

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва та цифрових технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси
в гірничо-металургійному виробництві»
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка

на тему «Модернізація АСУ електроприводу кран-балки (5т.) в умовах
критого складу металопродукції»

Керівник роботи

Олег СУБОТІН

Консультант від
бази практики

Василь ПАВЛЮК

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Олександр МІНАЄНКО

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Андрій ЛЕОНОВ

Запоріжжя 2025



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»	
Факультет	<u>автоматизації виробництва та цифрових технологій</u>
Кафедра	<u>автоматизації, електро- та робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та роботехніка</u>
ОПП	<u>Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Олексій КОЙФМАН

27.11.2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

МІНАЄНКО Олександр Григорович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи *Модернізація АСУ електроприводом кран-балки (5т.) в умовах критого складу металопрокату*

керівник роботи *Суботін Олег Володимирович, доцент, канд. техн. наук,*

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

затверджені наказом Університету від 14.10.2024 р. №238/14.10.2024

2. Термін подання роботи *03.02.2025 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень, тощо.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) *Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів (2.1. Постановка задач автоматизації. 2.2. Розрахунок параметрів електродвигуна переміщення кран-балки. 2.3. Визначення передавальної функції двигуна переміщення моста кран-балки. 2.3.1 Оптимізація контуру швидкості. 2.4. Визначення руху моста для гасіння коливань вантажу. 2.5. Моделювання приводу ходу моста. 2.6. Розробка системи управління мостом кран-балки.). 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації (3.1. Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації, 3.2. Розробка алгоритмічного забезпечення системи управління. 4. Економічне обґрунтування прийнятих рішень. (4.1. Розрахунок сумарної потужності. 4.2. Розрахунок вартості інвестиційного проекту.) Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.*

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): *1. Схема функціональна системи автоматизації. 2. Схема функціональна САУ електроприводу кран-балки. 3. Схема структурна комплексу технічних засобів. 4. Блок-схеми алгоритмів керування та програмного забезпечення. 5. Презентація магістерської роботи.*

Плакати (за вибором): результати розрахунків та досліджень, розрахунок економічного ефекту, графіки, екранні форми тощо.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Усі розділи	Суботін О.В., доцент кафедри АВЕРС

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи (проєкту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	31.12.2024	
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів	03.01.2025	
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	17.01.2025	
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування прийнятих рішень	27.01.2025	
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	31.01.2024	
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	03.02.2025	
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	10.02.2025	
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	20.02.2025	

Здобувач

(Олександр МІНАЄНКО)

Керівник роботи

(Олег СУБОТІН)



АНОТАЦІЯ

Мінаєнко Олександр Григорович Модернізація АСУ електроприводу кран-балки (5т.) в умовах критого складу металопрокату.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». ОПП «Інтелектуальні системи управління та робототехнічні комплекси в гірничо-металургійному виробництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

Об'єктом дослідження є мостова одно балочна кран-балка вантажопідйомністю 5 тон, в умовах критого складу металопрокату одного з підприємств України.

Предметом дослідження є проведення аналізу конструктивних та технологічних особливостей роботи базової системи керування, а також можливості впровадження АСУ електроприводом мостової кран-балки.

У першому розділі проведено огляд технологічного процесу, умов експлуатації, загальне поняття про вантажопідйомні крани і кран-балки. Технічні відомості, схеми та характеристики об'єкта. Детальний огляд існуючої проблеми з ключовими показниками. Аналізуються обмеження поточної системи управління, зокрема нестача плавності руху, великі витрати електроенергії та знос механізмів. Огляд існуючих рішень, досліджуються сучасні технології автоматизації кранових систем.

У другому розділі розглянуто формулювання завдань автоматизації, визначення основних цілей модернізації, таких як покращення енергоефективності, зменшення механічного зносу, підвищення безпеки. визначили ключові параметри електроприводу, Проведено аналіз руху моста кран-балки, та методів гасіння коливань. Побудована математична модель електроприводу переміщення кран-балки.

Третій розділ присвячений визначенню оптимальних комплектуючих для модернізації, розробці алгоритмів управління що забезпечують стабільну та ефективну роботу. Опис створених програмних модулів для керування кран-балкою. Перевірка працездатності системи в середовищі Simulink

У четвертому розділі проведена оцінка витрат на модернізацію, включаючи закупівлю обладнання. Проведено розрахунок економічного ефекту від запропонованої модернізації, визначення періоду, за який інвестиції в модернізацію повністю окупляться.

КРАН-БАЛКА, ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ (АСУ), КОНТРОЛЕР (ПЛК), ДАТЧИК



ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	7
1.1 Актуальність теми	7
1.2 Загальне поняття про кран-балки	7
1.3 Технічні відомості та характеристики кран-балки 5т	8
1.4 Аналіз проблемних питань	13
1.5 Огляд існуючих рішень	14
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	16
2.1 Постановка задач автоматизації.....	16
2.2 Розрахунок параметрів електродвигуна переміщення кран- балки	17
2.3 Визначення передавальні функції двигуна переміщення моста кран- балки	18
2.3.1 Оптимізація контуру швидкості (синтез регулятора швидкості) ...	21
2.4 Визначення закону руху моста для гасіння коливань вантажу.....	23
2.5 Моделювання електроприводу ходу моста.....	26
2.6 Розробка системи управління мостом кран-балки.....	27
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	33
3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації.....	33
3.2 Розробка алгоритмічного забезпечення системи управління	40
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ	50
4.1 Розрахунок сумарної потужності.....	50
4.2 Розрахунок вартості інвестиційного проекту.....	52
ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55



ВСТУП

Ефективне функціонування складу є одним з вирішальних факторів успішної роботи підприємства в цілому. Кранове обладнання відіграє незамінну роль у сучасній логістиці. Вибір конкретного типу крана залежить від особливостей складу, характеру переміщуваних вантажів та інших факторів. Часто існуючі кранові системи були спроектовані для інших завдань, що вимагає їх модернізації з метою адаптації до нових умов експлуатації та перегляду технічних рішень. З такою проблемою зіткнувся один із складів одного з підприємств України.

Вантажно-розвантажувальні роботи на складах металопрокату мають ряд особливостей, обумовлених властивостями вантажів, умовами роботи та типом обладнання. Особливо важливу роль у цих процесах відіграють мостові і козлові крани, які є основним інструментом для переміщення металевих виробів.

Мостові крани застосовується там, де потрібно забезпечити безперебійне сортування вантажів або матеріалів, а також на таких виробництвах як заводи залізобетонних конструкцій, виробництва та сортування металопрокату, виробництва переробки сипких вантажів, вантажні порти, складське господарство тощо.

Завдяки різноманітності сучасних вантажозахоплювальних пристроїв, сфера застосування мостового крана є надзвичайно широкою. Однак, застарілі системи управління кранами часто не відповідають сучасним вимогам, що призводить до зниження ефективності виробництва, підвищення ризику аварійних ситуацій та збільшення витрат на обслуговування та електроспоживання.

Чому важливо провести аналіз. Правильний аналіз є фундаментом для успішного впровадження АСУ, а також допомагає уникнути зайвих витрат.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення дослідження мостової кран-балки вантажопідйомністю 5 тон, провести аналіз існуючої системи управління, вивчити її недоліки, обмеження, на предмет можливості та доцільності її модернізації з впровадженням автоматизованої системи управління електроприводом, з метою підвищення її продуктивності, надійності та безпеки.

Апробація роботи

Перелік публікацій за результатами виконання кваліфікаційної роботи:

1. Subotin O. V., Minaienko O. G. Research of the control system of the electric drive of the lift mechanism of the bridge crane beam. *MININGMETALTECH 2024 – THE MINING AND METALS SECTOR: INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY AND EDUCATION. Volume 2*. 2024. P. 88–91. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-145>



1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Актуальність теми

Модернізація автоматизованих систем управління (АСУ) кранового обладнання є одним з напрямків розвитку сучасного виробництва. Багато виробничих процесів вимагають високої точності позиціонування вантажу. Сучасні системи управління здатні забезпечити точність до міліметра. Впровадження таких технологій, як Інтернет речей, штучний інтелект, дозволяє створювати більш інтелектуальні і адаптивні системи управління. Датчики, інтегровані в кран та його оточення, збирають дані про роботу обладнання, стан, кількість переміщених вантажів. Ці дані передаються в систему управління, що дозволяє здійснювати постійний моніторинг і своєчасно виявляти потенційні проблеми, та планування ремонтів. Аналізуючи дані про роботу крана і оптимізувати режими роботи для зниження споживання електроенергії.

Сучасне виробництво вимагає все більшої швидкості виконання виробничих завдань. Модернізація з впровадженням АСУ дозволяє оптимізувати траєкторії руху крана, зменшити час на виконання циклів і підвищити загальну продуктивність.

В автоматизації технологічних процесів машинобудування значну роль відіграє автоматизація транспортно-складських операцій. З метою підвищення ефективності, безпеки та довговічності обладнання, актуальним є вдосконалення підйомно-транспортних механізмів, зокрема мостових кранів. Таким чином, розробка математичних моделей систем мостових кранів та створення спеціалізованого програмного комплексу для аналізу їх динамічних характеристик є важливим науково-технічним завданням.

1.2 Загальне поняття про кран-балки

Кран-балка – це мостовий кран з однією несучою балкою, по якій рухається вантажопідіймальний механізм – тельфер. Ходова балка кран-балки переміщується по рейках, закріплених на підкранових балках, що розташовані під стелею виробничого цеху, складу або відкритого майданчика. Існують конструкції, де ходові колеса спираються на нижні частини підкранових двотаврів.

Керування кран-балкою може здійснюватися кількома способами: вручну – з кабіни або за допомогою підвісного пульта; дистанційно – з використанням бездротового зв'язку з підлоги; або автоматизовано – за допомогою програмованого контролера, зокрема часто застосовуються контролери Siemens.

Завдяки своїй простій конструкції, доступній ціні та високій ефективності, кран-балки є широко поширеним та зручним обладнанням для підймання та переміщення вантажів.

1.3 Технічні відомості та характеристики кран-балки 5т

Технічні характеристики та паспортні дані були взяті з паспорта кран-балки на занесені в таблицю 1.1 для зручного огляду.

Таблиця 1.1 – Технічні дані кран-балки

Тип крана:	мостовий електричний однобалочний опорний;
Індекс крана:	1-А-5-16-6-380-У2;
Заводський номер:	37
Рік виготовлення:	2010
Призначення крана:	загального призначення для піднімання і переміщення вантажів
Група класифікації (режиму роботи) за ISO 4301/1:	крана мостового електричного однобалочного опорного механізмів
Тип привода:	електричний
Навколишнє середовище, в якому може працювати кран: температура : робочого стану	найбільша +40 °С плюс найменша -20 °С мінус
Відносна вологість повітря	90 %, за температури 20 °С
Вибухонебезпечність:	вибухонебезпечне
Пожежонебезпечність:	пожежобезпечне
Вид електричного струму, напруга і кількість фаз:	
Коло силове	змінний струм (50 гц), напруга 380 В., три фази
Коло керування	42 В. трансформатор 380/42
Коло робочого освітлення	230 В
Коло ремонтного освітлення	230 В.
Прогон крана, м.	16
Висота підйому вантажу метрів, м	6
Швидкість ходу моста. м/с	0,5
Швидкість візка, м/с	0,33
Діапазон піднімання, м.	—
Глибина підіймання, м.	—
Виліт консолей, м.	—
База кран-балки, м.	2
Маса випробувальних вантажів, т:	
Статичне випробування	6,25
Динамічне випробування	5,5
Установочні розміри кран-балки, візка, м:	
База візка	2

Продовження таблиці 1.1

Відстань між крайніми точками буферів у напрямку пересування кран-балки	3,314
Відстань по вертикалі від головки рейки до центру буфера кран-балки	0,065
Швидкість пересування, м/с (за наявності декількох швидкостей вказується min та max , а також діапазон регулювання):	
Кран-балка з вантажем на гаку	0,5
вантажного візка з вантажем максимальної маси	0,33
Місце керування:	
Під час роботи	з підлоги
Під час монтажу та випробувань	з підлоги
Спосіб керування (вказуються способи керування) :	
Механічний, електричний, гідравлічний, пневматичний, відповідно до конкретного механізму або групи механізмів	електричний
Спосіб підведення струму :	
До кран-баки	тролейний струмопідвід
До вантажного візка	кабельний
Маса кран-балки, т:	2,9
Маса основних складових частин кран-балки, т:	1,1 (міст)
	0,900(кінцеві балки)

Загальний вигляд кран-балки, вантажопідйомний тельфер 5т, а також струмопідвід у вигляді металевих кутників якими живиться кранове обладнання продемонстровано на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Кран-балка 5 тон

На рисунку 1.2 представлена схема електрообладнання мостової кран-балки. Зображено конструктивні елементи, основна металева балка, на якій закріплене обладнання та місця прокладки кабелів, опорні колони.

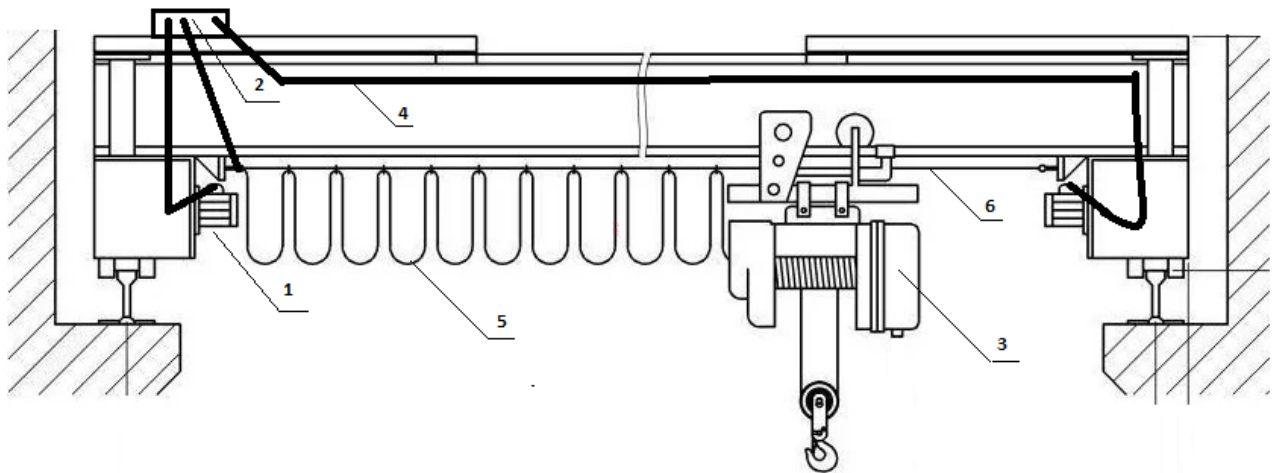


Рисунок 1.2 – Монтаж електрообладнання: 1- електродвигун; 2- електрошкафа управління; 3- таль електричний; 4 - кабель живлення двигунів (КГ-3х2,5 +1х1,5); 5- кабель живлення талі електричного (КГ-3х2,5+1х1,5); 6 – струна

У таблиці 1.2 наведені характеристики електродвигунів, встановлених на механізмах кранового обладнання головного підйому, переміщення мосту та вантажного візка.

Таблиці 1.2 – Технічні дані встановлених електродвигунів

Параметри	Механізм на якому встановлений двигун				
	підіймання		пресування		
	головного	допоміжного	візка	моста	
Тип і умовне позначення	КГ2412Д6		A1207-K6	Асинхронний з коротко замкнутим ротором AIP100L6Y2	
Рід струму	змінний	-	змінний	змінний	
Напруга, В	380	-	380	380	
Частота, Гц	50	-	50	50	
Номінальна потужність кВт	8,0	-	0,37	2,2	
Частота обертання	920	-	810	942	
Ном. Струм, А	24,5	-	1,6	5,5	

Живлення кран-балки здійснюється через тролєї рисунок 1.3, це система електропостачання, що складається з провідників (тролеїв), по яких ковзають струмознімачі (башмаки), встановлені на рухомому об'єкті (в даному випадку, на кран-балці). Тролеї зазвичай монтуються вздовж шляху переміщення об'єкта та забезпечують безперервне живлення електричним струмом по всій довжині робочої зони, також по краях передбачено ремонтні зони обладнані роз'єднувальними вимикачами для зручного обслуговування та ремонту.



Рисунок 1.3 – Системи тролейного живлення

На даний момент система керування електроприводом кран-балки є застарілою та має низку критичних недоліків. Основна проблема – використання релеjno-контакторної схеми управління, що зображена на рисунку 1.4.

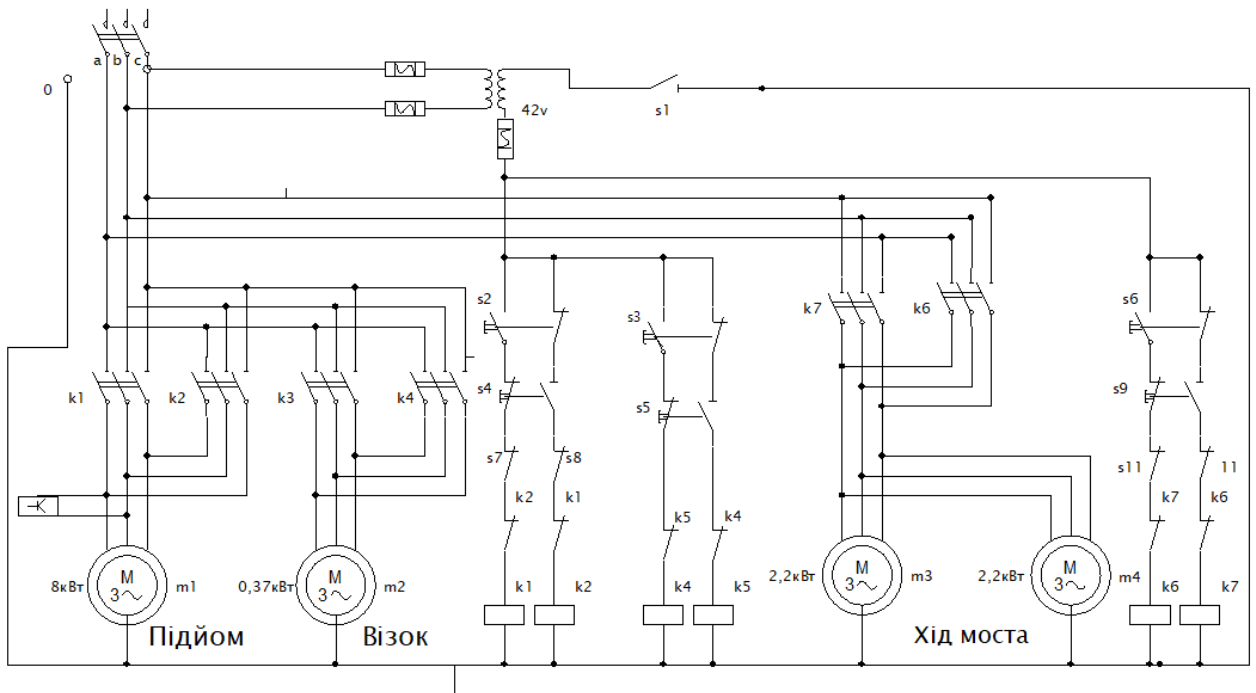


Рисунок 1.4 – Електрична схема (релейна) кран-балки



Перелік недоліків:


- обмежені можливості регулювання: не дозволяє регулювати швидкість руху механізмів, що призводить до різких ривків при запуску та зупинці;
- високий рівень зносу контактів: часті комутації приводять до підвищеного зносу контактів, особливо на потужних двигунах і частих включеннях, що знижує надійність системи і вимагає періодичної заміни елементів;
- великі динамічні навантаження: часті пуски, реверси (проти включення) та різкі зміни крутного моменту двигунів створюють значні динамічні навантаження на механізми, що, безумовно скорочує термін їхньої служби;
- великі енергетичні втрати: у момент запуску асинхронного двигуна, коли ротор ще не обертається, він поводить себе як трансформатор із замкненою вторинною обмоткою. Це призводить до різкого збільшення струму в обмотках статора, який називається пусковим струмом. Цей струм може в 4-5 разів перевищувати номінальний робочий струм двигуна, що призводить до перевантаження електромережі та підвищеного споживання електроенергії.

1.4 Аналіз проблемних питань

Проаналізувавши функціонування об'єкта під час виробничої практики, було ідентифіковано низку проблем. У критому складському приміщенні, де зберігається металопрокат, встановлено кран-балку 5т., що використовує одну колію з мостовим краном вантажопідйомністю 20 тонн. Склад розділений на дві функціональні зони: перша призначена для завантаження та розвантаження вантажних автомобілів, друга – для обслуговування дрібних клієнтів, обсяг замовлень яких варіюється від 20 до 400 кг на позицію, причому кількість таких позицій може бути значною.

Спостереження за роботою персоналу під час вантажно-розвантажувальних операцій з використанням кран-балки виявили суттєві недоліки. Зокрема, при ініціації руху мосту в горизонтальній площині (вправо або вліво) фіксуються різкі коливання крутного моменту та значні динамічні прискорення. Ці фактори спричиняють нерівномірний рух мосту кран-балки, що, в свою чергу, призводить до розгойдування вантажу, особливо вагою до 1 тонни. Внаслідок цього, для транспортування дрібних вантажів змушені використовувати 20-тонний мостовий кран.

З економічної точки зору, використання мостового крана з такою вантажопідйомністю для переміщення вантажів масою до 1000 кг є неефективним. По-перше, даний кран характеризується низькою швидкістю виконання операцій: комплектація замовлення з 5-10 позицій вагою 200-400 кг кожна займає 30-40 хвилин. По-друге, споживання електроенергії цим краном щонайменше в 3-4 разів перевищує аналогічний показник для кран-балки при виконанні тих же операцій.



Кваліфіковані оператори адаптувалися до особливостей функціонування кран-балки, застосовуючи метод багаторазового короткочасного натискання на кнопку керування ходом мосту. Цей метод дозволяє досягти номінальної швидкості руху з відносно невеликим розгойдуванням вантажу.

Однак, така практика експлуатації негативно впливає на термін служби електрообладнання кран-балки. Часті цикли пуску та зупинки електродвигуна, зумовлені багаторазовими натисканнями на кнопку, призводять до надмірного нагрівання обмоток та контактів. Це, в свою чергу, спричиняє прискорений знос не лише електричних, але й механічних компонентів, таких як редуктори та підшипники, що підвищує ризик їхнього передчасного виходу з ладу.

Внаслідок зазначених проблем, використання кран-балки обмежується випадками, коли мостовий кран зайнятий, перебуває на ремонті, або вантаж розташований безпосередньо в зоні її обслуговування.

Важливо враховувати, що кожен проект модернізації унікальний і вимагає індивідуального підходу. Ретельний аналіз проблем і розробка детального плану модернізації дозволять уникнути багатьох труднощів і забезпечити успішну реалізацію проекту. Модернізація автоматизованих систем управління кранів є складним процесом, який вимагає ретельного аналізу існуючої системи та потенційних проблем.


На сьогоднішній час ще досить багато кранів оснащені застарілим обладнанням, яке може бути несумісне з сучасними системами автоматизації. Це є одною із основних проблем, яка вимагає при модернізації заміни практично всього встановленого електрообладнання, та заміни на нове. Така модернізація може бути досить дорогою, особливо якщо вимагає заміни великої кількості обладнання.

Відсутність технічної документації або її неактуальність ускладнює розуміння принципу роботи існуючої системи та підбір необхідного обладнання для модернізації. Рішенням є проведення ретельного обстеження обладнання, створення технічної документації або відновлення втраченої.

1.5 Огляд існуючих рішень

Модернізація систем управління кранів є актуальним завданням для багатьох підприємств. Сучасний ринок пропонує широкий спектр рішень, які дозволяють підвищити ефективність, безпеку та точність роботи кранового обладнання в цілому. Основними напрямками модернізації є заміна застарілого обладнання, таких як електроприводи, датчики, релейні схеми керування, керуючі органи.


Програмовані логічні контролери (PLC) здатні забезпечити гнучку конфігурацію та управління всіма функціями крана, таких як автоматичне визначення ваги вантажу, оптимізація траєкторій руху крана, дистанційне



управління. Об'єднання АСУ крана з іншими системами управління виробництвом для забезпечення більш ефективної роботи всього підприємства.

Частотні перетворювачі забезпечують плавне регулювання швидкості обертання електродвигунів, що дозволяє підвищити точність позиціонування вантажу та зменшити знос обладнання.

Сучасні датчики під управлінням ПЛК здатні забезпечити високий рівень автоматизації та контролю в різних промислових процесах, включаючи управління кранами. Вони дозволяють отримувати детальну інформацію про стан обладнання, параметри процесу та навколишнє середовище, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень. Точне вимірювання фізичних величин таких як температура, вібрація, сила струму, напруга, положення, швидкість, кут нахилу, та багато інших параметрів можуть бути виміряні з високою точністю. Це дозволяє контролювати стан обладнання, виявляти потенційні проблеми та забезпечувати безпеку роботи.



2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

2.1 Постановка задач автоматизації

Постановка задач автоматизації є критичним етапом модернізації системи управління кран-балкою. Вона визначає напрямки розвитку системи та дозволяє створити чітку схему для реалізації проекту.

Метою проекту є комплексна автоматизація кран-балки. Ключовими завданнями автоматизації і оптимізація регулювання швидкості пересування ходом моста, підвищення точності позиціонування підвіски гаку з вантажем, коефіцієнта технічної готовності обладнання, реєстрація даних про напрацювання, збільшення швидкості та точності виконання операцій, а також мінімізація простоїв. Для реалізації поставленої мети необхідно застосувати сучасні методи та засоби автоматизації, ПЛК, ЧП, датчики.

На основі існуючих даних про параметри конструкції мостової кран-балки потрібно розробити її комп'ютерні моделі, що адекватно відображають її динамічні характеристики, та створити методику демпфування пружних коливань. Необхідно верифікувати вплив розробленого алгоритму керування на процес гасіння коливань вантажу. Для досягнення позначеної мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- 1) створити комп'ютерну модель мостової кран-балки;
- 2) розробити регулятор для гасіння пружних коливань конструкції та перевірити його ефективність на моделі;
- 3) досягти максимальної ефективності регулятора.

У нашій системі управління необхідно передбачити контроль наступних параметрів:

- відхилення вантажу на тросі у двох координатах;
- швидкість руху моста мостової кран-балки.

Для успішного здійснення поставленої задачі проектування необхідно правильно вибрати засоби автоматизації, виконавчі механізми та необхідні датчики. Ця система автоматизації, крім управління рухом крана, повинна мати систему компенсації відносних коливань вантажу на постійній довжині троса під час руху. Таке завдання може бути досягнуто розробкою математичної моделі системи та складання диференціальних рівнянь для гасіння коливань. Програма контролера повинна включати повний список вимог, описаних вище.

2.2 Розрахунок параметрів електродвигуна переміщення кран-балки

Для визначення корисної потужності (у кіловатах) приводу, тобто потужності на його виході, використовується наступна формула:

$$P_B = (m \cdot g \cdot \eta_{TK} + m \cdot g \cdot \sin \varphi) \cdot V_k = (7,9 \cdot 9,8 \cdot 8 \cdot 10^{-4} + 7,9 \cdot 9,8 \cdot \sin 1,5) \cdot 0,5 = 1,04 \text{кВт}, \quad (2.1)$$

Де $m = 2,9 + 5 = 7,9\text{т}$;

максимальна маса кран-балки з вантажем;

η_{TK} - Коефіцієнт тертя качення сталевого колеса по рейці 0,8Н/кН;

φ - максимальний кут можливого нахилу або прогину рейки;

V_k - Швидкість переміщення мосту кран-балки;

g – прискорення вільного падіння.

Тоді розрахункова потужність електродвигуна:

$$P_{дв} = \frac{P_B}{\eta_{заг}}, \quad (2.2)$$

де:

$$\eta_{заг} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$$

Тут η_1, η_2, η_3 - ККД окремих ланок кінематичного ланцюга, значення яких з урахуванням втрат у підшипниках можна вибирати з таблиць довідника [1].

Загальний ККД приводу для трьох ступінчастого зубчастого редуктора, що використовується:

$$\eta_{заг} = \eta_3 \eta_m \eta_m \eta_{оп} \quad (2.3)$$

де η_3 - ККД зубчастої передачі;

η_m - ККД з'єднувальної муфти;

η_m - ККД з'єднувальної муфти;

$\eta_{оп}$ - ККД опор редуктора.

З таблиці довідника: $\eta_3 = 0,973$; $\eta_m = 0,98$; $\eta_m = 0,98$; $\eta_{оп} = 0,994$;

Тоді загальний ККД:

$$\eta_{заг} = 0,973^3 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,994 = 0,84 \quad (2.4)$$

Визначимо розрахункову потужність електродвигуна:

$$P_{дв} = \frac{1,04}{0,84} = 1,23 \text{кВт}. \quad (2.5)$$

Тоді необхідну потужність електродвигуна з урахуванням тривалості включення ($PВ$) визначимо за формулою:

$$P_{TP} = P_P \sqrt{\frac{PВ_1}{PВ_{cm}}}, \quad (2.6)$$

де $PВ_1$ – фактична $PВ$ електродвигуна;

$PВ_{cm}$ – стандартне $PВ$.

Розрахуємо необхідну потужність електродвигуна:

$$P_{TP} = 1,23 \cdot \sqrt{\frac{50\%}{60\%}} = 1,12 \text{ кВт}. \quad (2.7)$$

З розрахунку електродвигуна відомо, що необхідно вибрати двигун з потужністю $P=1,12$ кВт.

Так як розрахунки показали що для даних умов підходить двигун потужністю 1,12 кВт, прийнято рішення залишити базовий двигун який встановлений на кран-балці потужністю 2,2 кВт з характеристиками:

- номінальна частота обертання 1000 об/с;
- максимально-допустима частота обертання 1300 об/с;
- номінальний струм (у режимі роботи S1) 5,6 А;
- вага 23 кг.

Двигуни з повітряним охолодженням це надійні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що не вимагають технічного обслуговування. Для примусової вентиляції на задній стороні двигуна встановлено осьовий вентилятор. Потік повітря стандартно спрямований від валу двигуна (AS) до задньої сторони двигуна (BS) для відведення втрат тепла від корпусу.

2.3 Визначення передавальні функції двигуна переміщення моста кран-балки

Для того, щоб змодельовати роботу моста кран-балки необхідно визначити передатну функцію асинхронного двигуна мосту.

Передавальна функція електричної частини асинхронного двигуна:

$$W_{ел}(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{Ls+R} \quad (2.8)$$

Де:

$I(s)$ – струм двигуна

$U(s)$ – напруга в обмотці двигуна

L – індуктивність обмотки двигуна

R – активний опір обмотки двигуна

Коефіцієнт жорсткості розраховується так:

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_H - \omega_0} = \frac{7,73}{142,3 - 104,7} = 0,2. \quad (2.9)$$

Номінальний момент двигуна розраховується так:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{1100}{142,3} = 7,73 \text{ Нм}; \quad (2.10)$$

Номінальна швидкість обертання двигуна розраховується так:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 1360}{30} = 142,3 \text{ с}^{-1}; \quad (2.11)$$

Синхронна частота обертання розраховується так:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ с}^{-1}; \quad (2.12)$$

Електромагнітна постійна двигуна розраховується так:

$$T_{\mathcal{E}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot s_{KP}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 2,11} = 0,56 \text{ с}; \quad (2.13)$$

Критичне ковзання АД розраховується так:

$$s_{KP} = s_H (\lambda_{KP} + \sqrt{\lambda_{KP}^2 - 1}) = 0,35 (3,1 + \sqrt{3,1^2 - 1}) = 2,11; \quad (2.14)$$

Номінальне ковзання АД розраховується так:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{142,3 - 104,7}{104,7} = 0,35 \text{ с}^{-1}; \quad (2.15)$$

Перевантажувальна здатність розраховується наступним чином:

$$\lambda_{KP} = \frac{M_{KP}}{M_H} = \frac{240}{77,3} = 3,1. \quad (2.16)$$

Передатна функція електричної частини двигуна зі знайденими коефіцієнтами має такий вигляд:

$$W_{эл}(s) = \frac{0,2}{0,56s+1}. \quad (2.17)$$

Передатна функція механічної частини двигуна має такий вигляд:

$$W_M(s) = \frac{1}{J_{\Sigma}s}. \quad (2.18)$$

Наведений момент інерції маси кран-балки до валу двигуна розраховуємо за наведеною кінетичною енергією:

$$J_{ГР} \frac{\omega_H^2}{2} = m_T \frac{v^2}{2}; \quad (2.19)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$J_{ГР} = m_T \frac{v^2}{\omega^2} = 16200 \frac{0,42^2}{142,3^2} = 0,14 \text{кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.20)$$

Сумарний момент інерції, наведений до валу двигуна:

$$J_{\Sigma} = J_D + J_{ГР} = 0,029 + 0,14 = 0,169 \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

Передатна функція механічної частини двигуна із знайденими коефіцієнтами:

$$W_M(s) = \frac{1}{0,169s}. \quad (2.22)$$

Постійна інтеграція $T_u = 3\tau$, де $\tau = 0,01$ с – некомпенсована стала часу ТП.

Електромеханічна постійна часу електроприводу

$$T_M = \frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_0 \cdot s_{KP}}{M_{KP}} = \frac{0,169 \cdot 142,3 \cdot 0,57}{240} = 0,057 \text{с}. \quad (2.23)$$

Передатна функція тиристорного перетворювача

$$W_{ТП} = \frac{K_{ТП}}{\tau_{ТП}s+1}. \quad (2.24)$$

Визначимо коефіцієнт тиристорного перетворювача

$$K_{ТП} = \frac{U_H}{u_{ЗСНОМ}} = \frac{380}{10} = 38. \quad (2.25)$$

Підставивши значення КТП передавальна функція тиристорного перетворювача матиме вигляд

$$W_{ТП} = \frac{38}{0,01s+1}. \quad (2.26)$$

Передатна функція автономного інвертора напруги каналом управління напругою

$$W_{ИН1}(s) = \frac{K_{ИН1}}{\tau_{ИН1}s+1}. \quad (2.27)$$

Визначимо коефіцієнт автономного інвертора напруги каналом управління напругою

$$K_{ИН1} = \frac{f_H}{U_H} = \frac{50}{380} = 0.132. \quad (2.28)$$

Підставивши коефіцієнти, передатна функція автономного інвертора напруги каналом управління напругою матиме вигляд

$$W_{ИН1}(s) = \frac{0.132}{0,01s+1}. \quad (2.29)$$

Коефіцієнт перетворення частоти напруги живлення з синхронну швидкість двигуна визначається за формулою:

$$K_{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{n}, \quad (2.30)$$

де n - Число пари полюсів двигуна;

$$K_{\omega} = \frac{2 \cdot \pi}{2} = 3,14. \quad (2.31)$$

2.3.1 Оптимізація контуру швидкості (синтез регулятора швидкості)

Передаточну функцію замкнутого першого контуру $W_{IЗС}$ знаходимо за відомими правилами знаходження передавальних функцій замкнутих

систем. Передатна функція замкнутого першого контуру $W_{IK.3}$:

$$W_{1K.3}(p) = \frac{W_{Ж.РА3.1}(p)}{1 + W_{Ж.РА3.1}(p) \cdot W_{ДТ}(p)} \quad (2.32)$$

Підставивши чисельні значення, отримаємо:

$$W_{IK.3}(p) = \frac{\frac{1}{T_{\mu} \cdot p (T_{\mu} \cdot p + 1)}}{1 + \frac{1}{T_{\mu} \cdot p (T_{\mu} \cdot p + 1)}} = \frac{1}{T_{\mu} \cdot p (T_{\mu} \cdot p + 1) + 1} \approx \frac{1}{T_{\mu} \cdot p + 1} \quad (2.33)$$

Синтез невідомої незмінної частини (регулятора швидкості) виробляємо відповідно до методики для контуру струму:

$$W_{Ж.РА3.2}(p) = W_{Р.РА3.2}(p) = W_{РС} \cdot (p) \cdot W_{IK.3}(p) \cdot W_M(p) \cdot W_{ДС}(p). \quad (2.34)$$

Звідки

$$W_{РС}(p) = \frac{W_{Ж.РА3.2}(p)}{W_{IK.3}(p) \cdot W_M(p) \cdot W_{ДС}(p)}, \quad (2.35)$$

Знаходимо бажану передатну функцію для аперіодичного процесу:

$$W_{РС}(p) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}, \quad (2.36)$$

де $k_{Д2}$ - коефіцієнт механічної частини двигуна:

$$W_M(s) = \frac{1}{0,169s}. \quad (2.37)$$

$k_{ДС}$ - Коефіцієнт передачі датчика струму, приймається $k_{ДС} = 1$;

T_{μ} - Мала некомпенсована постійна часу, $T_{\mu} = 0,01$ с-1;

Тоді

$$W_{РС}(p) = \frac{W_{Ж II РОЗ}(p)}{W_{1K3}(p) \cdot W_{Д2}(p) \cdot W_{ДС}(p)}; \quad (2.38)$$

$$W_{РС}(p) = \frac{1}{\frac{8 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (2T_{\mu} \cdot p + 1)}{1} \cdot \frac{1}{0,169p} \cdot 1} \approx \frac{0,169p}{8 \cdot 0,01 \cdot p} = 2,11. \quad (2.39)$$

Тобто передатна функція регулятора швидкості – коефіцієнт посилення $K_{pc} = 2,11$.

2.4 Визначення закону руху моста для гасіння коливань вантажу

Необхідний для гасіння коливань вантажу закон руху моста можна визначити на основі математичної моделі системи міст-вантаж. Це дозволить з високою точністю змодельювати реальну систему гасіння коливань вантажу моста кран-балки.

Як математичну модель використовують рівняння руху цієї системи. Розрахункова схема моделі міст-вантаж представлена рис. 2.1.

До складу схеми входить точка підвісу, що переміщається горизонтально за деяким законом $s(t)$, і з'єднаний з нею невагомою нерозтяжною ниткою вантаж масою m .

Коливання вантажу відбуваються під впливом стаціонарної потенційної сили (сили тяжіння). Система має один ступінь свободи, якому відповідає узагальнена координата φ - Кут відхилення вантажного каната від вертикалі.

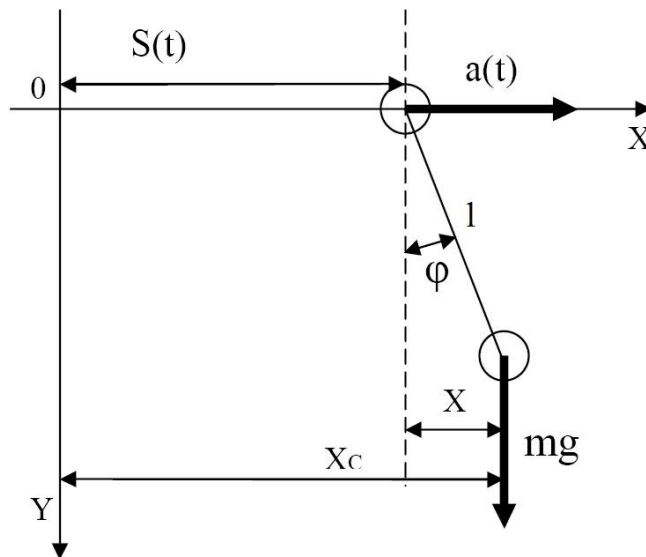


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема системи міст вантаж

Для виведення рівняння руху такої системи може бути використане рівняння Лагранжа, що має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.39)$$

де L – функція Лагранжа, що дорівнює різниці між кінетичною T і потенційною P енергіями системи.

Горизонтальна X_c та вертикальна Y_c координати вантажу визначаються викидами:

$$\begin{aligned} X_c &= s(t) + l \sin \varphi; \\ Y_c &= l \cos \varphi. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Рівняння для горизонтальної та вертикальної швидкостей вантажу мають вигляд:

$$\begin{aligned} X_c' &= s' + l\varphi' \cos \varphi; \\ Y_c' &= -l\varphi' \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Потенційна енергія дорівнює:

$$\Pi = -mgY_c = -mgl \cos \varphi. \quad (2.42)$$

Для кінетичної енергії, опускаючи нескладні перетворення, отримуємо:

$$T = \frac{m}{2}(X_c'^2 + Y_c'^2) = \frac{m}{2}(s'^2 + l^2\varphi'^2 + 2ls'\varphi' \cos \varphi). \quad (2.43)$$

Функція Лагранжа:

$$L = T - \Pi = \frac{m}{2}(s'^2 + l^2\varphi'^2 + 2ls'\varphi' \cos \varphi) + mgl \cos \varphi. \quad (2.44)$$

Приватна похідна L за узагальненою швидкістю φ' має вигляд:

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi'} = \frac{m}{2}(2ls' \cos \varphi + 2l^2\varphi') = ml^2\varphi' + mls' \cos \varphi. \quad (2.45)$$

Її похідна у часі:


$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \varphi'} = 2mll'\varphi' + mls'' \cos \varphi - mls'\varphi' \sin \varphi. \quad (2.46)$$

Похідна функції Лагранжа за узагальненою координатою φ

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = -mls'\varphi' \sin \varphi + mgl \sin \varphi. \quad (2.47)$$

Підставляючи знайдені вирази рівняння Лагранжа (1), після скорочення подібних отримуємо:

$$2mll'\varphi' + ml^2\varphi'' + mls'' \cos \varphi + mgl \sin \varphi = 0 \quad (2.48)$$



Звідки:

$$\varphi'' = -\frac{s''}{l} \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi. \quad (2.49)$$

В отриманому рівнянні, що описує рух точки підвісу та вантажу, використовується узагальнена координата φ . Однак часто при дослідженні руху кранових установок як узагальнену координату зручніше використовувати величину відхилення X вантажу від вертикалі, що проходить через точку підвісу. Запишемо рівняння Лагранжа, використовуючи узагальнену координату X . [15]

Координати X та φ пов'язані виразом:

$$\sin \varphi = \frac{X}{l}. \quad (2.50)$$

Про диференціювавши його двічі у часі, отримаємо:

$$\begin{aligned} \varphi' \cos \varphi &= \frac{X'}{l}; \\ \varphi'' \cos \varphi - \varphi'^2 \sin \varphi &= \frac{X''}{l}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Підставимо виведені рівняння, похідні φ' і φ'' у вираз (2.11), отримаємо рівняння Лагранжа у вигляді:

$$\varphi'' = \frac{X''}{l \cos \varphi} + \frac{X'^2 \sin \varphi}{l^2 \cos^2 \varphi} = \frac{-S'' \cos \varphi}{l} - \frac{g X}{l l}. \quad (2.52)$$

Виразивши, використовуючи виведені рівняння, похідні φ' і φ'' через нову узагальнену координату X і її похідні і підставивши ці вирази (2.11), отримаємо рівняння Лагранжа у вигляді:

$$\frac{X''}{\cos \varphi} = -S'' \cos \varphi - \frac{g}{l} X - \frac{X'^2}{l \cos^2 \varphi} \frac{X}{l}. \quad (2.53)$$

Оскільки малі доданки є незначними, ми можемо їх опустити та враховуючи, що

$$\cos \varphi \approx 1, \sin \varphi \approx \varphi$$

отримаємо:

$$\varphi'' = -\frac{s''}{l} - \frac{g}{l} \varphi. \quad (2.54)$$

2.5 Моделювання електроприводу ходу моста.

Використовуючи передавальні функції двигуна пересування моста кран-балки, отримані раніше, розробимо модель регульованого електроприводу. Оскільки розробка системи гасіння коливань вантажу мостового крана передбачає регулювання швидкості залежно від кута відхилення вантажу, розробимо модель регульованого електроприводу, щоб надалі показати залежності кута відхилення вантажу кран-балки від швидкості пересування мосту. Для моделювання буде використано програмне середовище Matlab Simulink.

Модель регульованого електроприводу, розроблена в середовищі моделювання Matlab Simulink, представлена на рис. 2.2.

Графік перехідного процесу, що відображає зміну швидкості та моменту у часі, представлений на рис. 2.3. На даному графіку представлений розгін та гальмування двигуна.

Графік перехідного процесу за швидкістю можна вважати задовільним.

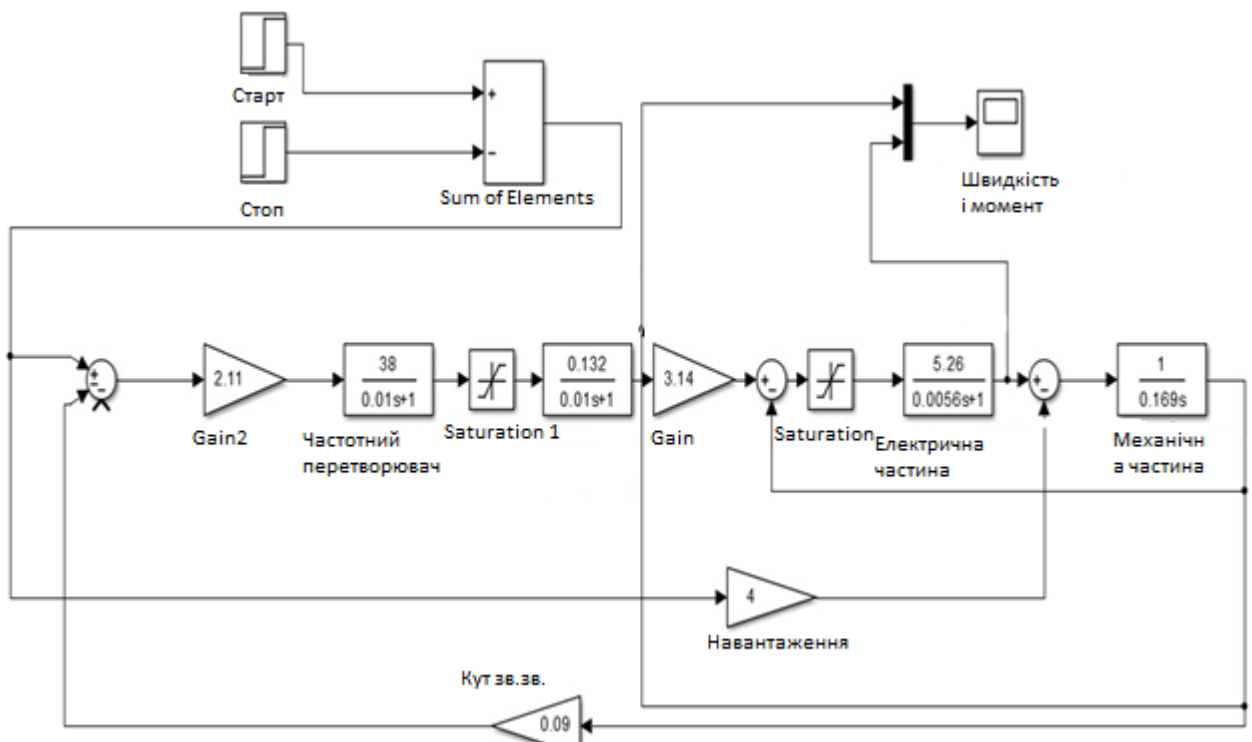


Рисунок 2.2 – Модель регульованого електроприводу

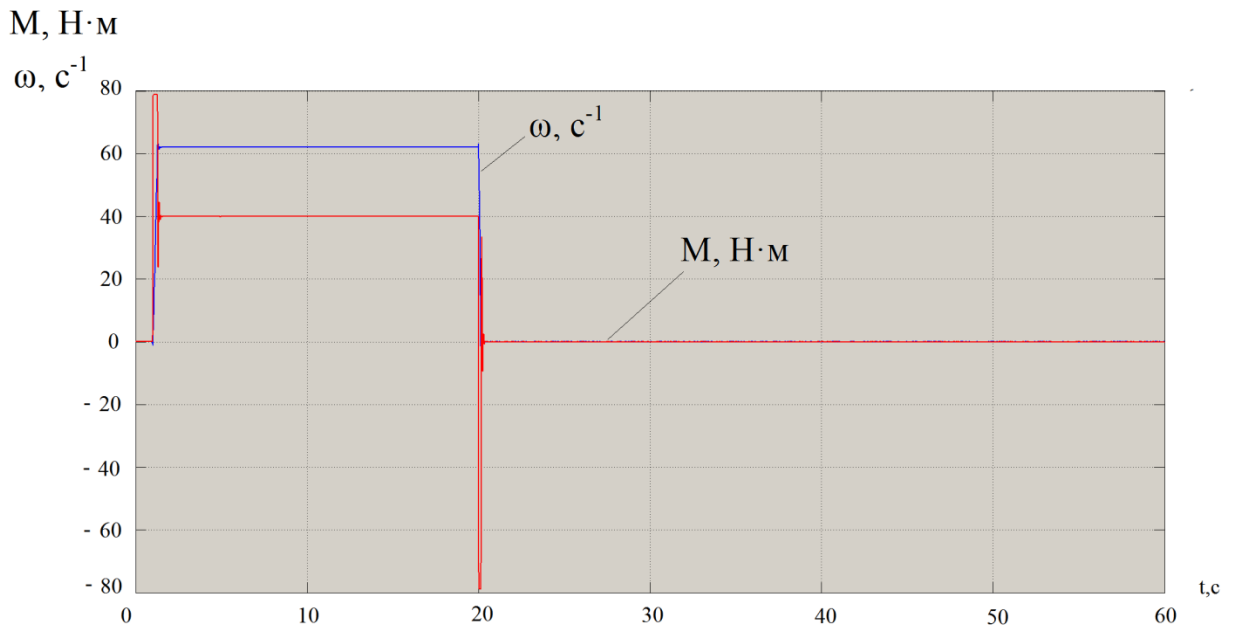


Рисунок 2.3 – Графік перехідного процесу, що відображає зміну швидкості мосту кран

2.6 Розробка системи управління мостом кран-балки

У попередніх розділах вантаж кран-балки був представлений і розрахований як математичний маятник. Для гасіння коливань вантажу мостової кран-балки буде розроблено систему, яка буде стримувати ці коливання. Вона буде заснована на моделі математичного маятника із введенням зворотного зв'язку по кутку відхилення вантажу. Залежно від кута відхилення вантажу повинна змінюватися швидкість руху моста кран-балки.

Очікується, що при відхиленні вантажу система повинна виміряти кут цього відхилення і дати сигнал про гальмування або розгін в напрямку коливання, тим самим зменшувати його.

Модель математичного маятника, без зворотного зв'язку по куту відхилення вантажу, розроблена в середовищі моделювання Matlab Simulink представлена на рис. 2.4.

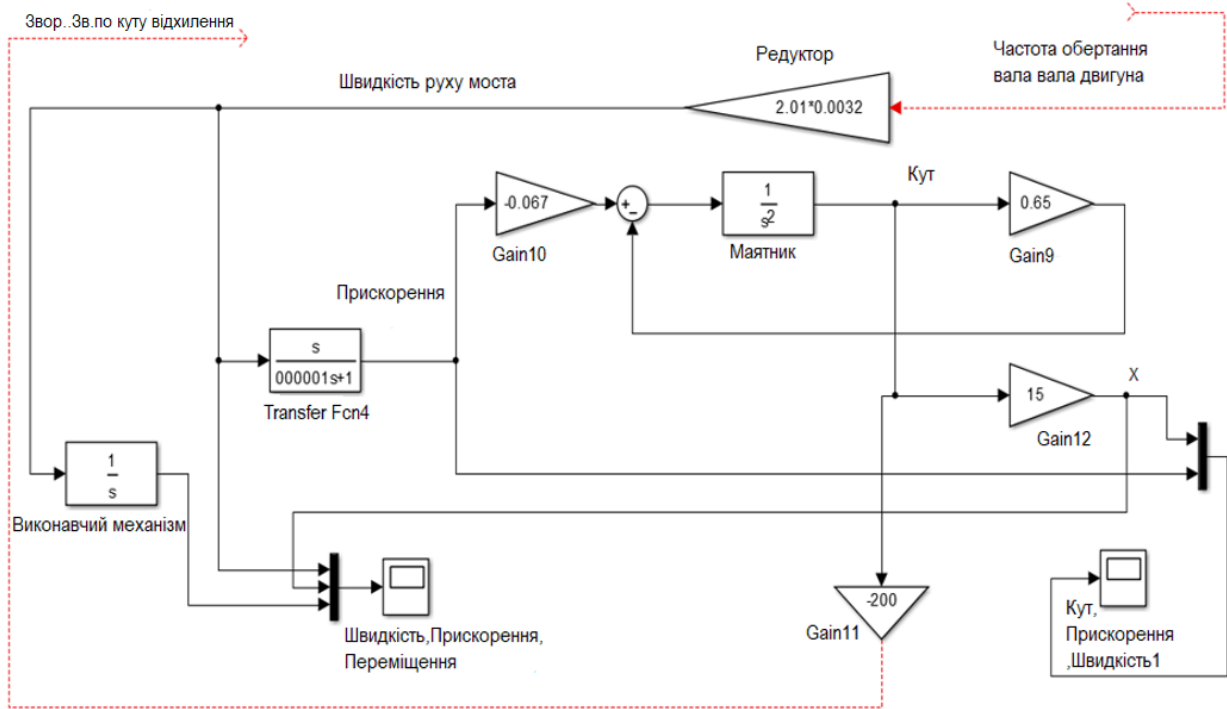


Рисунок 2.4 – Модель математичного маятника

Для гасіння коливань вантажу необхідно ввести зворотний зв'язок по кутку відхилення вантажу мосту кран-балки.

Модель системи управління електродвигуном ходу моста та математичного маятника, із зворотним зв'язком по кутку відхилення вантажу, розроблена в середовищі моделювання Matlab Simulink представлена на рис. 2.5.

Дана система повинна працювати спільно з електроприводом і повідомляти про поточні зміни в координатах вантажу моста кран-балки.

На рис. 2.6 представлений графік перехідного процесу, на якому видно зміну швидкості руху мосту та кута відхилення вантажу кран-балки. Як видно з графіка, коливання вантажу не стихають і не задовольняють наші вимоги. Це означає необхідність введення зворотного зв'язку з кута відхилення вантажу мосту кран-балки.

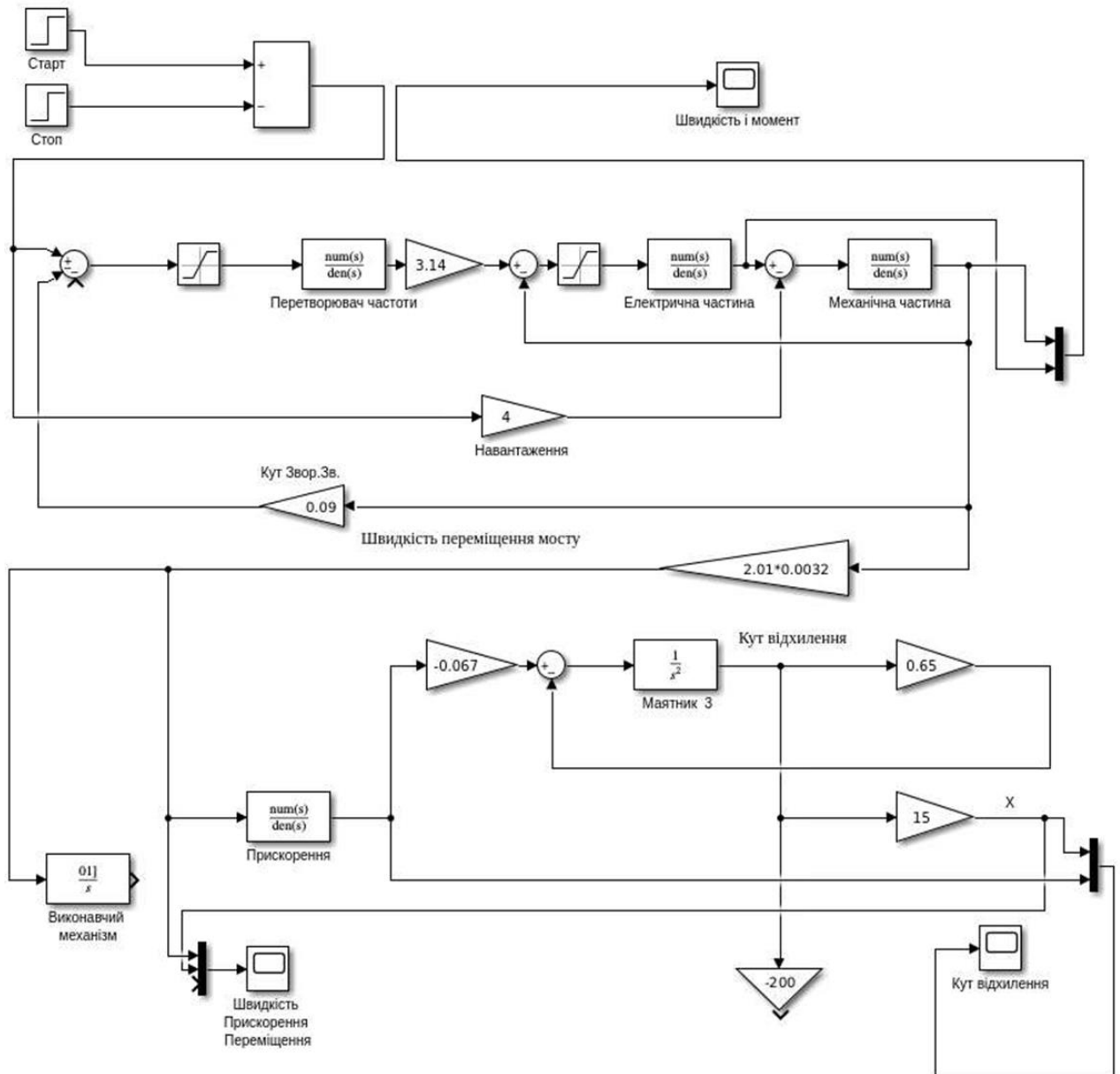


Рисунок 2.5 – Модель системи управління електродвигуном моста та математичного маятника

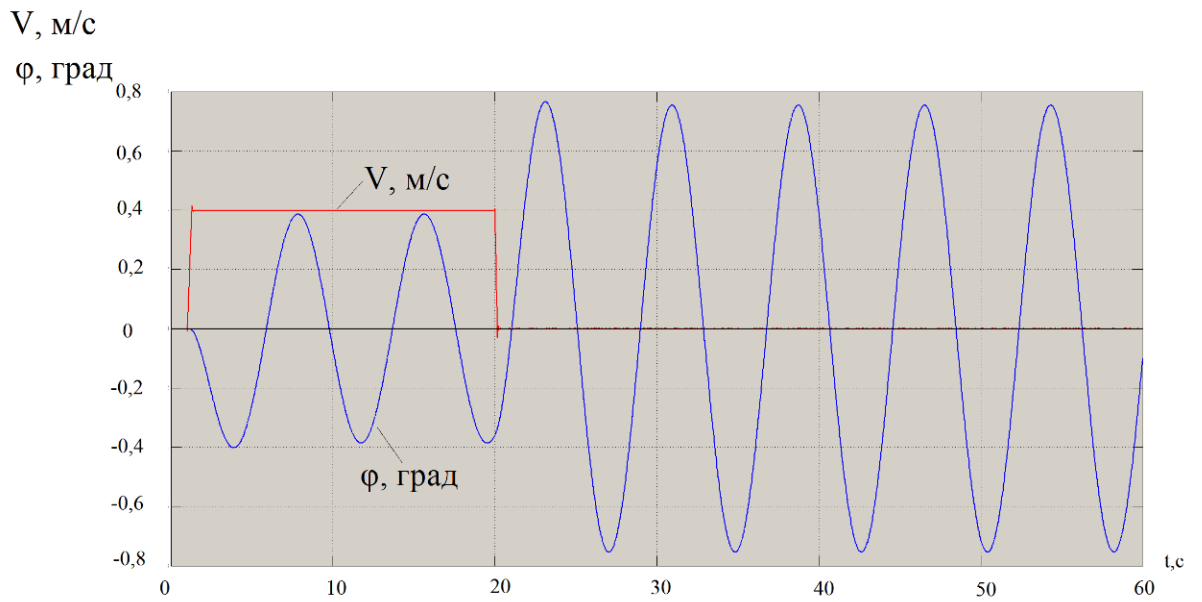


Рисунок 2.6 – Графік перехідного процесу системи без зворотного зв'язку за кутом відхилення вантажу кран-балки

Модель системи управління електродвигуном ходу моста та математичного маятника, із зворотним зв'язком по кутку відхилення вантажу, розроблена в середовищі моделювання Matlab Simulink представлена на рис. 2.7 .

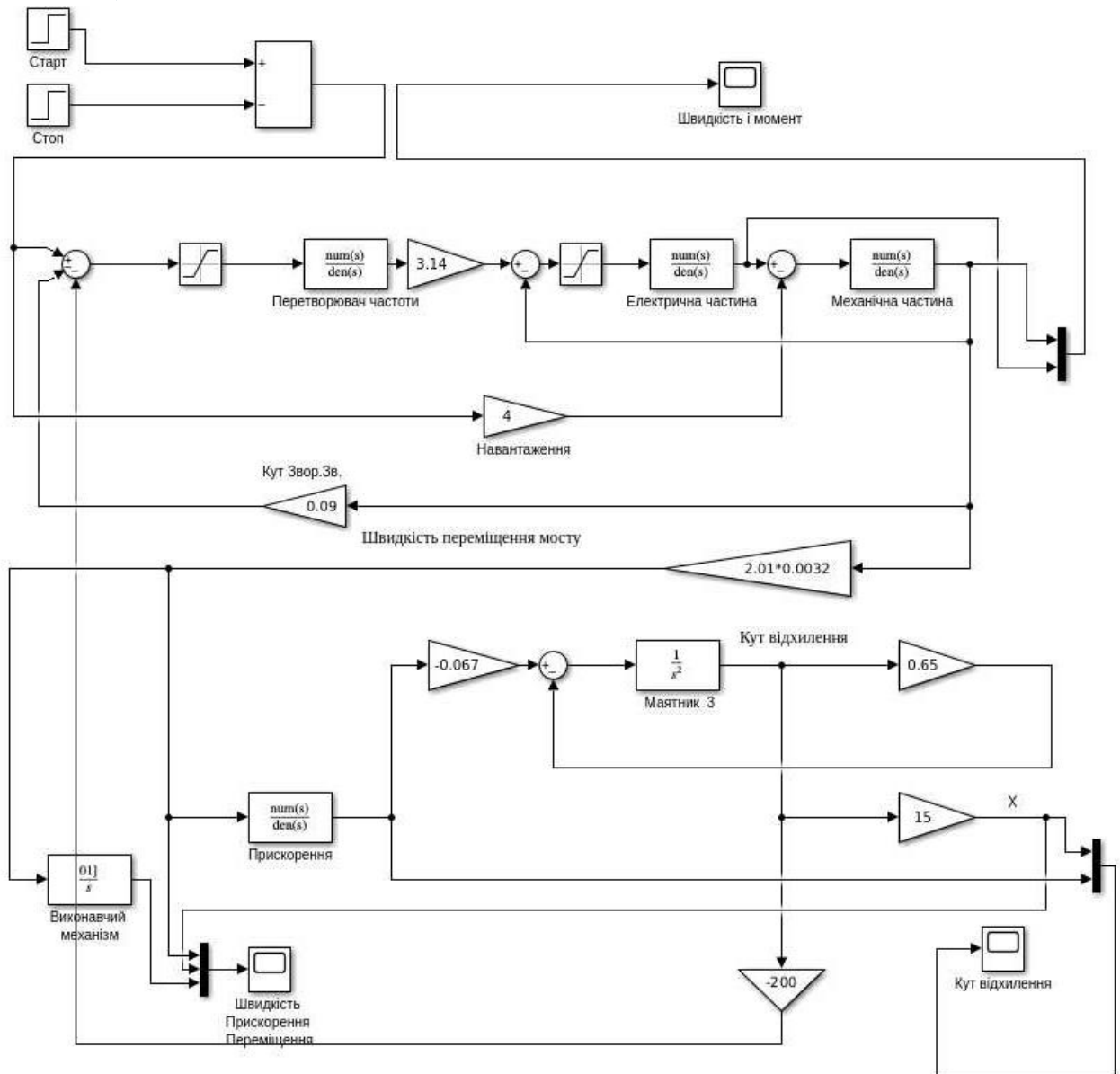


Рисунок 2.7 – Модель системи керування електродвигуном моста та математичного маятника із введеним зворотним зв'язком по куту відхилення вантажу мостової кран-балки

На рис. 2.8 представлений графік перехідного процесу, на якому видно зміну швидкості руху моста та кута відхилення вантажу кран-балки. Як видно з графіка, коливання вантажу швидко гасяться системою і графік перехідного процесу є задовільним.

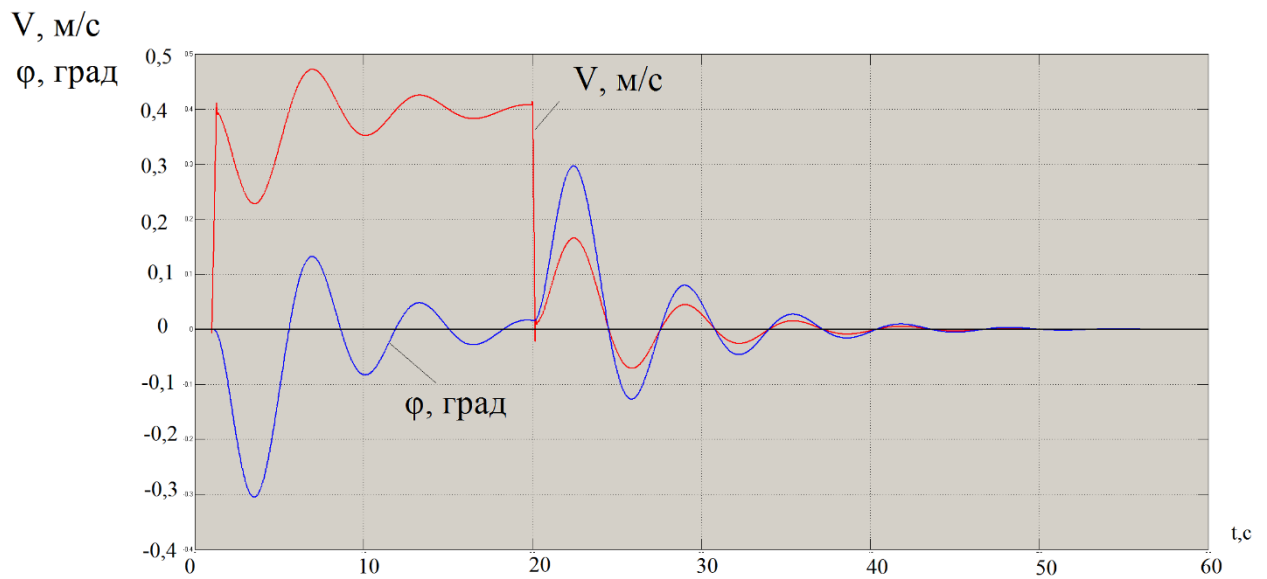


Рисунок 2.8 – Графік перехідного процесу системи із введеним зворотним зв'язком по кутку відхилення вантажу.

Таким чином, була розроблена система гасіння коливань вантажу моста кран-балки, яка ефективно перешкоджає розгойдуванню вантажу.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації

Вибір контролера для кран-балки є критичним рішенням, яке безпосередньо впливає на ефективність, безпеку та надійність роботи обладнання. Оптимальний вибір залежить від багатьох факторів, таких як вантажопідйомність, точність позиціонування, необхідні функції автоматизації, а також бюджет проекту. Проаналізувавши складність проекту було обрано програмований логічний контролер фірми Siemens який зображено на рисунку 3.1 S7-1200, 6ES7212-1AE40-0XB0 1212C це достатньо сучасний і не дорогий ПЛК який підходить для завдань автоматизації малого та середніх рівнів. Спеціально розроблені для роботи в промислових умовах, стійкі до перепадів напруги та інших зовнішніх впливів. Можуть бути розширені за рахунок додаткових модулів введення-виведення для підключення різних датчиків і виконавчих механізмів. Підтримують різноманітні протоколи зв'язку, що дозволяє інтегрувати їх в різні системи автоматизації. Сучасні ПЛК мають інтуїтивно зрозумілі середовища програмування, що полегшує процес розробки програмного забезпечення. Підтримує Ethernet/PROFINET, PROFIBUS, PtP (Point-to-Point) зв'язок. Характеристики наведені в таблиці 3.1 а загальний вигляд контролера зображено на рисунку 3.1.

Таблиці 3.1 –Стислі характеристики програмованого контролера

Характеристика	Значення
Напруга живлення	24 В DC
Кількість дискретних входів	8 (24 В DC)
Кількість дискретних виходів	6 (24 В DC) або релейні
Кількість аналогових входів	2 (0-10 В) DC
Пам'ять програм/даних	100 Кбайт
Швидкість процесора	Залежить від модифікації
Температурний діапазон	0...+50 °C
Комунікаційні інтерфейси	PROFINET, Ethernet, PtP, PROFIBUS
Можливості розширення	Додаткові модулі вводу-виводу, комунікаційні модулі
Живлення	постійний струм 20,4-28,8 В DC



Рисунок 3.1 – Контролер SIMATIC S7-1200 від компанії Siemens [13]

Частотний перетворювач було обрано фірми Siemens, це один з провідних світових виробників промислового обладнання. Компанія має багаторічний досвід у виробництві частотних перетворювачів, що гарантує високу якість та надійність продукції. Siemens SINAMICS G120P - це популярний модульний частотний перетворювач, який широко використовується в промисловості для регулювання швидкості електродвигунів змінного струму. Модель 6SL3210-1NE15-8UL0 має потужність 2,2 кВт і є універсальним рішенням для багатьох застосувань.

Стислі характеристики частотного перетворювача Siemens SINAMICS G120P наведені в таблиці 3.2, зовнішній вигляд представлений на рисунку 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики частотного перетворювача Siemens SINAMICS G120P

Характеристика	Значення
Номінальна потужність	2,2 кВт
Напруга живлення	380-480 В
Частота мережі	50/60 Гц
Тип охолодження	Вбудована
Ступінь захисту	IP20
Інтерфейси	PROFINET, Ethernet, RS485
Функції	Векторне управління, скалярне управління, позиціонування, захист від перевантажень, фільтрація гармонік

Продовження таблиці 3.2

Характеристика	Значення
Габарити	Залежать від модифікації
Вага	Залежить від модифікації
Робоча температура	0...+50 °С



Рисунок 3.2 – Частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120P
6SL3210-1NE15-8UL0 2,2 кВт

Засобами контролю технологічними параметрами кран-балки будуть слугувати наступні датчики.

Кінцеві вимикачі: Кінцеві вимикачі Siemens 3RG4142-6AD00 електронного типу є сучасними пристроями, призначеними для виявлення граничних положень рухомих елементів в автоматизованих системах. Вони відрізняються від традиційних механічних кінцевих вимикачів більш високою точністю, надійністю та різноманітністю функцій. Електронні кінцеві вимикачі використовують різноманітні фізичні принципи для виявлення об'єктів, наприклад індуктивні створюють магнітне поле, яке змінюється при наближенні металевого об'єкта. На рисунку 3.3 показано основні місця де встановлюють такі датчики. На рисунку 3.4 показаний індуктивний датчик.

Таблиця 3.3 – Характеристики індуктивного датчика Siemens 3RG4142-6AD00

Параметр	Значення
Робочий діапазон напруги (постійний струм)	10...65 В
Кількість проводів	3
Виконання	Кубічний 60 мм × 80 мм
Установка	Не врівень з поверхнею
Розрахована відстань спрацювання S_n	50 мм
Матеріал корпусу	Пресований матеріал
Робоча напруга (постійний струм)	10...65 В
Струм споживання (без навантаження) I_0	20 мА
Навантажувальна здатність I_e	300 мА
Частота комутації f	20 Гц
Точність відтворення R	1,5 мм
Затримка готовності t_v	100 мс
Комутаційний стан	(жовтий світлодіод),
Робочий стан	(зелений світлодіод)
Захист	Від помилкових імпульсів при вмиканні, короткого замикання/перевантаження, зміна полярності, обриву проводу, індуктивних впливів, радіоперешкод
Ступінь захисту	IP65



Рисунок 3.3 – Розміщення кінцевих вимикачів



Рисунок 3.4 – Індуктивний датчик Siemens

Перелік датчиків:

–датчики температури: дозволяють точно вимірювати температуру різних середовищ та об'єктів, забезпечуючи ефективну роботу та безпеку численних пристроїв таких як двигуни. Контроль температури дозволяє запобігати перегріву обладнання, пожежам та іншим аварійним ситуаціям.

–датчики швидкості, або енкодери, є невід'ємною частиною сучасних систем автоматизації. Вони перетворюють механічний рух в електричні сигнали, дозволяючи точно вимірювати швидкість, положення та напрямок руху різних механізмів. Ця інформація використовується для керування роботою двигунів, конвеєрів, роботів та інших пристроїв.

–датчик кута нахилу (інклінометр) INC 210– це датчик, призначений для вимірювання кута нахилу різних статичних (будівельні об'єкти та конструкції, великі механізми) та, до певної міри, динамічних об'єктів (підйомні крани, самоскиди, екскаватори, кар'єрний транспорт), відносно гравітаційного поля Землі. В основі датчика кута нахилу використовується 1-осьовий акселерометричний сенсор, який дозволяє в гравітаційному полі Землі визначати кути нахилу. Аналоговий вихід: 0-10 VDC, 4-20 mA. Даний датчик можна використовувати для зменшення коливань вантажу при переміщенні. Характеристики зведені в таблицю 5. Загальний вигляд датчика на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Датчик кута нахилу (інклінометр) INC 210

Таблиця 3.4 –Характеристики датчика кута нахилу INC 210

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання
Матеріал корпусу	Алюміній, покритий чорним нікелем	-
Живлення датчика	12...30 В	В (Вольти)
Кількість осей	1	-

Продовження таблиці 3.4

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання
Відносна вологість	10...90 %	%
Повідомлення про помилки (CANopen)	Heartbeat, Екстрене повідомлення	-
Частота відповіді (CANopen)	100 Гц	Гц
Діапазон робочих температур	-30°C ... +70 °C	°C
Ступінь захисту	IP67	-
Ідентифікатор вузла (CANopen)	За замовчуванням: 1. Може бути організовано LSS і SDO між 1 і 127	-
Аналоговий вихід:	0-10 VDC, 4-20 mA	
Протокол зв'язку (CANopen)	CiA 301	-
Режими PDO (CANopen)	Спрацьовування типу подія/час, Синхр./Асинхр.	-
SDO (CANopen)	1 сервер	-
Дозвіл (CANopen)	23 біт	біт
PDO (CANopen)	1 Tx PDO	-
Швидкість передачі (CANopen)	10 кбіт/с, 20 кбіт/с, 50 кбіт/с, 100 кбіт/с, 125 кбіт/с, 250 кбіт/с, 500 кбіт/с, 800 кбіт/с, 1 Мбіт/с	кбіт/с
Тип (CANopen)	CANopen, CiA DS410	-
Вимірювана величина	Кут	градуси

Для підключення пристроїв які працюють по протоколу CANopen до контролера SIMATIC S7-1200 використовують спеціальні комунікаційні модулі CM CANopen. Ці модулі встановлюються в слоти розширення контролера і забезпечують інтерфейс для підключення мережі CANopen. Висока швидкість передачі даних забезпечує швидку реакцію системи на зміни зовнішніх умов. Протокол забезпечує високу надійність передачі даних, навіть в умовах промислових перешкод. Платформа TIA Portal

надає зручні інструменти для конфігурування мережі CANopen і програмування ПЛК. Загальний вигляд модуля зображено на рисунку 3.6



Рисунок 3.6 – Модуль CM CANopen 6ES7241-1CH32-0XB0 від siemens

3.2 Розробка алгоритмічного забезпечення системи управління

Блок-схема алгоритму роботи кран-балки наведена на рис. 3.7.

Після включення живлення відбувається апаратне скидання контролеру керування. Стан регістрів після скидання переводиться в початковий стан. Загальмовуються гальмівні муфти, вимикаються всі реле й пускачі. Гаснуть всі сигнальні світлодіоди, крім HL1 «Живлення подано». Напруга завдання встановлюється $U_{зд.} = 0 \text{ V}$ для всіх трьох ЦАП.

Перевіряється положення робочих органів кран-балки. Якщо спрацювали датчики точної зупинки по X, Y і датчик середнього положення захоплення, то включається автоматичний режим і система управління готова до прийому завдання.

Якщо положення робочих органів невідомо, то включається ручний режим і оператор з керуючого пульта виводить захоплення в середнє положення. Після цього в автоматичному режимі кран переміщається на настановної швидкості до найближчих адресних штифтів по X і Y. Після досягнення датчиків точного зупинки по X, Y і W система включає автоматичний режим і готова до прийому завдання від контролеру верхнього рівня.

Після отримання команди, приводи осей X та Y активуються синхронно, забезпечуючи переміщення кран-балки до заданої точки координат. Потім включається рух мосту в лівий або правий бік, і підйом або опускання вантажу. Захоплення повертається в середнє положення.

Якщо необхідно було взяти вантаж з позиції, то задаються нові координати і кран повертається в позицію завантаження і переміщує вантаж на позицію.

Якщо необхідно було покласти вантаж, то кран після виконання завдання залишається в тому ж положенні.

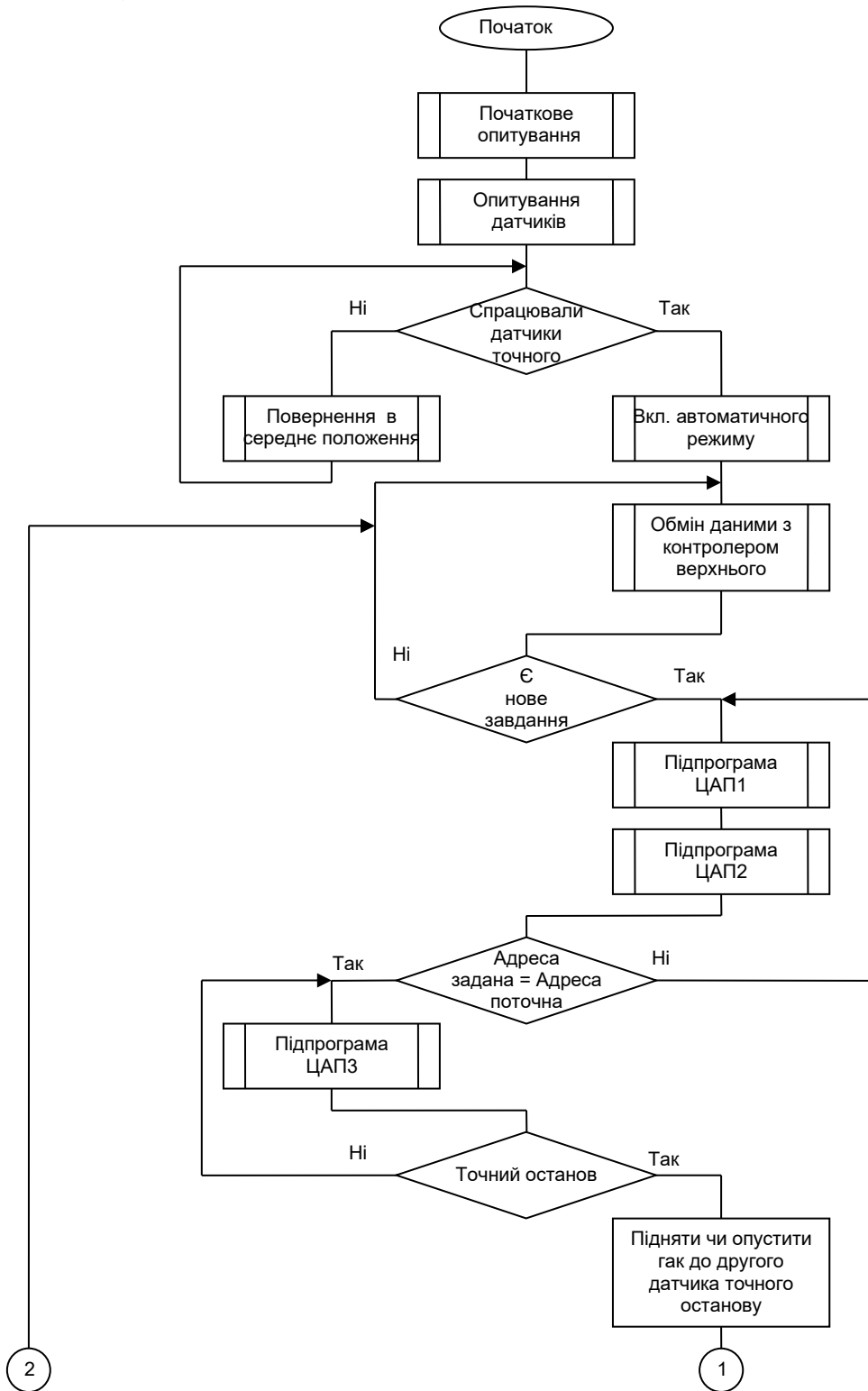


Рисунок 3.7 - Блок-схема алгоритму роботи кран-балки

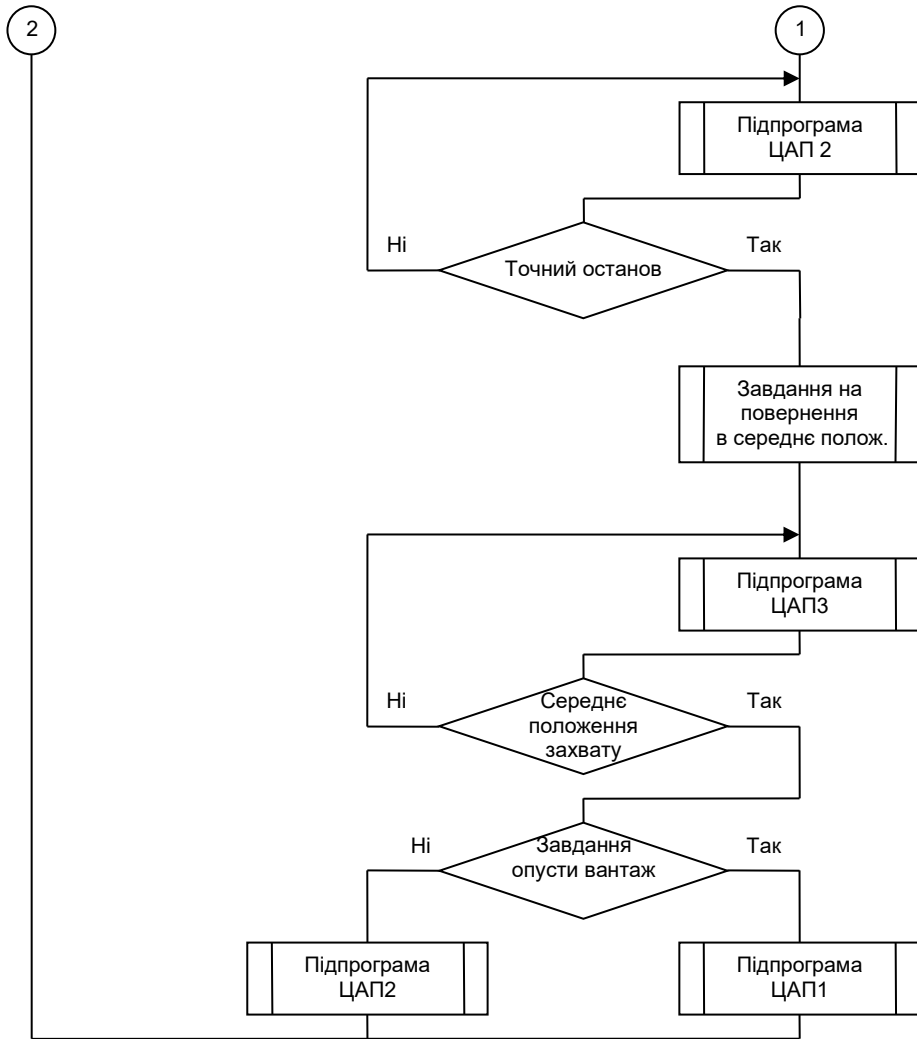


Рисунок 3.7 - Продовження

Блок-схема алгоритму програми для ЦАП 2 представлена на рис 3.8.

Тут перевіряється стан крана по осі Y. При збігу номера заданого і поточного вибирається верхній або нижній датчик точного зупинки в залежності від завдання (покласти або взяти вантаж відповідно).

Встановлюється швидкість дотягування $U_{зд.} = 0,05V$ до спрацьовування датчика точної зупинки. При розбіжності поточних і заданого адреси вибирається відповідний знак завдання.

При різниці між заданим і поточним положеннями більше 1 встановлюється швидкість швидкого ходу ($U_{зд.} = 10 V$). За одну клітинку до заданого положення швидкість знижується до настановної ($V = 2,5 м / хв$), при якій $U_{зд.} = 0,5 V$.

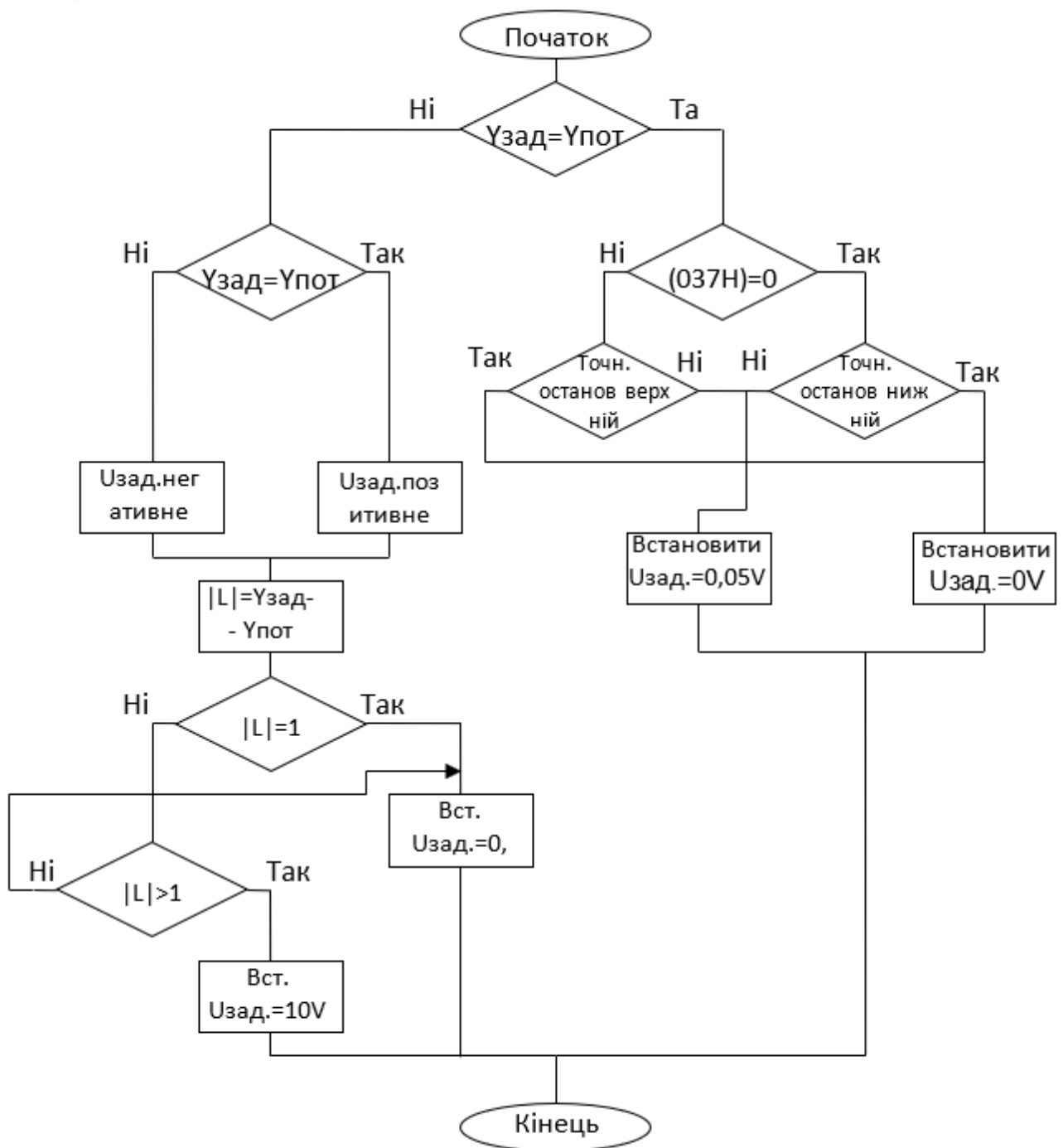


Рисунок 3.8 - Блок-схема алгоритму програми для ЦАП 2

Блок-схема алгоритму програми для ЦАП 1 представлена на рисунку 3.9.

Тут перевіряється стан крана по осі X. Якщо кран знаходиться в заданій координаті $X_{зад.} = X_{пот.}$ і спрацював датчик точного зупинки по X, то $Узад.$ встановлюється в 0. Балка зупиняється у заданому осередку.

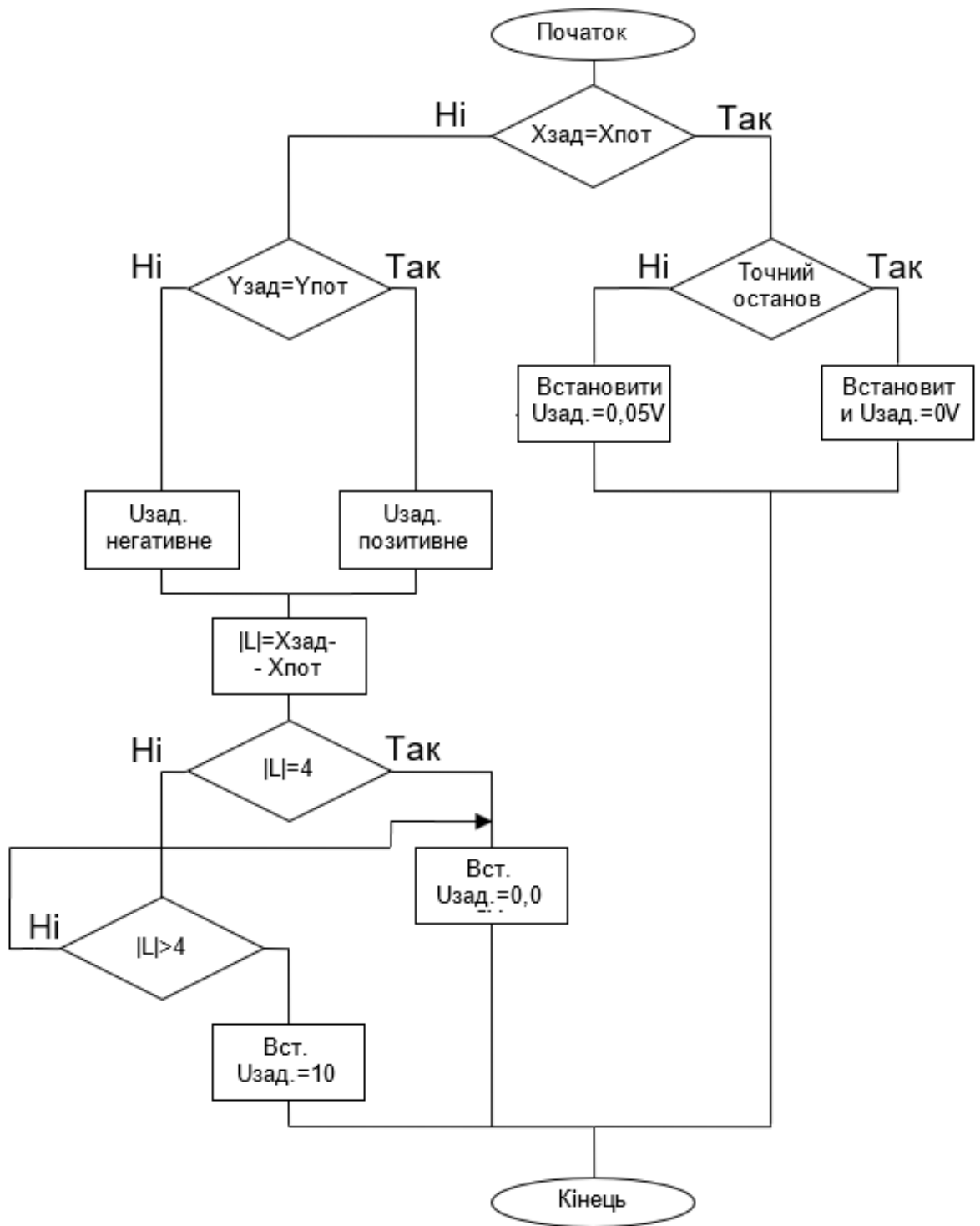


Рисунок 3.9 - Блок-схема алгоритму програми для ЦАП 1

Блок-схема алгоритму програми ЦАП 3 представлена на рис. 3.10

У початковому стані захоплення крана знаходиться в середньому положенні, тому робота підпрограми починається з лівої гілки алгоритму. Права гілка алгоритму виконується при поверненні захоплення в середнє положення. Знак завдання для ЦАП в цьому випадку інверсує в останньому операторі лівої ланки алгоритму.

При спрацьовуванні датчика швидкості з швидкого ходу 12,5 м / хв. зменшується до настановної швидкості 0,6 м / хв. ($U_{зад} = 0,5V$).

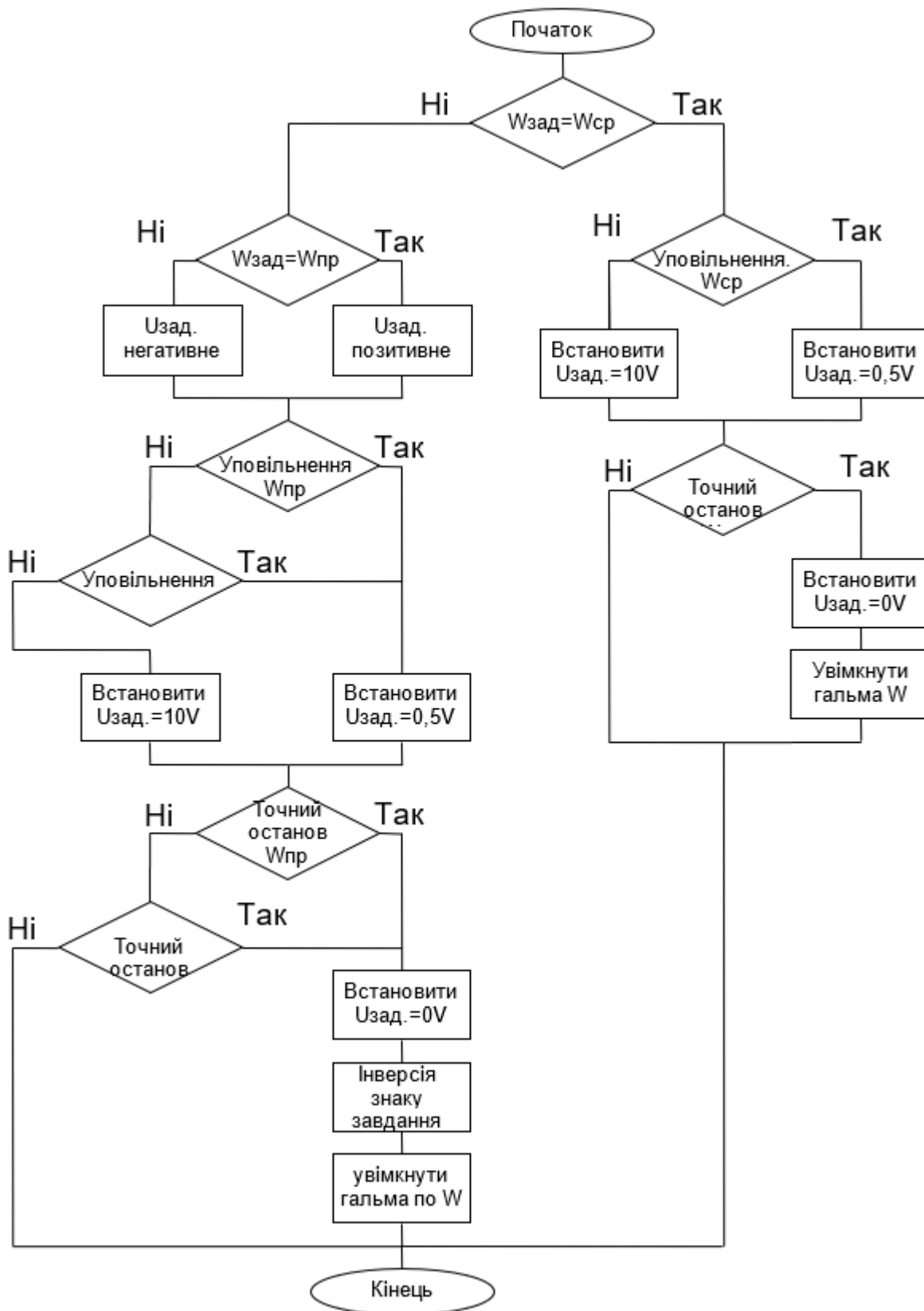



Рисунок 3.10 - Блок-схема алгоритму програми для ЦАП 3



При отриманні завдання на переміщення величина завдання встановлюється рівною 10В до моменту спрацьовування датчика уповільнення перед точкою призначення. На цій швидкості захоплення рухається до спрацьовування відповідного датчика точного зупинки. При цьому Узад встановлюється рівним нулю, і накладається гальмо.

Блок-схема алгоритму для зчитування показники датчиків представлена на рис. 3.11.

Підпрограма зчитує інформацію з буферних регістрів, які адресуються як осередки зовнішнього ОЗУ даних. На входи регістрів підключені датчики положення по X, Y, W і датчики точного зупинки по X, Y, W.

Блок-схема алгоритму підпрограми UZ1 представлена на рис. 3.12.

кожній обробці переривання від Т / С 0 код завдання збільшується або зменшується на 1, якщо потрібно. Поточний код завдання зберігається в регістрах R2 і R3 і потім передається в пристрій виведення ЦАП 1. Якщо поточний стан по X збігається з заданим і завдання на привід = 0, то включається гальмівна муфта горизонтального переміщення.

Система управління крана забезпечує два режими роботи: режим напівавтоматичний і режим ручного управління.

У режимі ручного керування швидкість відповідає максимальній для даного приводу.

У режимі дистанційного керування система обмежує максимальну швидкість руху ходу до величини 0,3 м/с. Цей режим необхідний проведення робіт у важкодоступних місцях видимості. При нормальному стані захисту та блокування на вхід програмованого логічного контролера (ПЛК) подається інформаційний сигнал, який повідомляє про обраний режим роботи.

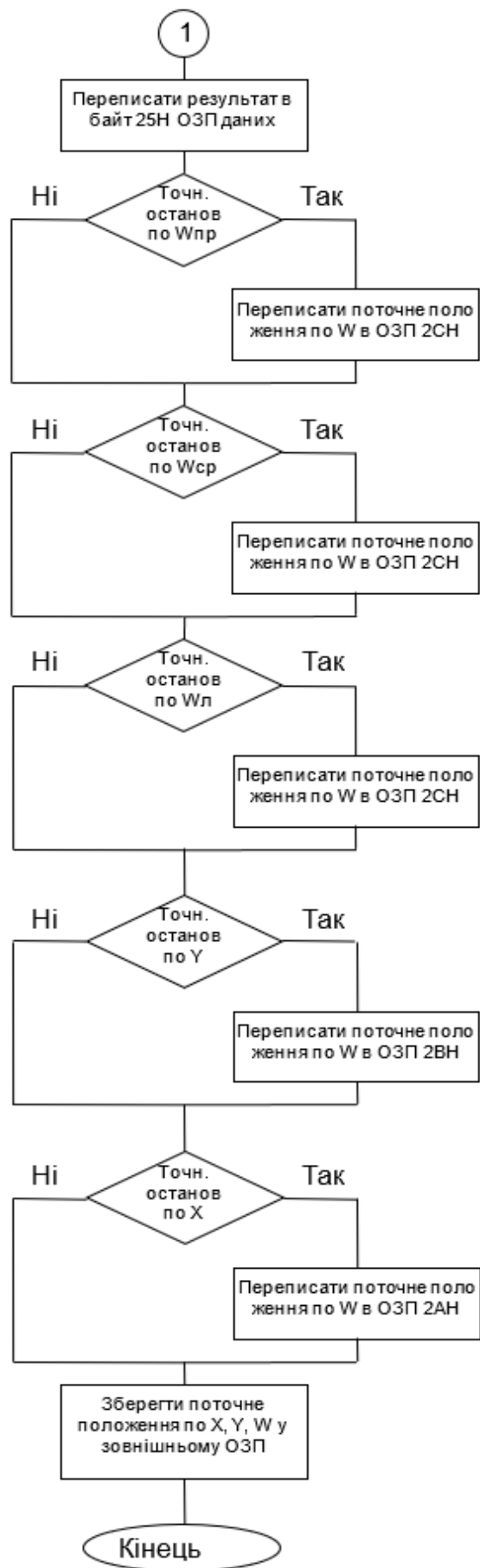
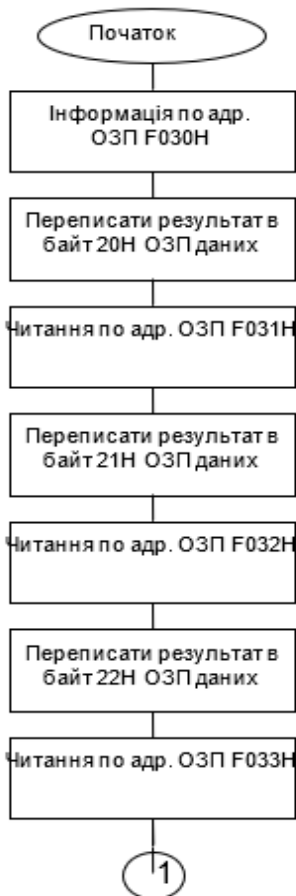


Рисунок 3.11 - Блок-схема алгоритму підпрограми SCAN

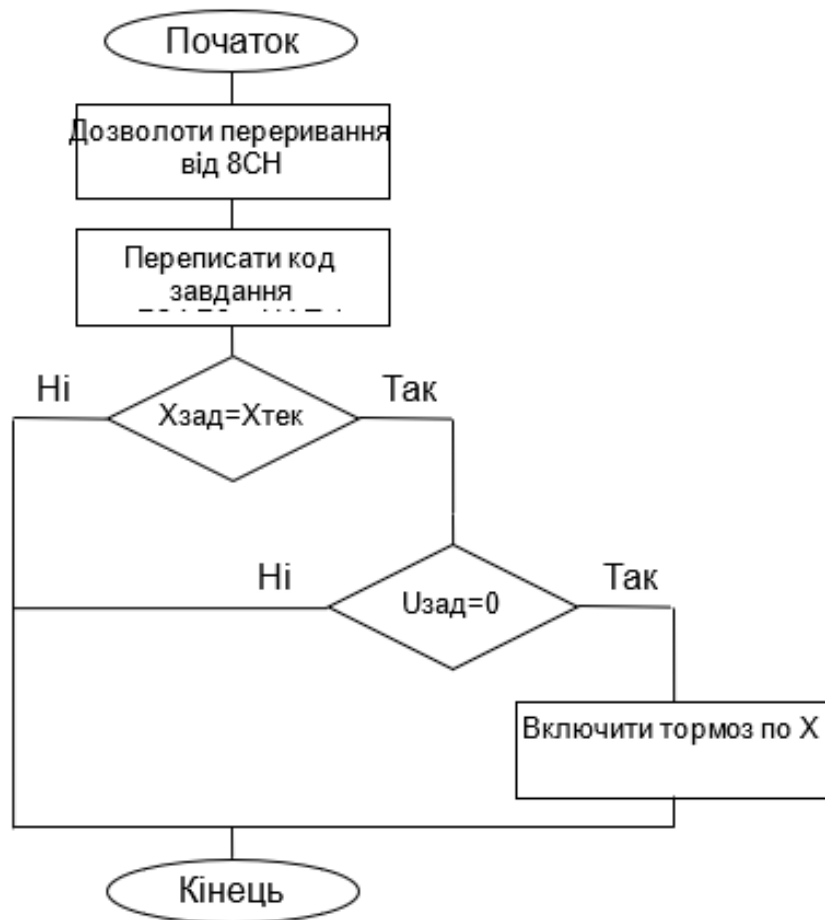


Рисунок 3.12 - Блок-схема алгоритму підпрограми UZ1

Виходячи з опису роботи крана складемо блок-схему алгоритму роботи в режимі «дистанційного керування», яка представлена на малюнку 3.13. Так як система управління розроблена у двоканальному виконанні, то керуючі сигнали з кожного з каналів контролера надходять на провідний контролер, де порівнюється їхня ідентичність і приймаються необхідні рішення для подальшої роботи.

Оператор з пульта управління встановлює напрямок руху і включає двигун переміщення приводу хода або гакової підвіски. Потім керуючі сигнали з контролера надходять на модуль управління перетворювача частоти, де формується швидкість обертання двигуна. Величина швидкості, коли необхідно здійснювати режим програмно задається в мікроконтролері.

Датчик швидкості дозволяє визначити переміщення в реальний момент часу і сигнал з датчика швидкості надходить на дисплей панелі оператора. команда з пульта оператора крана про зупинку руху. Якщо швидкість не відповідає заданій, то контролер видає сигнал про включення запобіжного гальмування або сигналу про необхідність підвищення швидкості до заданої величини.

Розроблений алгоритм функціонування системи управління приводом мостової кран-балки, що складається з двох електроприводів

переміщення моста та підйому крюкової підвіски, дозволяє організувати роботи в автоматичному та напівавтоматичному режимі робіт. Він описує основні функції, що виконуються розробленою системою управління.

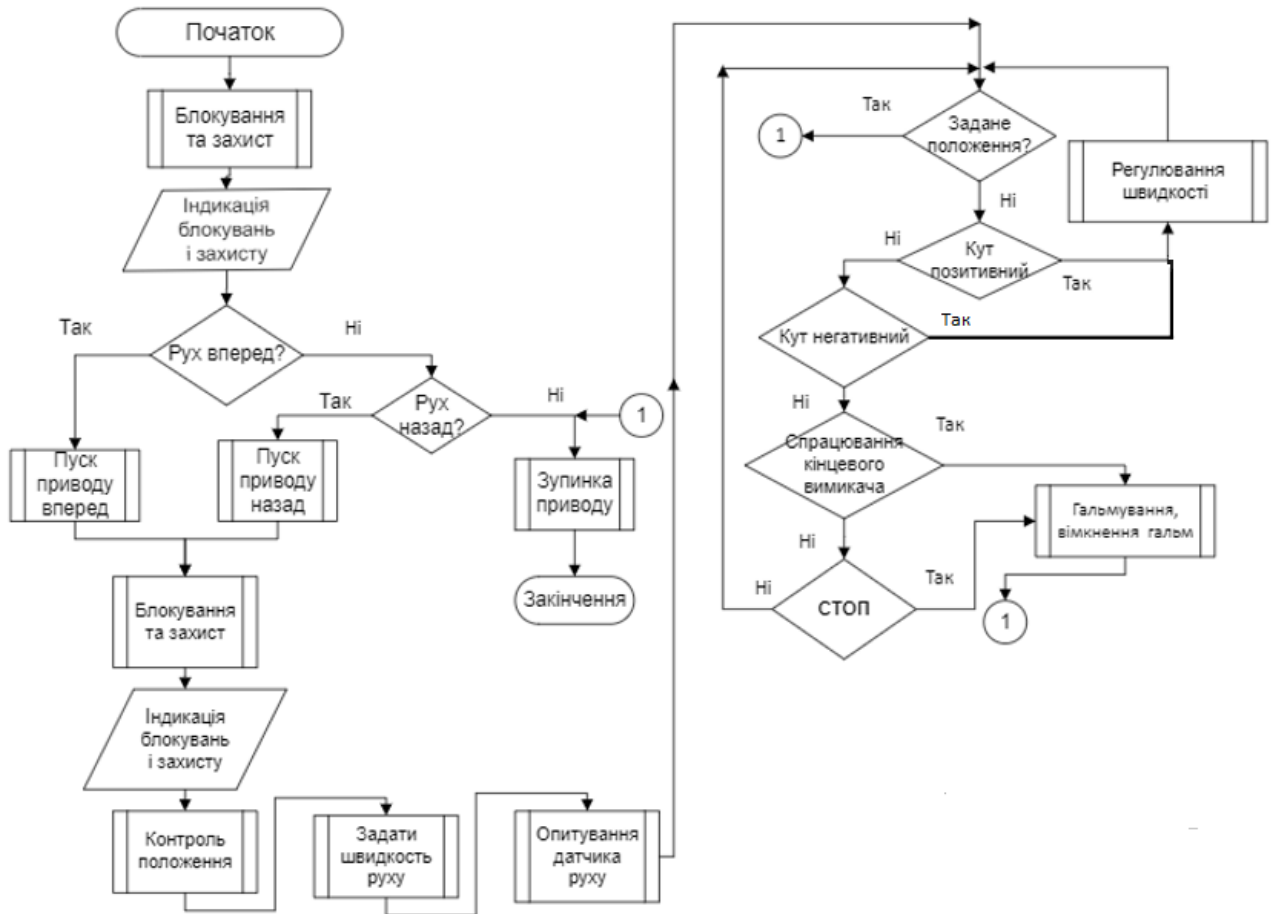


Рисунок 3.13 – Блок схема алгоритму функціонування системи керування електроприводами мостової кран-балки

4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

4.1 Розрахунок сумарної потужності

Проведемо розрахунки сумарної потужності в кіловатах по кожному з об'єктах.

Де:

P_1 - потужність кран-балки 5т.

P_2 - потужність мостового крана 20т.

t - час роботи в годинах

ΔP - різниця в потужності

E - спожита енергія

K – коефіцієнт 20%

C - вартість 1 кВт*год електроенергії

ΔE - різниця спожитої енергії

Кран-балка 5т.: 8кВт головний підйом, $2 \times 2,2 = 4,4$ кВт хід моста, 0,37 кВт візок.

$$P_1 = 8 + 4,4 + 0,37 = 12,77. \text{ кВт} \quad (4.1)$$

Мостовий кран 20т.: 17 кВт головний підйом, $2 \times 4 = 8$ кВт хід моста, візок 5.5 кВт.

$$P_2 = 17 + 8 + 5,5 = 30 \text{ кВт} \quad (4.2)$$

Різниця в споживанні електроенергії за годину:

$$\Delta P = 30 - 12,77 = 17,23. \text{ кВт} \quad (4.3)$$

Якщо використовувати кран-балку при загрузці дрібних клієнтів, замість мостового крана, сумарна різниця складе 17 кіловат/год. Навіть якщо припустити що цей час складе всього 2 години на день, виходить 2 години *20 робочих змін *12 місяців отримаємо 480 годин на рік.

$$t = 2 * 20 * 12 = 480 \text{ год/рік} \quad (4.4)$$

Тепер 480 годин помножмо на різницю в споживанні електричної енергії між краном і кран-балкою 17,23 кВт

$$E = 480 * 17.3 = 8270 \text{ кВт*г} \quad (4.5)$$

Враховуючи той факт що швидкість головного підйому 20т. крану менша ніж у кран-балки на 20% то можна припустити що економічний ефект буде на 20% більше від нашого розрахунку.

Додатковий ефект від використання частотних перетворювачів



$$E_0 = E * k$$

$$E_0 = 8270 * 1,2 = 9924 \text{ кВт} \quad (4.6)$$

Тож в середньому економічний ефект складе приблизно 10000 кВт в рік.

Розрахунки проведені без модернізації кран-балки. Якщо врахувати економічний ефект при використанні частотних перетворювачів, можна припустити що це приблизно ще + 15-20%

Таблиця 4.1 – Різниця в споживанні електроенергії кранового обладнання

Параметр	Кран-балка 5т	Мостовий кран 20т	Різниця (кВт)
Номінальна потужність головного підйому	8 кВт	17 кВт	9 кВт
Номінальна потужність ходу моста	4,4 кВт	8 кВт	3,6 кВт
Номінальна потужність візка	0,37 кВт	5,5 кВт	5,13 кВт
Сумарна потужність	12,77 кВт	30 кВт	17,23 кВт
Час роботи за рік	480 годин	480 годин	-
Річна різниця споживання електроенергії	-	-	8270 кВт*год
Потенційний економічний ефект від заміни	-	-	~10000 кВт*год/рік
Додатковий ефект від частотних перетворювачів	-	-	+15-20%

Споживання електричної енергії кран-балкою 5т за рік.

$$E1 = 480 * 12.77 = 6134,4 \text{ кВт*г} \quad (4.7)$$

Споживання електричної енергії мостовим краном 20т. за рік.

$$E2 = 480 * 30 = 14400 \text{ кВт*г} \quad (4.8)$$

Різниця в споживанні електроенергії між кран-балкою 5т. і мостовим краном 20т.

$$\Delta E = 14400 - 6134,4 = 8265,6 \quad (4.9)$$

Вартість електроенергії на момент розрахунку 10 гривень за 1 кВт.

$$C = 8265,6 * 10 = 82656 \text{ грн} \quad (4,10)$$

Таблиця 4.2 – Потенційна економія в рік

Параметр	Кран-балка 5т	Мостовий кран 20т	Різниця
Річне споживання, кВт*г	6134,4	14400	8265,6
Вартість електроенергії за рік (при 10 грн/кВт*г)	61344 грн	144000 грн	82656 грн
Потенційна економія в рік	-	-	82656 грн

Таким чином розрахунки сумарної потужності показали що, різниця в споживанні електричної енергії за рік між кран-балкою та мостовим краном становить 8265,6 кВт/год. Тобто після модернізації кран-балки та використання її для завантаження дрібних клієнтів, економія складе приблизно 82656 грн. в рік.

4.2 Розрахунок вартості інвестиційного проекту

Розрахунок капітальних витрат для обраного обладнання буде здійснюватися шляхом складання таблиці 4.3 основного обладнання, що дозволить детально визначити всі етапи та складові витрат на закупівлю, встановлення та запуск обладнання. Актуальні ціни на обладнання зафіксовані на початку 2025 року.

Таблиця 4.3 – Капітальні витрати на нове обладнання

№ п/п	Найменування	Од.	Кількість одиниць	Вартість одиниці грн.	Загальна сума грн.
		вимірювання			
1	Контролер SIMATIC S7- 1212C	шт.	1	9333	9333
2	Частотний перетворювач SINAMICS G120P	шт.	2	18333	36666
3	Датчик кута нахилу серії INC 210	шт.	1	7771	7771
4	SIMATIC S7- 1200 CM	шт.	1	7885	7885
5	Індуктивний датчик Siemens 3RG4142- 6AD00	шт.	6	3583	21498

Продовження таблиці 4.3

№	Найменування	Од. вимірювання	Кількість одиниць	Вартість одиниці грн.	Загальна сума грн.
6	Комунікаційний модуль СМ- 1241	шт.	1	9463	9463
7	Силовий кабель	метри	30	57	1710
8	Щит комутаційний	шт.	1	3066	3066
9	Кабель для комутації	метри	100	15	1500
10	Струмopриймач ТК-9А	шт.	3	1400	4200
Усього без ПДВ					103092
Усього з ПДВ					123710

З таблиці 4.3 видно що, загальні витрати на модернізацію складуть орієнтовно 123.710,00 грн. без урахування на монтаж та запуск системи.

Аналізуючи результати проведених розрахунків можна відзначити що після проведення модернізації термін окупності проекту займе 1,5 роки.



ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено мостову кран-балку 5т., визначено її основні недоліки якими є розгойдування вантажу, сильні динамічні навантаження на механічну складову кран-балки, проведено аналіз на можливість впровадження АСУ з використанням сучасного обладнання.

У роботі проведено аналіз предметної області, запропоновано нову концепцію автоматизації. Розроблено математичну модель електроприводу та алгоритм керування, що забезпечує зменшення розгойдування вантажу. В процесі проектування були розраховані і вибрані з каталогу simatic-st70-complete-english-2024 елементи системи управління – програмований логічний контролер Siemens S7-1200, частотні перетворювачі Siemens SINAMICS G120P, індуктивні та інклінометричні датчики для контролю параметрів. Проведено моделювання системи керування у середовищі Simulink, що підтвердило її ефективність.


Розроблена система дозволяє значно прискорити процес транспортування вантажів, а також підвищити безпеку роботи персоналу в межах складу.

Економічний аналіз показав доцільність впровадження запропонованої системи, оскільки її термін окупності становить приблизно 1.5 роки.

Таким чином, мета кваліфікаційної роботи досягнута, а всі поставлені завдання виконано.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Довідник підшипників URL: <https://www.podshypnik.info/ua/>
2. Мехатроніка та робототехніка : методичні вказівки до виконання практичних робіт / уклад. О. В. Суботін. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИ-ТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2024. 48 с. URL: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/821>.
3. Boldea I. B. S. A. N. Electric drives. Boca Raton : 3rd Edition, 2016. 672 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315368573>
4. Sciencedirect Seyed Mahdi Homayouni A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2013.11.021>
5. Sciencedirect Jeroen Van Wittenberghe Increasing the Reliability of Industrial Overhead Cranes by Structural Health Monitoring DOI : <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.03.012>
6. Крисан Ю., Залужний М., Дубицький С. Частотно-регульований електропривод вантажопідйомних кранів. *Тиждень науки*. 2019. С. 142–143.
7. Чижов, Д. О. Розробка кран-балки вантажопідйомністю 5 т : : 133 Галузеве машинобудування / Чижов Денис Олегович. – Харків: ХНАДУ, 2021. – 77 с. URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/4400>
8. Колб А. Теорія електроприводу. 2-ге вид. Дніпро: НГУ, 2011. 540 с. URL: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4905>.
9. Система керування електроприводами моста електромостового крана: пат. u200805620 Україна : МПК H02P 3/18 (2006.01). Заявл. 29.04.2008 ; опубл. 10.10.2008, № Бюл. № 19. 2 с.
10. Пристрій для двоступінчастого гальмування електромеханічного приводу механізмів горизонтального переміщення вантажу електромостового крана: пат. 15913 Україна : H02P 3/18 (2006.01) F16D 51/00. № u200601151; заявл. 06.02.2006; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.с.6
11. О.В., Григоров Енергозбереження шляхом застосування раціонального керування асинхронних електроприводів ВПМ / О.В.Григоров, В.П.Свіргун, В.В.Стрижак та. ін. // Вісник НТУ "ХПІ" "Технології в машинобудуванні". – №49/2010.
12. Balas V. E., Bansal R. C., Mangipudi S. K., Dawn S. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Techniques for Electrical Engineering Systems (AITEES 2022). Volume 3. Springer Nature, 2022. 307 p. DOI: <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-074-9>. URL: <https://read.kortext.com/library/books/2138720>.
13. SIMATIC S7-1200 - Siemens Global URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html>



14. Промисловий каталог Siemens - Промисловий торговий центр -
Siemens WW URL:
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/1000000>

15. Richard Fitzpatrick, Newtonian Dynamics, URL:
<http://farside.ph.utexas.edu/teaching/336k/Newton/Newtonhtml.html> Архівна
копія