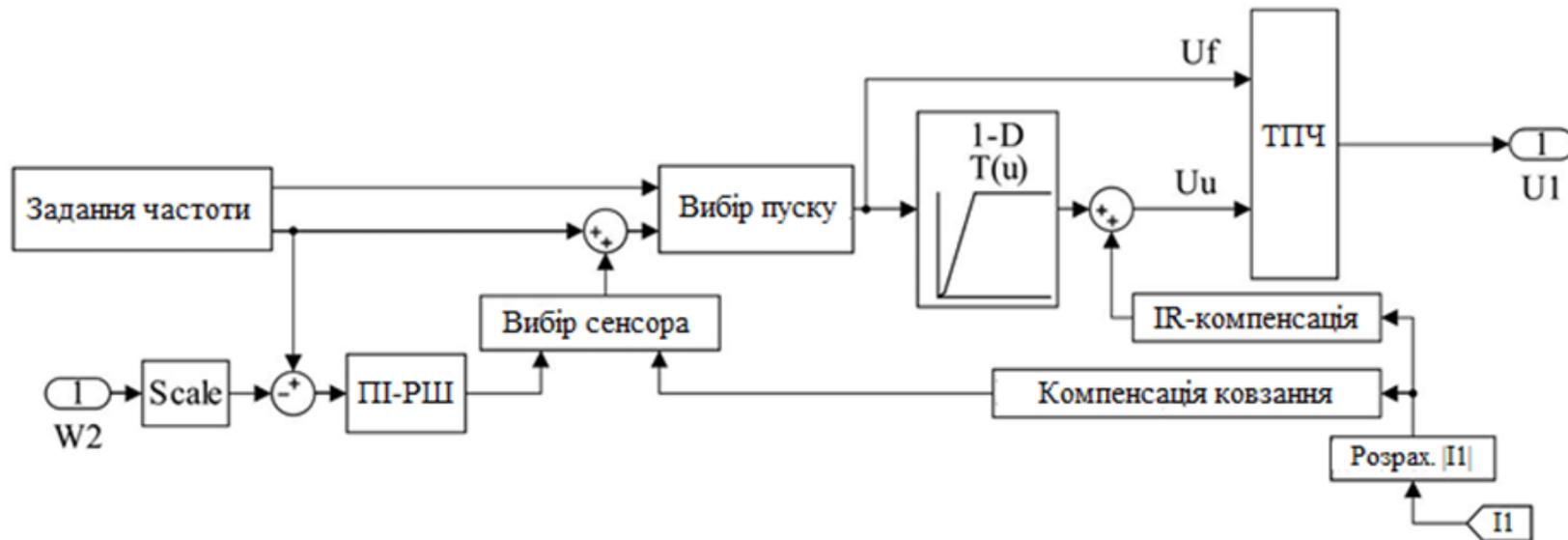


Рисунок 2.9 – Комп'ютерна модель перетворювача частоти

- До складу комп'ютерної моделі перетворювача частоти (рисунок 2.9) включені такі блоки:
- Завдання частоти – блок визначає задану величину частоти та темп задатчика інтенсивності.
 - Вибір пуску – використовується для моделювання прямого пуску двигуна шляхом встановлення прапора у діалоговому вікні. У протилежному випадку використовується пуск від задатчика інтенсивності.
 - Scale – використовується для масштабування сигналу швидкості ротора;
 - ПІ-РШ – пропорційно-інтегральний регулятор швидкості, з можливістю відключення інтегральної частини шляхом завдання нульового коефіцієнта.
 - Вибір датчика – блок вибору використання зворотного зв'язку за швидкістю.

Синтез системи керування приводом поздовжньої подачі токарного верстата з пружними зв'язками із застосуванням нестандартного задавача інтенсивності

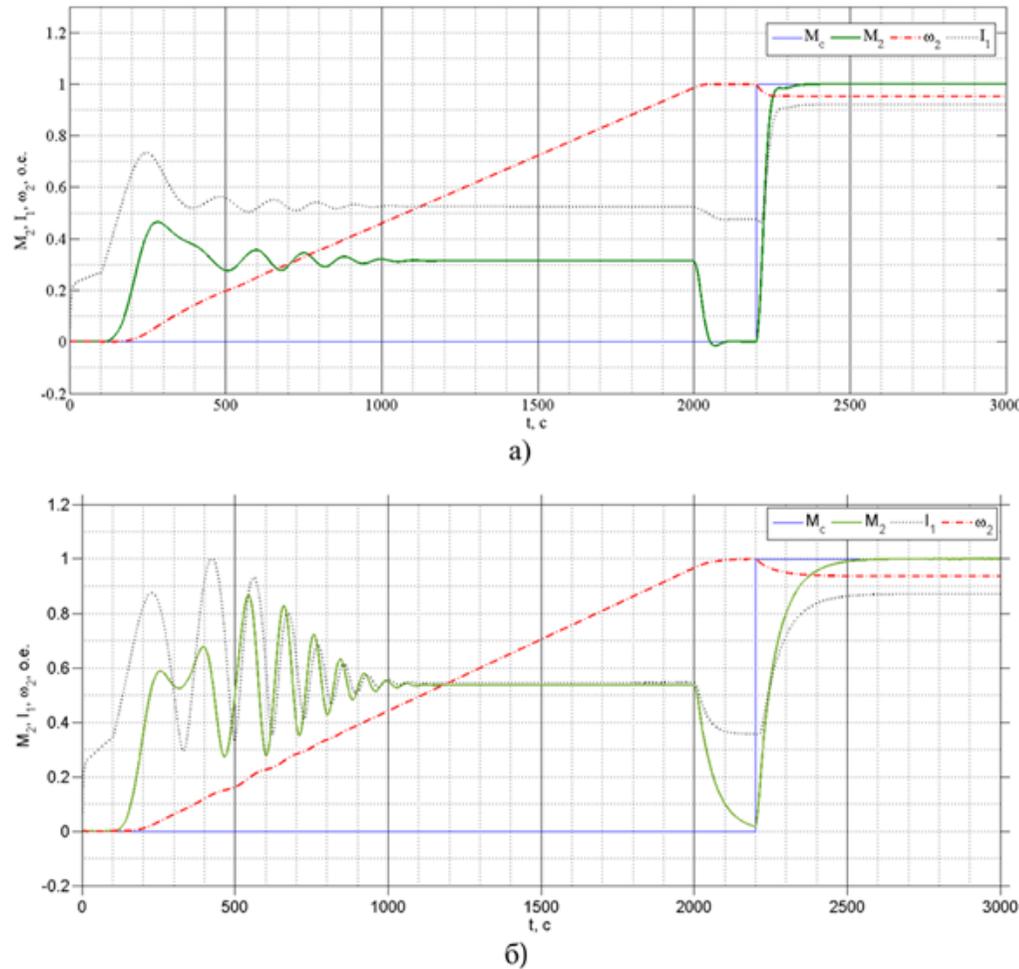


Рисунок 2.11 – Перехідні процеси запуску від задатчика інтенсивності: а) 4A90L4Y3; б) MTKH312-6

Таблиця 2.1 – Параметри двигунів для перевірки комп'ютерної м

Параметр	Пози-я	Од. вим.	Механізм переміщення візка	Механізм переміщення крану
			Двигун 4A90L4Y3	Двигун MTKH312-6
Номинальна потужність	P2н	кВт	2,2	15
Номинальна частота обертання	пн	об/хв	1425	930
Номинальний струм статора обмотки	I1н	А	5	36
Номинальний момент	Mн	Нм	14,7	124,8
Номинальний ККД	η_n	%	80	81
Номинальний коефіцієнт потужності	$\cos \varphi_n$	-	0,83	0,78
Кратність пускового моменту	$M_{п}/M_n$	-	2,1	3,1
Кратність максимального моменту	$M_{т}/M_n$	-	2,4	3,2
Кратність пускового струму	$I_{п}/I_n$	-	4,5	5
Момент інерції ротора	$J_{л}$	кг·м ²	0,056	1,2

Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану

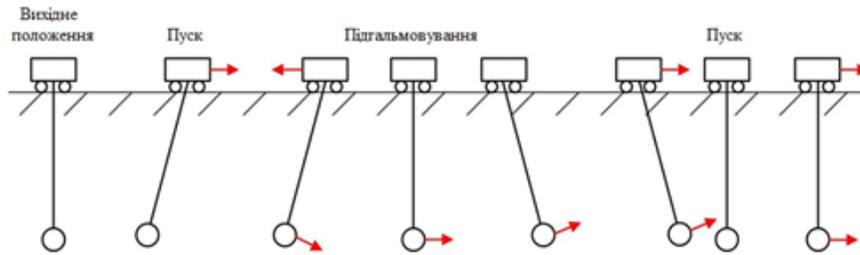


Рисунок 3.1 – Принцип гасіння розгойдувань вантажу у ручному режимі

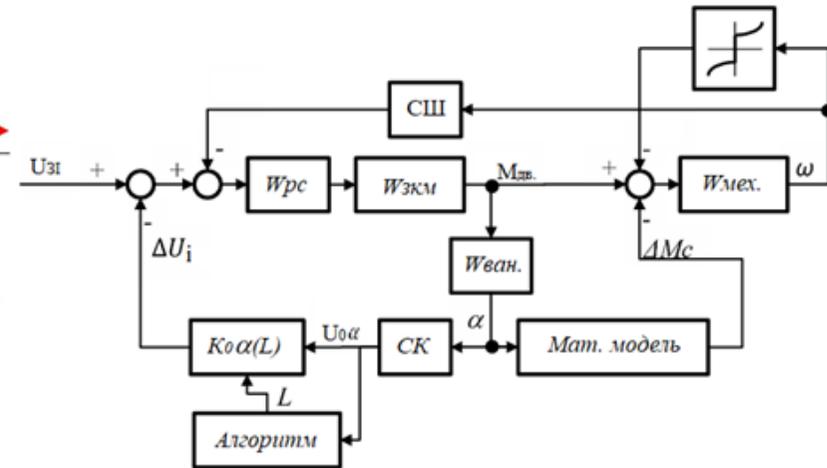


Рисунок 3.3 – Структурна схема удосконаленої СУЕП для зменшення коливань вантажу

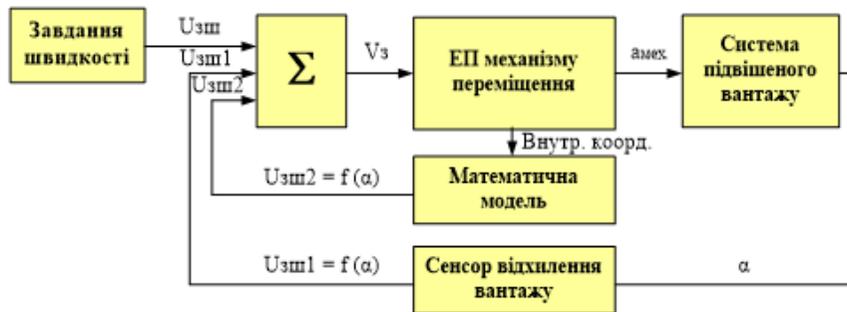
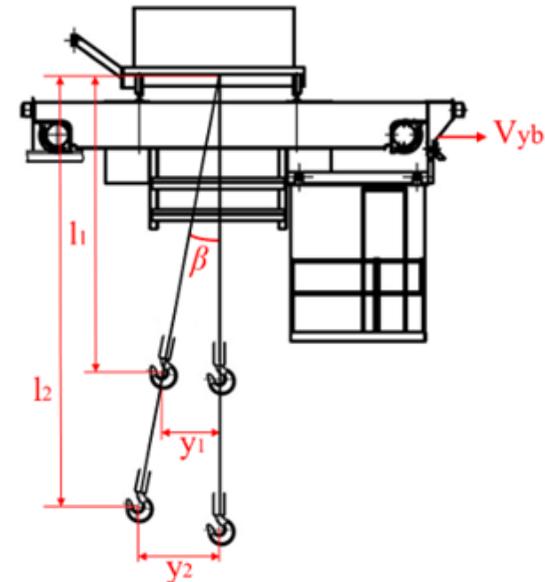


Рисунок 3.2 – Функціональна схема СУЕП для зменшення коливань вантажу

Рисунок 3.4 – Залежність координати вантажу від величини довжини підвісу



Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану

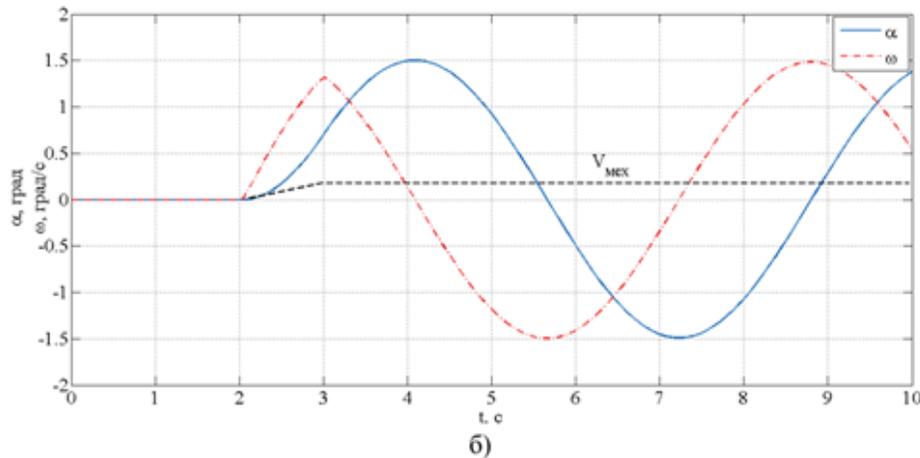
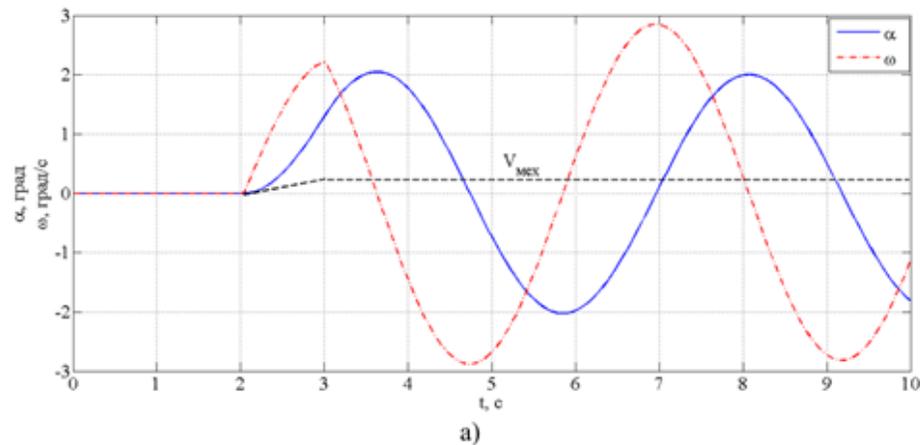


Рисунок 3.5 – Розрахункові перехідні процеси координати та швидкості вантажу при пуску на підвісі завдовжки: а) $l_1 = 5$ м; б) $l_2 = 10$ м

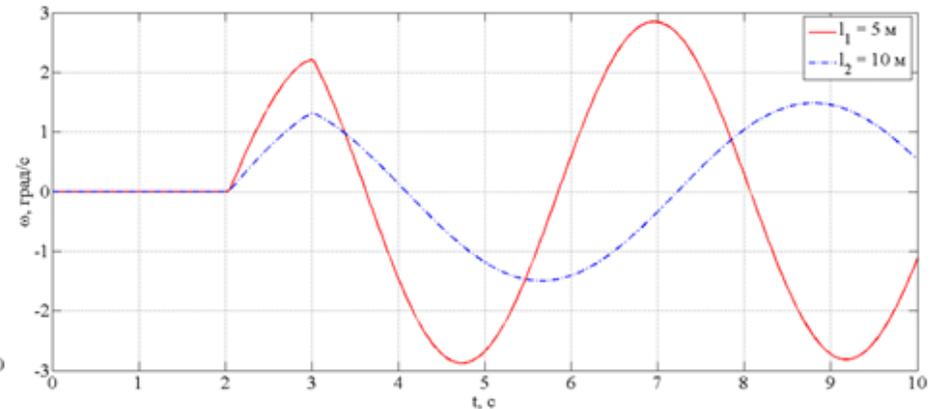


Рисунок 3.6 – Графіки кутової швидкості вантажу на різній висоті підвісу

Для варіанта пуску механізму з довжиною підвісу $l_1 = 5$ м максимум кривої швидкості досягається в момент часу 1,13 с, отже період коливань вантажу дорівнює 4,52 с. Розрахункове значення періоду коливання для довжини підвісу 5 м дорівнює

$$T = \frac{2\pi}{\omega_{\max}} = 2\pi\sqrt{l_1/g} = 2\pi\sqrt{5/9,81} = 4,49 \text{ с.} \quad (3.1)$$

Помилка визначення періоду коливань вантажу становить 0,7%.

З певного значення $1/4$ періоду коливань можна здійснити зворотне завдання, тобто. визначити довжину підвісу за формулою:

$$l_1 = g \cdot \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = 9,81 \cdot \left(\frac{4 \cdot 1,13}{2\pi}\right)^2 = 5,08 \text{ м.} \quad (3.2)$$

Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану

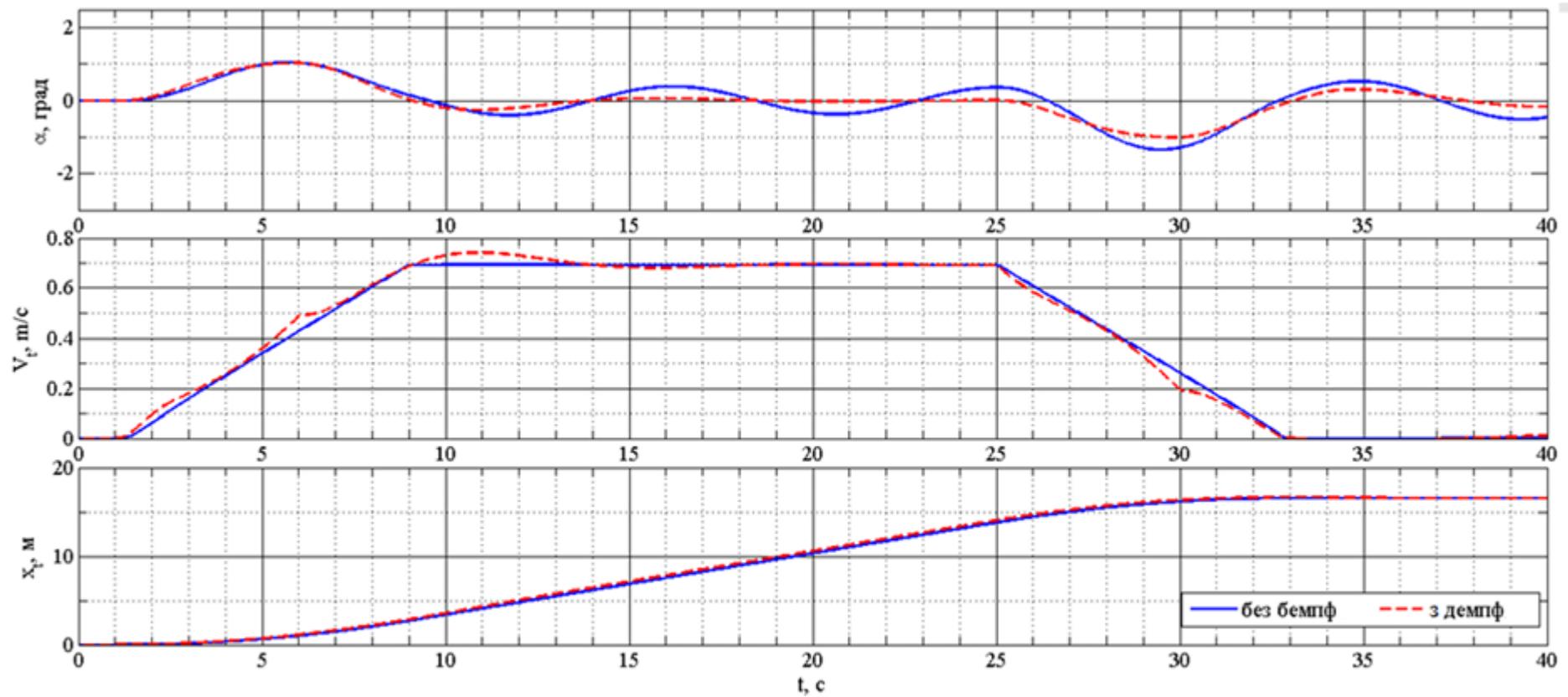


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси швидкості, координати візка та відхилення вантажу за однакових темпів розгону приводу в удосконаленій та існуючій СУЕП

Вдосконалення системи керування електроприводами мостового крану

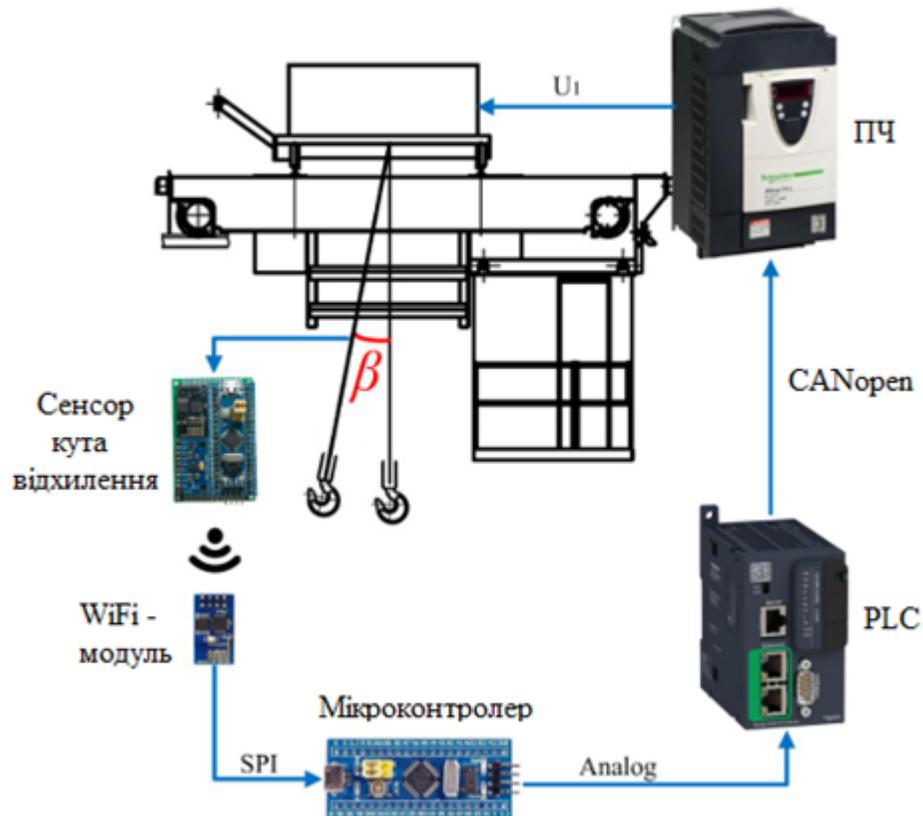


Рисунок 3.13 – Функціональна схема організації зв'язку системи

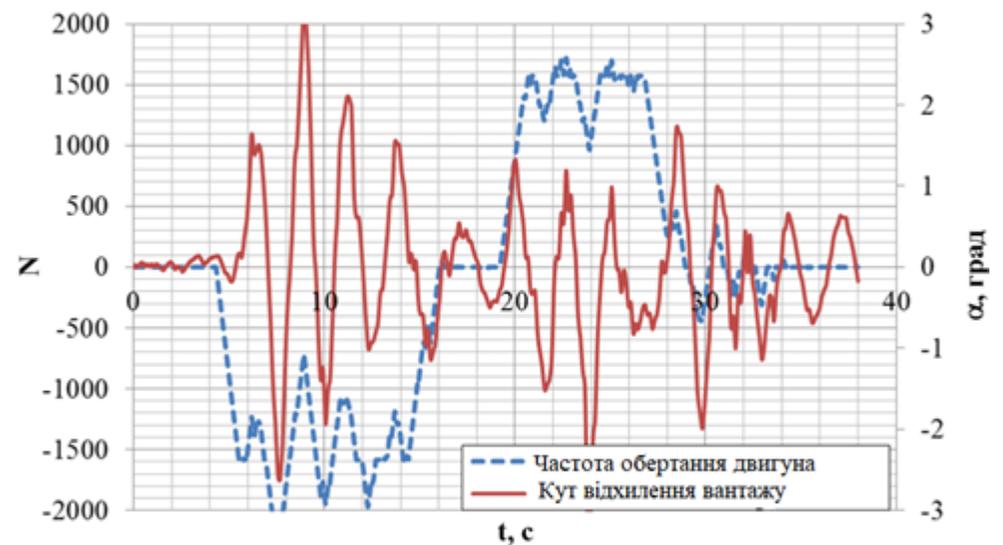


Рисунок 3.14 – Перехідні процеси швидкості та кута відхилення вантажу в удосконаленій СУЕП

ВИСНОВКИ

1. Електромеханічні системи механізмів пересування з підвішеним вантажем доцільно розглядати як двомасові системи, що включають жорсткий механізм і гнучкий підвіс. Власні частоти коливань цих підсистем відрізняються більш ніж у 10 разів, що повністю усуває взаємний вплив їх коливальних процесів.
2. Розроблено математичну модель мостового крана з підвішеним вантажем, яка враховує зміну довжини підвіса в діапазоні від 1 до 12 м та формування додаткових навантажень на механізми пересування візка і крана під дією вантажу.
3. Створено комп'ютерну модель мостового крана, що містить перехресні зв'язки між механізмами підйому, пересування візка, пересування крана та системами електроприводів. Модель дає змогу аналізувати перехідні процеси та формування додаткової статичної складової навантаження зі зміною довжини підвіса у статичних і динамічних режимах при швидкостях переміщення до 60 м/хв.
4. Удосконалена система керування для демпфування коливань вантажу побудована на основі коригувального зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу в межах $\pm 15^\circ$. Пропорційна ланка має змінний коефіцієнт підсилення, який автоматично коригується залежно від довжини підвіса, визначеної за показами датчика кута.
5. Ключовим елементом апаратно-програмного комплексу є 3-осьовий MEMS-гіроскоп, який працює автономно. Дані з частотою 136 вимірювань за секунду обробляються мікроконтролером і передаються через Wi-Fi до системи керування електроприводом для корекції швидкості відповідно до кутових відхилень вантажу.
6. Проведено техніко-економічний розрахунок впровадження системи електропривода, який показав зменшення річних експлуатаційних витрат у середньому на 10–15 %, що підтверджує економічну доцільність застосування запропонованих рішень.
7. Визначено основні вимоги щодо безпечної експлуатації електротехнічного комплексу в умовах впливу шкідливих факторів навколишнього середовища, включно з вібраціями, температурним діапазоном роботи $-20\dots+45^\circ\text{C}$ та підвищеною запиленістю.

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система автоматизованого керування електроприводом
мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу
Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 12,76%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Нанак О.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Сівохін С.Д.

(прізвище, ініціали)

08-24.МКР.011.00.000

					Літ	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Система автоматизованого керування електроприводом мостового крана для зменшення коливань підвішеного вантажу		
Розробив:		Сивошін С.Д.		21.11			
Перевірив:		Нанака О.М.		21.11			
Т. контр.							
Опонував:		Бабенко О.В.		19.12			
Норм. кон.		Паянко		24.11	Аркуш	Аркушів	
Затверд.		Мошноріз М.М.		25.11	ВНТУ, гр. ЕПА-24м		