

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ___ ” _____ 2023р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи
автоматизації, електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Автоматизація електромеханічної системи мостового крана

Виконав : студент _____ 4 _____ курсу, групи _____ ЕП-92

(шифр групи)

Ступеньков Даніл Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник _____ Сергієнко Олег В'ячеславович

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

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові)

(підпис)

Рецензент _____ Вишневський О.В., асист.

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

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2023р.

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Автоматизація електромеханічної системи мостового крана

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Сергій КОВБАСА
(підпис)

« ___ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Ступенькову Данілу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація електромеханічної системи мостового крана

керівник проекту Сергієнко Олег В'ячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ___ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 30.05.2023

3. Вихідні дані до проекту вантажопідйомність мостового крана 12,5т, висота підйому вантажу 9м, максимально допустима швидкість 0,2м/с, максимально допустиме прискорення 0,25м/с², тривалість включення ел. двигуна 25%, загальний номінальний ККД підйомного механізму 75%.

4. Зміст пояснювальної записки Вступ. Аналітичний огляд мостових кранів. Вибір електродвигуна та розрахунок його параметрів. Розробка структурної схеми САК. Розробка системи управління. Моделювання САК. Висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо); Схема ел. принципова (формат А1). схема

управління пуском АД (формат А1). Дослідження динамічних та статичних режимів (формат А1).

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 08.02.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Вибір двигуна	17.04 – 23.04.2023 р.	
2	Розрахунок перехідних процесів	24.04 – 30.04.2023 р.	
3	Реалізація схеми механізму підйому мост. к.	01.05 – 07.05.2023 р.	
4	Розробка структурної схеми системи управ.	08.05 – 14.05.2023 р.	
5	Дослідження динаміки ел. мех. системи	15.05 – 21.05.2023 р.	
6	Практична реалізація ел. мех. системи	22.05 – 28.05.2023 р.	

Студент

_____ (підпис)

Даніл СТУПЕНЬКОВ

Керівник проекту

_____ (підпис)

Олег СЕРГІЄНКО

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота включає 89 сторінок, 49 малюнків, 3 аркуші графічної частини.

Метою виконання курсової роботи (проекту) є розробка та дослідження автоматизованого електроприводу механізму підйому мостового крана. Також досліджена системи регулювання швидкості для приводу механізму підйому мостового крана. Для досягнення мети у роботі виконано:

- аналітичний огляд розімкнених систем управління швидкістю електроприводу механізму підйому та механізму пересування візка мостового крана;
- розраховані та обрані основні елементи приводів;
- досліджено функціональну та структурну схеми;
- Вибрано регулятор швидкості.

Також було досліджено перехідні процеси при пуску та накиданні навантаження.

Розраховано механічні характеристики відповідно до частотного закону регулювання швидкості АТ.

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, СТРУКТУРНА СХЕМА, ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН З ФАЗНИМ РОТОРОМ, ДОСЛІДЖЕННЯ, РЕГУЛЯТОР, ДИНАМІКА, СТАТИКА, МЕХАНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ПРИРОДНА ХАРАКТЕРИСТИКА.

					141.ЕП9212.024.БР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Ступеньков Д.С.			Автоматизація електромеханічної системи мостового крана	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Сергієнко О.В.					4	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП гр. ЕП-92		
Н. Контр.		Теряєв В.І.						
Затверд.		Ковбаса С.М.						

SUMMARY

The diploma project consist of an explanatory note of 89 pages, 49 figures, 3 sheets of the graphic part.

In this diploma project is the development and research of an automated electric drive of a bridge crane lifting mechanism. The speed control system for driving the bridge crane lifting mechanism was also investigated. To achieve the goal, the work performed:

- analytical review of open speed control systems of the electric drive of the lifting mechanism and the movement mechanism of the overhead crane trolley;
- the main elements of drives are calculated and selected;
- functional and structural schemes were investigated;
- The speed controller is selected.

Transient processes during start-up and loading were also investigated.

The mechanical characteristics were calculated according to the frequency law of BP speed regulation.

AUTOMATED ELECTRIC DRIVE, STRUCTURE DIAGRAM, FUNCTIONAL DIAGRAM, CONTROL SYSTEM, ASYNCHRONOUS MOTOR WITH PHASE ROTOR, RESEARCH, REGULATOR, DYNAMICS, STATICS, MECHANICAL CHARACTERISTICS, NATURAL CHARACTERISTICS.

					141.9212.024.БР			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Ступеньков Д.С.</i>			<i>Автоматизація електромеханичної системи мостового крана</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Сергієнко О.В.</i>				5		
<i>Реценз.</i>						<i>КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Теряєв В.І.</i>				<i>ФЕА, каф. АЕМС-ЕП</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Ковбаса С.М.</i>				<i>гр. ЕП-92</i>		

Зміст

РОЗДІЛ 1	11
АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Металевий міст	12
1.2 Колісні пари та рейки	14
1.3 Підйомні механізми мостових кранів	16
1.4 Підйомно транспортні машини (ПТМ)	17
РОЗДІЛ 2	21
Вибір двигуна	22
2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна	22
2.2 Визначення параметрів розрахункової роботи	29
2.3 Перевірка правильності вибраного двигуна	37
РОЗДІЛ 3	41
3.1 Розрахунок перехідних процесів механізму підйому вантажів	41
3.2 Опис схеми керування	55
РОЗДІЛ 4	57
Реалізація схеми механізму підйому мостового крана на основі частотного керування	57
4.1 Аналітичний огляд	57
4.2 Визначення параметрів динамічної моделі АД	58
4.3 Вибір перетворювача частоти	59
4.4 Структурна схема об'єкту регулювання	60
4.5 Математична модель АД	61
4.6 Структурна схема перетворювача частоти	72
РОЗДІЛ 5	74
Дослідження динаміки електромеханічної системи підйомного механізму мостового крана	76
РОЗДІЛ 6	83
Практична реалізація електромеханічної системи підйомного механізму мостового крана	83
ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	88

Вступ

Розвиток електроприводу впливає на конструювання механізмів і вибір двигунів. Технологи видають завдання механікам, які передають їх електрикам. Зараз механіки і електрики разом вирішують, як здійснити технологію виробництва. Часто одні й ті самі технологічні умови можуть бути реалізовані за допомогою кінематики механізму, електроприводу або їх поєднанням. Однак розвиток техніки спрямовується на спрощення кінематики механізмів, зменшення використання механічних гальм і редукторів, оскільки електропривод забезпечує виконання складних режимів прискорення, уповільнення, регулювання швидкостей тощо. У пошуку найкращих характеристик для технології конкурують двигуни постійного і змінного струму. Двигуни змінного струму мають переваги щодо максимальної частоти обертання і динамічного гальмування. Вони також економічніші і надійніші. Проте двигуни постійного і змінного струму продовжують змагатися в складних електроприводах, де важливу роль відіграє апаратура, яка формує характеристики двигунів. Зараз швидко розвиваються частотні перетворювачі, що поєднуються з безконтактним керуванням за допомогою логічних елементів, безконтактних датчиків і командних апаратів. Вантажопідйомні та транспортувальні машини є невід'ємною частиною виробництва і допомагають механізувати технологічні процеси. Для поліпшення їх продуктивності і надійності використовуються нові методи розрахунку і конструювання. Крім того, циклічні установки містять підйомні крани, які працюють у режимі повторюваних циклів. Кожен цикл включає завантаження, переміщення та розвантаження робочого органу.

У сучасному виробництві надзвичайно важливо забезпечувати збільшення продуктивності та покращення техніко-економічних показників підйомально-транспортних машин. Для досягнення цих цілей використовуються новітні методи розрахунку та конструювання.

Одним із ключових аспектів є застосування безконтактного керування за допомогою логічних елементів, безконтактних датчиків і командних апаратів. Це дозволяє забезпечити більш точне та швидке управління підйнятно-транспортними машинами.

Особливу увагу приділяють також розвитку частотних перетворювачів. Вони органічно поєднуються з безконтактним керуванням і дозволяють ефективно регулювати швидкість та режими руху механізмів. Це дозволяє досягти більшої гнучкості та ефективності в роботі підйнятно-транспортних машин.

Застосування сучасних методів розрахунку і конструювання також сприяє підвищенню міцності, надійності та довговічності механізмів. Інженери здатні проводити більш точні розрахунки, враховуючи різноманітні фактори, що впливають на роботу підйнятно-транспортних машин.

У сучасному виробництві велику увагу приділяють також підвищенню автоматизації та узгодженості роботи механізмів. Використання передових технологій дозволяє підвищити точність та швидкість виконання операцій, а також знизити ймовірність помилок та аварій.

У результаті застосування новітніх методів та технологій в розрахунку, конструюванні та управлінні підйнятно-транспортними машинами досягається покращення продуктивності, надійності та ефективності роботи виробничих процесів. Такі машини стають невід'ємною частиною сучасного виробництва та допомагають забезпечити оптимальну механізацію та автоматизацію різноманітних технологічних процесів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Сучасні мостові крани складаються з наступних основних компонентів:

— **Металевий міст:** Це основна несуча конструкція крана, яка складається з двох головних балок (одnobалковий кран) або чотирьох балок (двобалковий кран), які перекинуті через проліт цеху. Балки можуть мати коробчастий переріз або бути з ґратчастими фермами.

— **Колісні пари і рейки:** Колеса крана розташовані на балках і переміщуються по рейках підкранової колії. Це забезпечує рух крана вздовж моста. Коліса зазвичай приводяться в рух електродвигунами через редуктори.

— **Підйомні механізми:** Вони включають підйомні лебідки, які переміщуються вздовж моста за допомогою коліс на візку. На барабанах лебідок намотуються підйомні канати, до яких підвішений гак або інший вантажозахоплювальний пристрій.

— **Система керування:** Керування роботою механізмів крана здійснюється з кабіни оператора-кранівника. У кабіні розташовані контролери або командоконтролери для ручного керування електроприводами механізмів. Електроапаратура управління розміщується в шафах на мосту крана.

— **Електропривід:** Крани оснащені електродвигунами, які забезпечують рух механізмів. Електроенергія підводиться до крана за допомогою ковзних струмознімачів, які отримують живлення від головних тролей, покладених по підкрановій колії.

— **Вантажозахоплювальні пристрої:** Залежно від потреб та типу вантажів, крани можуть мати різні вантажозахоплювальні пристрої. Це можуть бути – гаки, магніти, ґрейфери, кліщі та інші пристрої, які призначені для захоплення та переміщення вантажів.

Ці компоненти разом утворюють сучасний мостовий кран, який забезпечує ефективну підйомно-транспортну діяльність в різних промислових секторах.

1.1 Металевий міст

Металевий міст є основною несучою структурою мостового крана. Він складається з двох головних балок, які можуть мати коробчастий переріз або бути виконаними у вигляді ґратчастих ферм. Ці головні балки перекинуті через проліт цеху і підтримуються опорними конструкціями, розташованими у верхній частині цеху.

Головні балки мостового крана зазвичай виготовляються зі сталі, оскільки вона має достатню міцність та жорсткість для підтримання вантажу. Часто використовуються спеціальні види сталі, які мають високу міцність при малій масі, що дозволяє знизити вагу конструкції і збільшити її ефективність.

Металевий міст виготовляється зварюванням сталевих компонентів, що забезпечує міцність і надійність конструкції. Зварні з'єднання між компонентами ретельно перевіряються на міцність та якість, оскільки вони відповідають за безпеку та надійність роботи мостового крана.

Для забезпечення плавного руху мостового крана по місту вздовж головних балок прокладені рейки, по яким рухаються колеса візка. Це дозволяє крану переміщуватися вздовж моста зі значною точністю та ефективністю.

Металевий міст мостового крана є однією з найважливіших складових, оскільки він несе вагу вантажу і передає його на опорні конструкції. Висока міцність і стійкість металевого мосту дозволяє мостовому крану працювати з великими вантажами та забезпечує безпечну та ефективну роботу крана в промислових умовах.

Додатково до головних балок, металевий міст мостового крана включає інші складові, які допомагають забезпечити стабільність та ефективність роботи крана. Декілька з них включають:

— Опорні конструкції: Це стійки або стінки, які підтримують головні балки мостового крана. Вони розташовані у верхній частині цеху або на фундаментах. Опорні конструкції повинні бути достатньо міцними та стійкими, щоб забезпечити стійкість мостового крана під час роботи з великими навантаженнями.

— Кодові колеса: Це колеса, які розташовані на кінцевих балках мостового крана. Вони дозволяють крану переміщуватися по рейках підкранової колії, які закріплені на опорних конструкціях у верхній частині цеху. Кодові колеса зазвичай мають спеціальний дизайн, що забезпечує їх стійкість та плавний рух.

— Рейки: Це сталеві бруски або профілі, на яких рухаються колеса візка мостового крана. Рейки прокладені вздовж моста і дозволяють крану здійснювати горизонтальний рух. Вони повинні мати високу міцність і точність, щоб забезпечити плавний і безперебійний рух крана.

— Візок: Це механізм, який рухається вздовж моста мостового крана і переносить вантаж. Візок може мати підйомну лебідку або інші пристрої для підйому та переміщення вантажу. Візок зазвичай має механізм пересування, що дозволяє крану переміщатися вздовж моста.

Кожна з цих складових металевого моста має важливу роль у забезпеченні функціональності та ефективності мостового крана. Сполучаючись разом, вони створюють стійку та надійну конструкцію, яка здатна витримувати значні навантаження і забезпечувати безперебійну роботу крана у промислових умовах.



Рисунок 1.1 – Мостовий кран

1.2 Колісні пари та рейки

Колісні пари та рейки є важливими складовими металевого мосту мостового крана, які дозволяють здійснювати переміщення крана вздовж рейок і забезпечують горизонтальний рух.

— Колісні пари: Колісні пари складаються з металевих коліс, які кріпляться до візка мостового крана. Ці колісні пари мають спеціальний дизайн і виготовляються з міцної сталі, щоб забезпечити високу міцність та довговічність. Колісні пари можуть мати гумове покриття або бути металевими, залежно від конкретних вимог і умов експлуатації. Вони повинні бути точно збалансованими і розрахованими на великі навантаження, що дозволяє крану плавно рухатися по рейках.

— Рейки: Рейки є сталевими брусками або профілями, які прокладені вздовж моста мостового крана. Вони мають спеціальну форму, що дозволяє колісним парам крана безперешкодно рухатися по них. Рейки повинні бути рівними, точними та міцними, щоб забезпечити стабільний рух крана і необхідну точність переміщення. Вони також повинні бути змащеними або мати спеціальне покриття, що зменшує тертя і забезпечує плавний рух колісних пар.

Колісні пари та рейки спільно працюють для забезпечення плавного і точного переміщення мостового крана вздовж рейок. Вони є важливими елементами системи переміщення крана і впливають на безпеку, стійкість і продуктивність його роботи. Правильне підтримання та обслуговування колісних пар і рейок дозволяє забезпечити ефективну роботу мостового крана на протязі тривалого часу.

Колісні пари:

— **Переміщення:** Колісні пари дозволяють мостовому крану переміщатися вздовж рейок. Вони надають крану горизонтальний рух і забезпечують точне позиціонування крана над вантажем або робочою зоною.

— **Навантаження:** Колісні пари витримують навантаження, що передається від вантажу на візок крана до рейок. Вони повинні мати достатню міцність та стійкість, щоб утримувати вагу вантажу і забезпечувати безпечну експлуатацію крана.

— **Стійкість:** Колісні пари сприяють стабільності мостового крана шляхом рівномірного розподілу навантаження на рейках. Вони допомагають уникнути похибок в руху та утримати кран у правильному положенні під час підйому і переміщення вантажу.

Рейки:

— **Підтримка:** Рейки надають підтримку колісним парам і дозволяють їм рухатися плавно і безперешкодно. Вони мають плавну поверхню, яка забезпечує надійне контакту з колісними парами.

— **Направлення:** Рейки слугують для визначення напрямку руху крана. Вони укладаються паралельно одна одній і встановлюються з високою точністю, щоб забезпечити прямолінійний рух крана.

— **Зменшення тертя:** Рейки можуть мати спеціальне покриття або бути змащеними, щоб зменшити тертя між колісними парами і рейками. Це дозволяє забезпечити плавний і ефективний рух крана і знижує знос рейок.

Колісні пари і рейки використовуються разом, утворюючи систему, яка забезпечує плавний і безперебійний рух мостового крана. Вони є важливими компонентами, які сприяють ефективності та безпеці роботи крана.

1.3 Підйомні механізми мостових кранів

Підйомні механізми є одними з ключових компонентів мостового крана, вони відповідають за підйом і опускання вантажу. Основна функція підйомних механізмів полягає в створенні вертикального руху, що дозволяє піднімати вантаж з нижнього рівня до потрібної висоти і спускати його назад.

Підйомні механізми мостових кранів можуть використовувати різні конструкції та принципи дії, але основними складовими елементами є наступні:

— Підйомна лебідка: Це пристрій, який використовується для підйому і опускання вантажу. Вона складається з барабана, на якому намотаний підйомний канат або ланцюг. Барабан приводиться в рух електродвигуном через редуктор, що дозволяє керувати швидкістю підйому. Підйомна лебідка забезпечує потрібну силу підйому і може мати різні конфігурації в залежності від вантажу, який кран повинен піднімати.

— Блоки і крюки: Це елементи, які приєднуються до підйомного канату або ланцюга і слугують для підвішування вантажу. Блоки можуть мати різну конфігурацію, включаючи одинарні, подвійні або багатобалкові. Вони допомагають забезпечити правильне розподілення вантажу і зменшують навантаження на підйомну лебідку.

— Гаки і захоплювачі: Гаки є основними пристроями для захоплення вантажу. Вони зазвичай виготовляються з міцної сталі і мають різні форми, що відповідають типу вантажу, який необхідно підняти. Крім гаків, використовуються також інші захоплювачі, наприклад, магніти, грейфери, кліщі та інші, які дозволяють піднімати різноманітні вантажі з високою точністю і безпекою.

— Система управління: Підйомні механізми керуються системою управління, яка забезпечує контроль над швидкістю, напрямком і точністю підйому вантажу. У сучасних мостових кранах використовуються електронні системи управління, які дозволяють оператору зручно та безпечно керувати рухом підйомних механізмів.

— Запобіжні пристрої: Для безпечної роботи підйомних механізмів у складі мостових кранів використовуються різноманітні запобіжні пристрої. Наприклад, це можуть бути гальма, які забезпечують зупинку і утримання вантажу у висіченому положенні, а також механізми аварійного відключення, які діють у разі виникнення небезпечних ситуацій.

Ці компоненти підйомних механізмів працюють разом, забезпечуючи ефективне та безпечне підйомання і опускання вантажу на мостових кранах. Конструкція і характеристики підйомних механізмів можуть варіюватися в залежності від вимог і потреб конкретного застосування.

1.4 Підйомно транспортні машини (ПТМ)

Підйомно-транспортні машини (ПТМ) — унікальні пристрої, розроблені для автоматизації процесів навантаження та розвантаження, а також переміщення різноманітних вантажів (включаючи матеріали, сировину, вироби та товари) та пасажирів у просторі, незалежно від напрямку — вертикальному, горизонтальному або похилому [\[8\]](#).

Класифікація ПТМ:

За характером виконуваних переміщень і призначенням, підйомно-транспортні машини можуть бути умовно розділені на три основні групи:

— Вантажопідйомні машини і механізми призначені для переміщення окремих великомасштабних вантажів по просторовій траєкторії, включаючи вертикальні, похилі та горизонтальні ділянки. Ці машини працюють за циклічним методом, з періодами роботи та пауз. Вони можуть виконувати монтажні операції, пов'язані з підйомом і точним

встановленням елементів чи обладнання, а також зберігати їх у підвішеному стані до закріплення в проектному положенні.

— Транспортуючі машини призначені для переміщення масових однотипних вантажів безперервним потоком вздовж певної траси, яка може бути як горизонтальною, так і похилою, а також включати вертикальні ділянки. Ці машини можуть застосовуватися на складсько-монтажних операціях для виготовлення різних виробів різної складності, а також для перевезення пасажирів (наприклад, ескалатори, пасажирські конвеєри, підйомники безперервної дії) та інше.

— Вантажно-розвантажувальні машини призначені для розвантаження матеріалів, напівфабрикатів і готових виробів з транспортних засобів або складів і перевантаження їх у інші транспортні засоби, такі як залізничні вагони, судна і т.д. Ці машини оснащені захоплювальними органами, які дозволяють ефективно виконувати розвантажувальні операції. Вантажно-розвантажувальні машини застосовуються для перевантаження різних типів вантажів, але особливо ефективні при роботі з сипучими матеріалами, такими як вугілля, руди та інші насипні вантажі.

Залежно від характеру переміщення вантажу, машини та пристрої, які використовуються у вантажно-розвантажувальних, складських та транспортних операціях, можна розділити на дві основні групи:

— Машини безперервної дії - це машини, у яких рухаючийся робочий орган (такий як стрічка, канат, гвинт, скребок, лоток і т.д.) рухається безперервно, не зупиняючись для прийому або віддачі вантажу, та переміщує його до місця призначення безперервним потоком. Цю групу машин представляють конвеєри різних типів, пасажирські (рухомі тротуари), елеватори, ескалатори, ліфти безперервної дії (патерностери) і т.д.

— Машини періодичної (циклічної) дії - це машини, в яких вантажозахоплювальний орган (такий як гак, ковш, напівавтоматичний або автоматичний захват і т.д.) переносить вантаж порціями, і після кожного

переміщення порції вантажу повертається назад порожнім. До механізмів і машин періодичної дії відносяться прості неприводні вантажопідйомні пристрої, такі як блоки, поліспасти та інші, а також вантажопідйомні машини, зокрема електричні підйомні крани, штабелери, вантажні і пасажирські ліфти, підйомники.

Залежно від типу вантажу, який обробляється, можна виділити різні види підйомно-транспортного обладнання:

— Для переміщення тарно-штучних вантажів у ящиках, бочках, мішках використовуються вантажопідйомні крани, електронавантажувачі, автовантажувачі та інші пристрої.

— Для переміщення масових насипних і навалювальних вантажів використовуються ковшові навантажувачі, стрічкові транспортери та інші види обладнання.

— Для перекачування і транспортування наливних вантажів використовуються спеціальне обладнання, як-то насоси, трубопроводи та інші пристрої.

Підйомно-транспортні машини можуть мати різні типи приводу, такі як електричний, гідравлічний, пневматичний або можуть отримувати енергію від двигуна внутрішнього згорання (наприклад, дизельного двигуна).

Опис установки та технологічного процесу за темою диплому

У ході проектування буде розглядається підйомний механізм крану з Досліджуються принципи роботи та технічні характеристики механізмів, які використовуються у мостових кранах.

Мостовий кран складається з таких основних компонентів: металева конструкція, яка складається з двох прогонів і кранового мосту; крановий канат, що використовується для підйому і переміщення вантажів; гальма, що забезпечують безпеку під час руху крана; механізми підйому і переміщення каната; електронні системи керування і моніторингу роботи крана.

Описана установка та технологічний процес мостових кранів мають на меті детально вивчити та проаналізувати принципи роботи кранів, розробити оптимальні алгоритми керування, а також впровадити новітні технології для досягнення більш ефективного та безпечного функціонування мостових кранів.

Формулювання вимог до електроприводу та системи керування мостових кранів:

Вимоги до електроприводу механізму мостового крану:

— Режим роботи: Електропривід повинен забезпечувати основні режими роботи мостового крану, зокрема пуск, уповільнений рух та гальмування, а також допоміжні і налагоджувальні режими для надійної та безперебійної роботи механізму.

— Плавний пуск: Електропривід повинен мати можливість забезпечити плавний пуск двигуна з обмеженим пусковим моментом, щоб уникнути раптових навантажень на механізми крану.

— Регулювання швидкості: Електропривід повинен мати можливість регулювати швидкість руху мостового крану з постійним моментом. Це дозволить адаптувати швидкість до конкретних вимог і умов роботи, забезпечуючи оптимальні умови пересування вантажу.

— Точність переміщення та позиціонування: Електропривід повинен забезпечувати високу точність переміщення та позиціонування механізмів мостового крану. Це важливо для досягнення точності підйому та переміщення вантажу.

— Надійність та стійкість: Електродвигун повинен бути надійним і стійким до тривалих робочих навантажень, вібрацій і змін температури. Він повинен мати високу міцність і довгий термін служби без збоїв, щоб забезпечити безперебійну роботу мостового крану.

— Час перехідного процесу: Електропривід повинен забезпечувати заданий час перехідного процесу, який визначає швидкість реакції системи

на зміни команд і забезпечує плавний та стабільний рух мостового крану. Наприклад, можна встановити час перехідного процесу $t_p = 0.5$ с.

Вимоги до системи керування мостового крану:

— Габаритні розміри та маса: Система керування повинна відповідати мінімальним габаритним розмірам та масі, щоб забезпечити зручне розміщення та монтаж на мостовому крані.

— Простота монтажу та обслуговування: Система керування повинна бути легкою у монтажі, налагодженні, діагностиці та технічному обслуговуванні. Це забезпечить зручність та швидкість проведення робіт з обслуговування та ремонту системи.

— Механізми захисту: Система керування повинна мати вбудовані механізми захисту для забезпечення безпеки та захисту від непередбачених ситуацій. Наприклад, вона повинна мати захист від струмових перевантажень, перепадів напруги в колі керування та силовому колі, неправильного чергування фаз, перевищення швидкості та блокування від мимовільного пуску або включення приводу подачі при відключеному приводі головного руху.

Висновки по 1 розділу:

1. Мостові крани є важливими складовими вантажоперевезення в промисловості та будівництві. Вони забезпечують ефективне переміщення вантажів вздовж рейок.
2. Рейки є необхідними для визначення напрямку руху крана. Вони укладаються паралельно одна одній і забезпечують прямолінійний рух крана.
3. Колісні пари та рейки є важливими компонентами металевого мосту мостового крана. Вони дозволяють здійснювати переміщення крана вздовж рейок і забезпечують горизонтальний рух .

РОЗДІЛ 2

Вибір двигуна

2.1 Розрахунок потужності і вибір двигуна

Статичні навантаження двигуна крана створюються силами статичного опору, що діють у кранових механізмах, силами тяжіння і тертя. Визначимо приведені до вала двигуна статичні навантаження механізму підйому крана. Для механізму підйому характерний активний статичний момент, який спрямований проти руху під час підйому вантажу і збігається з ним за напрямком під час спуску. Крім того, в реальних механізмах завжди присутні сили тертя, що створюють реактивний момент, який зростає при збільшенні навантаження механізму.

Статична потужність $P_{c\uparrow G}$ підйому, кВт, на валу двигуна в усталеному режимі P режимі під час підйому витрачається на переміщення вантажу і на подолання втрат на тертя:

$$P_{c\uparrow G} = \left(\frac{(G + G_0) \cdot V_{\text{ПОД}}}{\eta} \right) \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

$$P_{c\uparrow G} = \left(\frac{(122500 + 1225) \cdot 0.2}{0.75} \right) \cdot 0.001 = 32.9933 \text{ кВт} \approx 33 \text{ кВт}$$

$$G = m \cdot g = 12500 \cdot 9.8 = 122500 \text{ Н} \quad (2.2)$$

Вага гака з блоком або вантажозахоплюваного пристрою (2.2).

$$G_0 = m_0 \cdot g$$

$$G_0 = m_0 \cdot g = 125 \cdot 9.8 = 1225 \text{ Н} \quad (2.3)$$

η – загальний ККД підйимального механізму, який визначається за кривими, зображеними на рис. - швидкість підйому вантажу, м/с. ККД механізмів крана залежить від їхнього завантаження, як це показано на експериментальному графіку, на рисунку 2.1. За умовою розрахункового завдання нашому механізму підйому відповідає крива 0,75. Тобто за стовідсоткового завантаження вантажозахоплювального пристрою загальний

ККД механізму становить 75%. Щоб знайти ККД порожнього вантажозахоплювального пристрою, складемо систему:

$$\begin{aligned} 123725 &- 100\% \\ 1225H &- X\% \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$x = \frac{1225 \cdot 100}{123725} = 0.99\% \quad (2.5)$$

завантаження вантажозахоплювального пристрою становить 0,99%. Це завантаження відповідає ККД = 0,05%. Використовуємо ці дані під час розрахунків для підйому або опускання порожнього вантажозахоплювального пристрою.

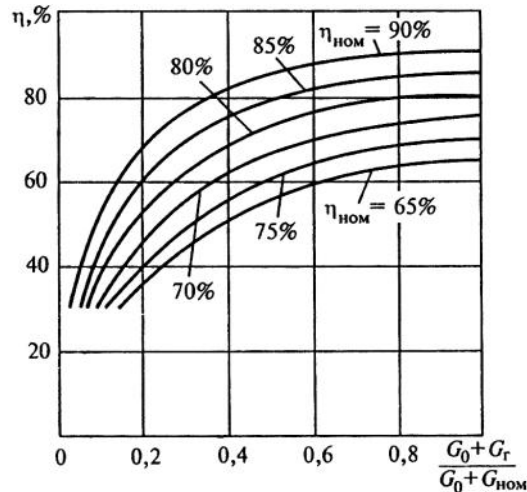


Рисунок 2.1 – Експериментальні криві

Під час підйому порожнього гака (вантажозахоплювального пристрою) статична потужність, кВт:

$$P_{c \uparrow G_0} = \left(\frac{G + G_0 \cdot V_{под}}{\eta} \right) \cdot 10^{-3} = \left(\frac{0 + 1225 \cdot 0.2}{0.05} \right) \cdot 0.001 = 4.9 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

де $V_{под}$ - швидкість підйому гака, м/с; η - ККД механізму за $G = 0$. У сталому режимі спуску статична потужність $P_{c \uparrow G_0}$, кВт, на валу двигуна дорівнює різниці потужностей, обумовлених дією сили тяжіння вантажу, що опускається, $P_{тяж.гр}$, кВт, і сил тертя в механізмі $P_{тр}$, кВт (2.7).

$$P_{тяж.гр} = (G + G_0) \cdot V_{спуска} \cdot 10^{-3}$$

$$P_{тяж.гр} = (G + G_0) \cdot V_{спуска} \cdot 10^{-3} = (122500 + 1225) \cdot 0.2 \cdot 0.001 = 24.745 \text{ кВт} \quad (2.7)$$

$$P_{тр} = \frac{G + G_0}{\eta} \cdot V_{спуска} \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-3}$$

$$P_{тр} = \frac{G + G_0}{\eta} \cdot V_{спуска} \cdot (1 - \eta) \cdot 10^{-3} = \frac{122500 + 1225}{0.75} \cdot 0.2 \cdot (1 - 0.75) \cdot 0.001 = 8.2483 \text{ кВт} \quad (2.8)$$

$$P_{c \downarrow G} = P_{тяж.гр} - P_{тр}$$

$$P_{c.спуска} = P_{тяж.гр} - P_{тр} = 24.745 - 8.2483 = 16.49667 \text{ кВт}$$

Розрізняють силовий і гальмівний спуск. Силовий спуск має місце під час опускання порожнього гака або легких вантажів, сила тяжіння яких не здатна подолати сили тертя в механізмі. У цих випадках $P \leq P$ і опускання вантажу тяж гр тр здійснюється двигуном, який створює рушійний момент. Потужність, що розвивається двигуном під час силового спуску,

$$P_{c \downarrow G_0} = (G + G_0) \cdot V_{спуска} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 2\right) \cdot 10^{-3}$$

$$P_{c \downarrow G_0} = (G + G_0) \cdot V_{спуска} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 2\right) \cdot 10^{-3} = (0 + 1225) \cdot 0.2 \cdot \left(\frac{1}{0.05} - 2\right) \cdot 0.001 = 4.41 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

де $\eta \leq 0,5$, причому для спуску порожнього гака $V_c = V_{c0}$ $\eta = \eta_0$ $P_{c \downarrow G} = P_{c \downarrow G_0}$. Гальмівний спуск застосовується під час опускання середніх і важких вантажів, коли $P_{тяж.гр} > P_{тр}$. Енергія спрямовується з вала механізму до двигуна, який створює гальмівний момент, запобігаючи вільному падінню вантажу й обмежуючи швидкість спуску. Потужність двигуна в цьому режимі.

$$P_{c \downarrow G_0} = (G + G_0) \cdot V_{спуск} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 2\right) \cdot 10^{-3}$$

$$P_{c \downarrow G_0} = (G + G_0) \cdot V_{спуск} \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 2\right) \cdot 10^{-3} = (122500 + 1225) \cdot 0.2 \cdot \left(2 - \frac{1}{0.75}\right) \cdot 0.001 = 16.4975 \text{ кВт} \quad (2.10)$$

де $\eta > 0,5$.

Для побудови навантажувальної діаграми визначимо:

Час розгону:

$$t_{розг} = \frac{V_{ном}}{a_{max}} = \frac{0.2}{0.25} = 0.8s \quad (2.11)$$

Час гальмування:

$$t_{торм} = \frac{V}{a_{max}} = \frac{0.2}{0.25} = 0.8s \quad (2.12)$$

Час підйому вантажу:

$$t_{підйом} = \frac{l(c) \cdot l(m)}{v(m/c)} = \frac{9}{0.2} = 45s \quad (2.13)$$

Час паузи:

$$ПВ_{ном} = \frac{t_{підйому}}{t_{підйому} + t_{паузи}} \cdot 100\% \quad (2.14)$$

Звідси маємо:

$$\begin{aligned} t_{паузи} &= \frac{t_{підйому} \cdot 100}{ПВ_{ном}} - t_{підйому} = \frac{45 \cdot 100}{25} - 45 = \\ &= \frac{4500}{25} - 45 = 180 - 45 = 135сек = 2.25хв \end{aligned} \quad (2.15)$$

і час опускання вантажу:

$$t_{опускання} = \frac{l(c) \cdot l(m)}{v(m/c)} = \frac{9}{0.2} = 45с = 0.75хв \quad (2.16)$$

Визначимо час одного циклу роботи:

$$t_{цикл} = t_{підйом} + t_{пауза} = 45 + 135 = 180сек = 3хв \quad (2.17)$$

Тривалість робочого циклу (робота + пауза) = 180сек = 3хв, що не перевищує допустимої норми при виборі двигуна. За даних понад 10 хвилин двигун вибирають і як для тривалого режиму роботи. Тривалість усіх операцій (4-х циклів роботи):

$$\begin{aligned} t_p + t_n + t_p + t_n + t_p + t_n + t_p + t_n &= 45 + 135 + 45 + 135 + 45 + 135 + 45 + 135 = \\ &= 180 + 180 + 180 + 180 = 360 + 360 = 720сек \end{aligned} \quad (2.18)$$

За переліченими вище формулами, визначимо значення статичної потужності P_c на валу двигуна для всіх робочих операцій, після чого можна побудувати навантажувальну діаграму механізму, показану на малюнку 4 для механізму підйому.

За допомогою цієї діаграми знаходимо еквівалентну за сумарний час робочих операцій статичну потужність $P_{c\text{ экв}}$, кВт, приведену до найближчої стандартної тривалості увімкнення $PВ_{ном}$ (якщо $PВ_{расч}$ не дорівнює $PВ_{ном}$), за формулою:

$$P_{c.екв} = \sqrt{\frac{\sum P_{ci}^2 \cdot t_{p.i} \cdot \frac{ПВ_{розр}}{ПВ_{ном}}}{\sum t_{p.i}}} \quad (2.19)$$

$$P_{c.екв} = \sqrt{\frac{P_{c\uparrow G}^2 \cdot t_{\uparrow G} + P_{c\downarrow G}^2 \cdot t_{\downarrow G} + P_{c\uparrow G0}^2 \cdot t_{\uparrow G0} + P_{c\downarrow G0}^2 \cdot t_{\downarrow G0}}{t_{\uparrow G} + t_{\downarrow G} + t_{\uparrow G0} + t_{\downarrow G0}}} \cdot \frac{ПВ_{розр}}{ПВ_{ном}}$$



Рисунок 2.2 – Навантажувальна діаграма підйомного механізму

$$P_{c.екв} = \sqrt{\frac{32.993^2 \cdot 45 + 16.4975^2 \cdot 45 + 16.4975^2 \cdot 45 + 4.9^2 \cdot 45 + 4.41^2 \cdot 45}{45 + 45 + 45 + 45}} \cdot \frac{25}{25} = \sqrt{351.0459} = 18.7362 \text{ кВт} \quad (2.20)$$

Далі за каталогом обираємо двигун на потужність $P_{\text{дв}} P_{\text{ном}}$, кВт, при

$$P_{\text{ном}} P_{\text{дв}} \geq k_{\text{зан}} P_{c\text{ экв}}$$

де $k_{зан} = \text{от } 1,1 \text{ до } 1,4$ — коефіцієнт запасу, що враховує додаткове завантаження двигуна в періоди пуску та електричного гальмування. Вибираємо середнє значення коефіцієнта запасу:

$$k_{зан} = \frac{1,1+1,4}{2} = 1,25 \quad (2.21)$$

$$P_{дв} \geq k_{зан} \cdot P_{с.екв} = 1,25 \cdot 18,7362 = 23,4203 \text{ кВт}$$

Попередньо обраний двигун - МТФ412-8 має такі характеристики:

Таблиця 2.1 – Характеристики двигуна МТФ412-8

$P_{ном}$, кВт	26
$U_{фн}$, В	220
n_n , об/хв	715
M_M / M_H	2,5
Статор	
$\cos \varphi$ холостого ходу	0,08
$\cos \varphi$ ном	0,68
$I_{с.н.}$	71А
$I_{с.х}$	49,6 А
r_c	0,182 Ом
x_c	0,313 Ом
$E_{р.н}$	266 В
$I_{р.н}$	68 А
r_p	0.095 Ом

x_p	0,231 Ом
-------	----------

Коефіцієнт трансформації напруги: $ke = 2,03$

Момент інерції ротора – $3,0 \text{ кг м}^2$

Кутову швидкість вала двигуна знайдемо за формулою:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3.14 \cdot 715}{30} = \frac{2245.1}{30} = 74.8367 \text{ рад/с} \quad (2.22)$$

Номінальна кутова швидкість двигуна повинна $\omega_{ном}$, рад/с повинна відповідати заданій номінальній швидкості механізму $V_{ном}$, м/с та знаходиться за формулою (2.23).

$$\omega_{дв.расч} = \frac{V_{ном} \cdot i_p \cdot i_n}{R} \quad (2.23)$$

Звідси знайдемо передаточне число редуктора i_p

$$i_p = \frac{\omega_{дв.расч} \cdot R}{V_{ном} \cdot i_n} = \frac{74.8367 \cdot 0.1675}{0.4} = 31.3379 \quad (2.24)$$

Редуктор механізму підйому вибираємо, виходячи з розрахункової потужності, частоти обертання двигуна, передаточного числа і режиму роботи.

Потужність двигуна механізму підйому під час підйому номінального вантажу знайдена за формулою: $P_{c\uparrow G} = 32,9933 \text{ кВт}$.

Стандартизація кранів передбачає розподіл їх за режимами роботи механічного та електричного обладнання на чотири категорії: легкого, середнього (ПВ = 15-25% і h = 120-200), важкого і вельми важкого режиму роботи. У цьому випадку тривалість увімкнення електродвигуна 25%, а кількість увімкнень двигуна на годину h = 200. Отже, це середній режим роботи обладнання.

Редуктор механізму підйому вибираємо за каталогом Ц2-400 з такими характеристиками:

Частота обертання швидкохідного вала = 750 хв^{-1}

Загальне передавальне число = 32,42

Потужність на швидкохідному валу редуктора = 28,9 кВт Режим роботи середній.

2.2 Визначення параметрів розрахункової роботи

Максимальний натяг в канаті, що набігає на барабан, під час підйому вантажу визначимо за формулою:

$$S_{\max} = \frac{Q}{z \cdot \eta_{\text{пол}}} \quad (2.25)$$

Вантажопідйомність $Q = Q + G_0 = 12500 + 125 = 12625 \text{ кгс}$, кількість гілок, на яких висить вантаж $z=4$, ККД поліспата $\eta=0.98$.

$$1 \text{ кгс} = 9.80665 \text{ Н}$$

$$S_{\max} = \frac{Q}{z \cdot \eta_{\text{пол}}} = \frac{12625}{4 \cdot 0.98} = 3220.6633 \text{ кгс} = 31562.5 \text{ Н} \quad (2.26)$$

Канат обираємо за разривним зусиллям.

$$S_p \geq S_{\max} \cdot \eta_{\text{кан}} = 3220.6633 \cdot 5.5 = 17713.6482 \text{ кгс} = 173593.7519 \text{ Н} \quad (2.27)$$

де $\eta_{\text{кан}}$ - коефіцієнт запасу міцності каната з даних для розрахунків. Під час вибору каната візьмемо до уваги той факт, що канати з пасмами ЛК, які працюють на блоках і барабанах з напівкруглою канавкою, довговічніші в 1,5...2 рази, ніж канати з пасмами ТК.

Обираємо канат сталевий подвійного звивання, типу ЛК-3, конструкції $6 \times 25(1+6; 6+12)+1$, діаметром $d = 17,5 \text{ мм}$ за розрахункової межі к міцності дротів $\sigma = 200 \text{ кгс/мм}^2$, площею перетину всіх дротів $F_k = 114.58 \text{ мм}^2$ і з разривним зусиллям $S = 18600 \text{ кгс} = 182280 \text{ Н}$.

Жорсткість канатів при підйомі и опусканні вантажів залежить від модуля пружності матеріалу каната і визначається за формулою:

$$C = \frac{\pi \cdot E \cdot d_k^2 \cdot n}{4 \cdot l} \quad (2.28)$$

де E – модуль пружності (Юнга), для сталі може бути прийнятий рівним $20 \cdot 10^{10}$ Па; n - кількість канатів у поліспасти; l - довжина випущеного кінця каната для якої визначається жорсткість, м, d_k - діаметр каната, м.

$$C = \frac{\pi \cdot E \cdot d_k^2 \cdot n}{4 \cdot l} = \frac{3.14 \cdot 20 \cdot 10^{10} \cdot 0.0175^2 \cdot 4}{4 \cdot 9} = 21.37 \text{ МПа} \quad (2.29)$$

Тепер враховуючи, що загальне передавальне число редуктора = 32,42 і те, що його швидкохідний вал обертається зі швидкістю обертання вала обраного двигуна $\omega = 74,8367$ рад/с, знайдемо кутову швидкість тихохідного вала редуктора:

$$\omega_{ред} = \frac{\omega_{вал.двигуна}}{i_{ред}}$$

$$\omega_{ред} = \frac{\omega_{вал.двигуна}}{i_{ред}} = \frac{74.8367}{32.42} = 2.3084 \text{ рад / с} \quad (2.30)$$

За кутовою швидкістю обертання барабана знайдемо лінійну швидкість руху першої гілки каната в поліспасти:

$$V_{кан} = \omega_{ред} \cdot R_{бар}$$

$$V_{кан} = \omega_{ред} \cdot R_{бар} = 2.3084 \cdot (0.335 / 2) = 0.3867 \text{ м / сек} \quad (2.31)$$

Знаючи, за умовою, передавальне число поліспасти, знайдемо лінійну (реальну) швидкість підйому (опускання) вантажу в сталому режимі:

$$V_{підйому.вант} = \frac{V_{кан}}{i_{поліспасти}} = \frac{0.3867}{2} = 0.1934 \text{ м / с} \approx 0.19 \text{ м / сек} \quad (2.32)$$

Статичний момент, приведений до вала двигуна механізму підйому, у сталому режимі роботи підйому вантажу визначається згідно із залежністю (2.33):

$$M_{c\uparrow G} = \frac{(G + G_0) \cdot D}{2 \cdot i_p \cdot i_n \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол}} H \cdot м \quad (2.33)$$

де вага вантажу $G = m \cdot g$

$G = m \cdot g = 12500 \cdot 9.8 = 122500H$ (у системі СІ), вага гака з блоком або вантажозахоплювального пристосування $G_0 = m_0 \cdot g$ з формули: $G_0 = m_0 \cdot g = 125 \cdot 9.8 = 1225H$; η - загальний ККД підйомного механізму, який визначається за кривими; $D = 0,335м$ – діаметр барабана підйомної лебідки, i_p - передавальне число редуктора, i_n - передавальне число поліспасти, mex - загальний ККД підйомного механізму, $пол$ - ККД здвоєного поліспасти.

$$\begin{aligned} M_{c\uparrow G} &= \frac{(G + G_0) \cdot D}{2 \cdot i_p \cdot i_n \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол}} = \frac{(122500 + 1225) \cdot 0.335}{2 \cdot 32.42 \cdot 2 \cdot 0.75 \cdot 0.98} = \\ &= 434.8525H \cdot м \end{aligned} \quad (2.34)$$

Під час опускання важких і середніх вантажів у режимі гальмування (гальмівний спуск), статичний момент, приведений до вала двигуна механізму підйому, у процесі сталої роботи підраховуємо за формулою:

$$\begin{aligned} M_{c\downarrow G} &= \frac{(G + G_0)D}{2 \cdot i_p \cdot i_n} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол} \\ M_{c\downarrow G} &= \frac{(G + G_0)D}{2 \cdot i_p \cdot i_n} \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол} = \frac{(122500 + 1225) \cdot 0.335}{2 \cdot 32.42 \cdot 2} \cdot 0.75 \cdot 0.98 = \\ &= 234.9182H \cdot м \end{aligned} \quad (2.34)$$

Статичний момент, приведений до валу двигуна механізму підйому в усталеному режимі роботи підйому, але вже без вантажу визначаємо:

$$\begin{aligned} M_{c\uparrow G_0} &= \frac{(G + G_0) \cdot D}{2 \cdot i_p \cdot i_n \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол}} = \frac{(0 + 1225) \cdot 0.335}{2 \cdot i_p \cdot i_n \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{пол}} = \\ &= 4.3055H \cdot м \end{aligned} \quad (2.35)$$

При опусканні вантажозахоплювального пристрою в режимі гальмування (гальмівний спуск) статичний момент, приведений до вала двигуна:

$$M_{c \downarrow G_0} = \frac{(G + G_0)D}{2 \cdot i_p \cdot i_n} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{пол}} = \frac{(0 + 1225) \cdot 0.335}{2 \cdot 32.42 \cdot 2} \cdot 0.75 \cdot 0.98 = \quad (2.36)$$

$$= 2.3259 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

За наявними даними побудуємо навантажувальну діаграму механізму підйому (рис.2.4) – залежність моменту, приведенного до валу двигуна, до часу.

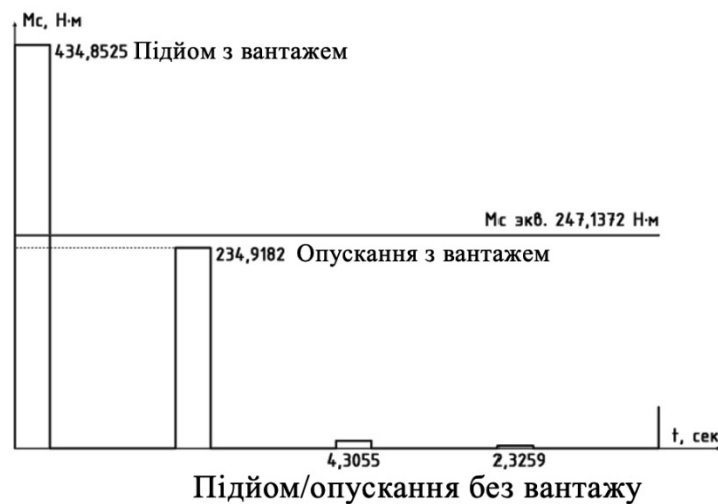


Рисунок 2.4 – Навантажувальна діаграма механізму підйому

Визначимо середньоквадратичний (еквівалентний) момент навантаження за дійсної тривалості увімкнення (22%):

$$M_{с.екв} = \sqrt{\frac{M_{c1}^2 \cdot t_1 + M_{c2}^2 \cdot t_2 + M_{c3}^2 \cdot t_3 + M_{c4}^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.37)$$

$$M_{с.екв} = \sqrt{\frac{434.8525^2 \cdot 45 + 234.9182^2 \cdot 45 + 4.3055^2 \cdot 45 + 2.3259^2 \cdot 45}{45 + 45 + 45 + 45}} = \quad (2.38)$$

$$= \sqrt{61076.8012} = 247.1372 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Найближча каталожна тривалість увімкнення $PВ_{ном}=25\%$.
Перерахуємо $M_{екв}$ до цього значення:

$$M_{с.ПВ,ном} = M_{с.ПВ,ном} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{фактичне}}{ПВ_{номінальне}}}, Н \cdot м$$

$$M_{с.ПВ,ном} = M_{с.ПВ,ном} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{фактичне}}{ПВ_{номінальне}}} = 247.1372 \cdot \sqrt{\frac{25}{25}} = \quad (2.39)$$

$$= 247.1372 \cdot \sqrt{1} = 247.1372 \cdot 1 = 247.1372 Н \cdot м$$

Механічна частина електромеханічної системи містить у собі всі пов'язані рухомі маси: двигуна (ротора), передавального пристрою (редуктора) і виконавчого механізму машини (поліспасти). До ротора двигуна за швидкості докладено електромагнітний момент M , під дією якого механічна частина приводиться в рух і на робочому органі машини здійснюється передбачена технологією механічна робота. Складемо кінематичну (рис 2.5) і розрахункову (рис 2.6) схеми механічної частини електроприводу.

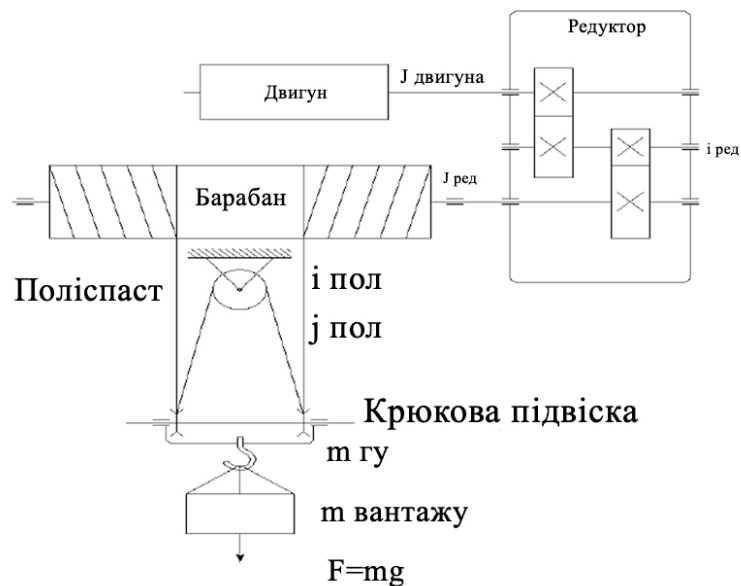


Рисунок 2.5 – Кінематична схема

Умовою відповідності наведеної розрахункової схеми реальній механічній системі є виконання закону збереження енергії. Під час приведення необхідно забезпечити збереження запасу кінетичної та потенційної енергії системи, а також елементарної роботи всіх сил і

моментів, що діють у системі, на можливих переміщеннях. Відповідно під час приведення моменту інерції елемента системи, що рухається обертально зі швидкістю ω , або маси, яка поступально рухається зі швидкістю V_j , до розрахункової швидкості мають виконуватися умови:

$$(W_k) = \frac{m_{\text{вантаж}} \cdot V_{\text{вантаж}}^2}{2} = \frac{J'_{\text{вантаж}} \cdot \omega_{\text{двигун}}^2}{2} \quad (2.40)$$

Звідси знайдемо приведений до валу двигуна момент інерції вантажозахоплюючого пристрою з номінальним вантажем

$$J'_{\text{вантаж.ном}} = \frac{m_{\text{вантаж}} \cdot V_{\text{вантаж}}^2}{\omega_{\text{двигун}}^2} \quad (2.41)$$

$$J'_{\text{вантаж.ном}} = \frac{m_{\text{вантаж}} \cdot V_{\text{вантаж}}^2}{\omega_{\text{двигун}}^2} = \frac{12625 \cdot 0.1934^2}{74.8367^2} = 0.0843 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.42)$$

Приведений до валу двигуна момент інерції вантажозахоплювального пристрої без вантажу

$$J'_{\text{вантаж}0} = \frac{m_{\text{вантаж}} \cdot V_{\text{вантаж}}^2}{\omega_{\text{вантаж}}^2} = \frac{125 \cdot 0.1934^2}{74.8367^2} = 0.0008 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.43)$$

Під час розрахунків моменти інерції частин системи (шестерень редуктора, гальмівних дисків та ін.), що обертаються з кутовими швидкостями $\omega \approx \omega_{\text{двигуна}}$, часто не визначають, оскільки їхні величини відносно мало позначаються на значенні $J'_{\text{гр}}$.

Зазвичай їх вплив враховується введенням в формулу для визначення J_{Σ} коефіцієнта $k = 1.15 - 1.2$ т.е.

$$J_{\Sigma} = kJ_{\text{двигуна}} + J'_{\text{гр}} \quad (2.44)$$

$$J_{\Sigma G} = kJ_{\text{двигуна}} + J'_{\text{вантаж.ном}} = 1.2 \cdot 3 + 0.0843 = 3.6843 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.45)$$

$$J_{\Sigma G0} = kJ_{\text{двигуна}} + J'_{\text{вантаж}0} = 1.2 \cdot 3 + 0.0008 = 3.6008 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.46)$$

За даними умови розрахунків максимально допустиме прискорення (уповільнення) підйому (опускання) вантажу $0,25 \text{ м/с}^2$. Враховуючи, що коефіцієнт запасу $k=25\%$, подальші розрахунки здійснюватимемо, враховуючи значення максимально допустимого прискорення з урахуванням цього коефіцієнта. $100-25=75\%$. Складемо систему: $0,25 \text{ м/с}^2 - 100\%$; $a - 75\%$. Звідси будемо мати:

$$a = \frac{0,25 \cdot 75}{100} = \frac{18,75}{100} = 0,1875 \text{ м/с}^2 \quad (2.47)$$

Знаючи, за умовою, передавальне число поліспасти і прискорення підйому вантажу, знайдемо лінійне прискорення гілки каната поліспасти:

$$a_{\text{кан}} = a_{\text{підьом.вантаж}} \cdot i_{\text{поліспасти}} = 0,1875 \cdot 2 = 0,375 \text{ м/сек}^2 \quad (2.48)$$

За лінійним прискоренням руху першої гілки каната в поліспата та радіусом барабана знайдемо кутове прискорення обертання барабану:

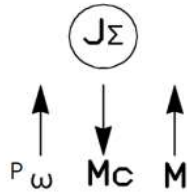
$$\xi_{\text{бар}} = \frac{a_{\text{кан}}}{R_{\text{бар}}} = \frac{0,375}{0,1675} = 2,2388 \text{ рад/сек}^2 \quad (2.49)$$

Оскільки кутове прискорення обертання барабана дорівнює кутовому прискоренню обертання тихохідного валу редуктора, то за передавальним числом редуктора знайдемо кутове прискорення обертання двигуна:

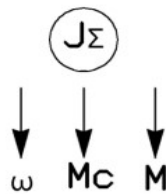
$$\xi_{\text{двигуна}} = \xi_{\text{барабан}} \cdot i_{\text{редуктор}} = 2,2388 \cdot 32,42 = 72,5819 \text{ рад/сек}^2 \quad (2.50)$$

У цьому випадку параметри системи такі, що вплив пружних зв'язків незначний і цим впливом можна нехтувати, тому механічна частина є найпростішою розрахунковою схемою (рис 2.6), яка не враховує впливу пружних зв'язків, - жорсткою наведеною ланкою. У цьому разі багато масова механічна частина електроприводу замінюється однією еквівалентною масою з моментом інерції J_{Σ} , на яку впливають електромагнітний момент двигуна M і сумарний приведений до валу двигуна момент навантаження M_C .

Момент навантаження M_c містить у собі всі зовнішні сили, прикладені до механічної системи, крім моменту двигуна M .



Риснок 2.6 А – Підйом гака: вектор швидкості спрямований вгору, статичний момент спрямований донизу, момент двигуна спрямований догори.



Риснок 2.6 Б – Опускання гака: вектор швидкості спрямований донизу, статичний момент спрямований вниз, момент двигуна спрямований вниз.

Для побудови точнішої навантажувальної діаграми (з урахуванням пускових і гальмівних моментів) використовуємо основне рівняння руху електропривода:

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (2.51)$$

Звідси будемо мати:

$$\begin{aligned} M_{\text{пуску}\uparrow G} &= J_{\Sigma G} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\uparrow G} = 3.6843 \cdot 72.5819 + 434.8525 = \\ &= 702.266 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{гальм}\uparrow G} &= -J_{\Sigma G} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\uparrow G} = -3.6843 \cdot 72.5819 + 434.8525 = \\ &= 167.439 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{пуску}\downarrow G} &= -J_{\Sigma G} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\downarrow G} = -3.6843 \cdot 72.5819 + 234.9182 = \\ &= 502.3317 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{гальм}\downarrow G0} &= J_{\Sigma G0} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\downarrow G0} = 3.6843 \cdot 72.5819 + 234.9182 = \\ &= 502.3317 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$M_{\text{пуску}\uparrow G0} = J_{\sum G0} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\uparrow G0} = 3.6008 \cdot 72.5819 + 4.3055 = 265.6584 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.56)$$

$$M_{\text{гальм}\uparrow G0} = -J_{\sum G0} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\uparrow G0} = -3.6008 \cdot 72.5819 + 4.3055 = -257.0474 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.57)$$

$$M_{\text{пуску}\downarrow G0} = J_{\sum G0} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\downarrow G0} = -3.6008 \cdot 72.5819 + 2.3259 = -259.027 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.58)$$

$$M_{\text{гальм}\downarrow G0} = J_{\sum G0} \cdot \xi_{\text{двигуна}} + M_{c\downarrow G0} = 3.6008 \cdot 72.5819 + 2.3259 = 263.6788 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.59)$$

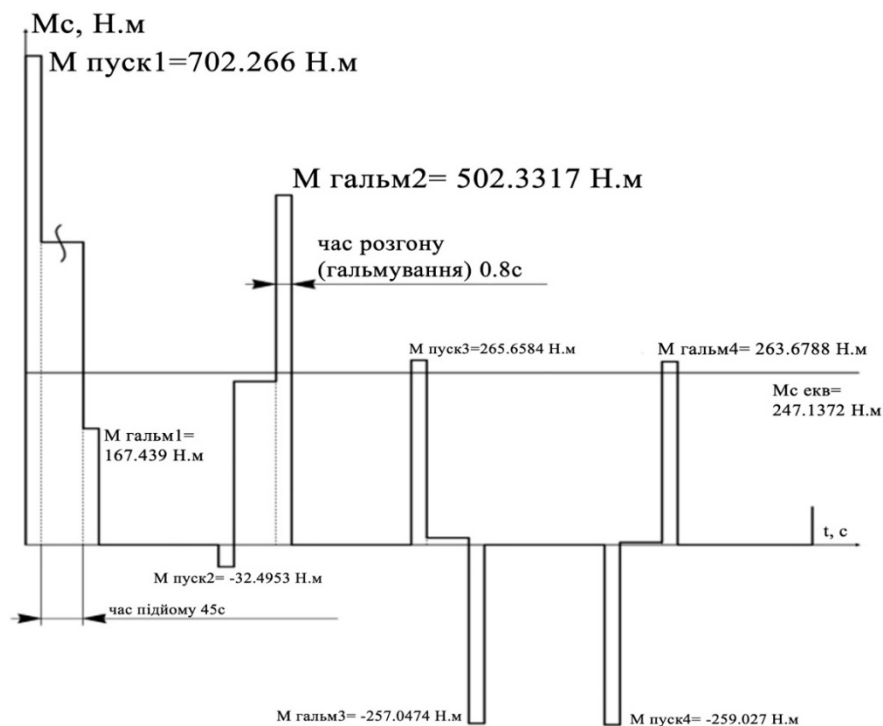


Рисунок 2.7 – Діаграма навантаження з урахуванням пускових і гальмівних моментів

2.3 Перевірка правильності вибраного двигуна

Після попереднього вибору електродвигуна його треба перевірити за умовами нагрівання і за перевантажувальною здатністю. Остаточну перевірку обраного двигуна за нагріванням виконують за умовою

$$M_{\text{НОМ}} \geq M_{c.\text{екв}}, \text{ де } M_{\text{НОМ}} - \text{номінальний момент двигуна при } ПВ_{\text{НОМ}}.$$

$$M_n = 1.05 \frac{P_n}{\omega_n}$$

$$M_n = 1.05 \frac{P_n}{\omega_n} = 1.05 \cdot \frac{26000}{74.8367} = 364.7943 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.60)$$

$$M_n = 364.7943 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq M_{с.екв.при.ПВ_{ном}} = 247.1372 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Практика розрахунків показує, що якщо відношення $\frac{\sum t_{y_i}}{\sum t_{n_i} \sum t_{m_i}} \leq 10$, то впливом динамічних навантажень на нагрівання двигуна можна знехтувати, тобто за умовами нагрівання попередній вибір двигуна в цих випадках буде і остаточним. Зазвичай це має місце для двигунів механізмів підйому і пересування візків. Навпаки, для двигунів механізмів пересування мостів динамічні навантаження суттєво впливають на нагрівання двигуна.

$$\frac{\sum t_{y_i}}{\sum t_{n_i} \sum t_{m_i}} \leq 10 = \frac{45 \cdot 4}{0.8 \cdot 4 + 0.8 \cdot 4} = 28.125 \leq 10 \quad (2.61)$$

Обраний за умовами нагрівання двигун перевіряємо за умовами допустимого короткочасного перевантаження і надійності пуску.

Пусковий і критичний моменти асинхронного двигуна пропорційні квадрату напруги мережі. З огляду на можливе зниження напруги мережі до $0,9U_{ном}$, під час розрахунків слід брати 0.8 перевантажувальної здатності, наведеної в каталогах.

Двигун задовольняє вимогам щодо допустимого перевантаження, якщо виконується умова:

$$0.8 \cdot \lambda \cdot M_{ном} \geq M_{с.мах}$$

$$0.8 \cdot \lambda \cdot M_{ном} = 0.8 \cdot 2.5 \cdot 364.7943 = 729.5886 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.62)$$

$$0.8 \cdot \lambda \cdot M_{ном} = 729.5886 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq M_{с.мах} = 434.8525 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де $M_{с.мах}$ - максимальне значення статичного моменту на валу двигуна, можливе під час експлуатації та випробувань крана; λ – перевантажувальна здатність двигуна; 0,8 - коефіцієнт, що враховує для асинхронних двигунів зниження напруги мережі на 10%.

Умова:

$$\begin{aligned}
 M_{\max \text{ дод}} &= \lambda \cdot M_{\text{ном}} \geq M_{\text{с.макс}} \\
 M_{\max \text{ дод}} &= \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 2.5 \cdot 364.7943 = 911.9857 \text{ Н} \cdot \text{м} \\
 M_{\max \text{ дод}} &= \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 911.9857 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq M_{\text{с.макс}} = 434.8525 \text{ Н} \cdot \text{м}
 \end{aligned} \tag{2.63}$$

У будь-якому разі обраний двигун задовольняє вимогам щодо допустимого перевантаження

Отже, двигун обрано вірно.

Заключним етапом перевірки обраного двигуна є оцінка прискорень і уповільнень механізму під час пуску та гальмування приводу.

Максимальне значення середнього за період пуску (гальмування) лінійного прискорення (уповільнення) механізму $a_{\text{ср макс}}$, м/с^2 , визначається за формулою:

$$a_{\text{ср макс}} = \frac{V_y}{t_{n(m)\text{min}}} \tag{2.64}$$

де $t_{n(m)\text{min}}$ - найменший можливий у циклі роботи час пуску (гальмування) механізму за обраного двигуна, с; величину $t_{n(m)\text{min}}$ можна визначити за формулою: $t_{n(m)i} \approx \frac{J_{\Sigma} \omega_{\text{с.і}}}{M_{n(m)\text{ср.і}} \pm M_{\text{с.і}}}$, де J_{Σ} - приведений до валу двигуна момент інерції приводу. V_y - значення сталої швидкості, до якої розганяється або з якою гальмується механізм, м/с.

$$\begin{aligned}
 t_{n(m)\text{min}} &= \frac{V_y}{a_{\text{розр. дод}}} = \frac{0.1934}{0.1875} = 1.0315 \text{ с} \\
 t_{n(m)\text{ср}} &= \frac{t_{n(m)\text{min}} + t_{n(m)\text{макс}}}{2} = \frac{1.0315 + 0.8}{2} = 0.9158 \text{ с} \\
 a_{\text{ср макс}} &= \frac{V_y}{t_{n(m)\text{ср}}} = \frac{0.1934}{0.9158} = 0.2112 \text{ м/с}^2
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

Двигун задовольняє вимогам, якщо дотримується співвідношення:
 $a_{cp\max} \leq a_{\text{доо}}$, де $a_{\text{доо}}$ - максимально допустиме прискорення (уповільнення)
 механізму, m/c^2 .

$$a_{cp\max} = 0.212m/c^2 \leq a_{\text{доо}} = 0.25m/сек^2 \quad (2.66)$$

Висновки по 2 розділу:

1. В даному розділі було виконано вибір двигуна за результатами обрахунків. Попередньо обраний двигун - МТФ412-8. Даний двигун проходить за умовами нагрівання і за перевантажувальною здатністю

2. Для механізмів підйому мостових кранів $a_{\text{доо}} = (0,2-0,3)m/сек^2$.

У разі невиконання умови $a_{cp\max} \leq a_{\text{доо}}$ привід механізму крана працюватиме з надмірно великими динамічними моментами, що спричинить удари в механічних передачах, розгойдування вантажів і підвищене зношування обладнання.

З іншого боку, прискорення (уповільнення) механізмів не повинні бути меншими за певні значення, щоб процеси пуску і гальмування не затягувалися. Тут орієнтиром може слугувати максимально допустимий час пуску, який для механізмів підйому лежить у межах 3-5 сек.

РОЗДІЛ 3

3.1 Розрахунок перехідних процесів механізму підйому вантажів

Для отримання розрахунків перехідних процесів механізму необхідною умовою для початку є визначення синхронної швидкості двигуна.

Синхронна швидкість двигуна:

$$\omega_c = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad (3.3)$$

$$\omega_c = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{4} = \frac{6.28 \cdot 50}{4} = \frac{314}{4} = 78.5 \text{ рад / с} \quad (3.4)$$

Розрахунок жорсткостей:

$$\beta_1 = \frac{2 \cdot M_{c \max}}{\omega_c \cdot S_{k1}} = \frac{2 \cdot 434.8525}{78.5 \cdot 1.1271962} = \frac{869.705}{88.4849017} = 9.8288516 \quad (3.5)$$

$$\beta_2 = \frac{2 \cdot M_{c \max}}{\omega_c \cdot S_{k2}} = \frac{2 \cdot 434.8525}{78.5 \cdot 0.8138601} = \frac{869.705}{63.888017} = 13.61296$$

$$\beta_3 = \frac{2 \cdot M_{c \max}}{\omega_c \cdot S_{k3}} = \frac{2 \cdot 434.8525}{78.5 \cdot 0.587625} = 18.853949$$

$$\beta_4 = \frac{2 \cdot M_{c \max}}{\omega_c \cdot S_{k4}} = \frac{2 \cdot 434.8525}{78.5 \cdot 0.424278} = 26.112719 \quad (3.6)$$

$$\beta_e = \frac{2 \cdot M_{c \max}}{\omega_c \cdot S_{ke}} = \frac{2 \cdot 434.8525}{78.5 \cdot 0.3063377} = 36.166116$$

Розрахунок електромагнітних постійних часу:

$$T_{e1} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot S_{k1}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 1.1271962} = 0.002825$$

$$T_{e2} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot S_{k2}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.8138601} = 0.003913$$

$$T_{e3} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot S_{k3}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.587625} = 0.005420 \quad (3.7)$$

$$T_{e4} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot S_{k4}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.424278} = 0.007506$$

$$T_{ee} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot S_{ke}} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 0.3063377} = 0.010396$$

Розрахунок механічних постійних: рух із вантажем:

$$\begin{aligned}
 T_{.m1G} &= \frac{J_{\Sigma G}}{\beta_1} = \frac{3.6843}{9.8288516} = 0.374845 \\
 T_{.m2G} &= \frac{J_{\Sigma G}}{\beta_2} = \frac{3.6843}{13.61296} = 0.270647 \\
 T_{.m3G} &= \frac{J_{\Sigma G}}{\beta_3} = \frac{3.6843}{18.853949} = 0.195413 \\
 T_{.m4G} &= \frac{J_{\Sigma G}}{\beta_4} = \frac{3.6843}{26.112719} = 0.141092 \\
 T_{.meG} &= \frac{J_{\Sigma G}}{\beta_e} = \frac{3.6843}{36.166116} = 0.010396
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Рух без вантажу:

$$\begin{aligned}
 T_{.m1G0} &= \frac{J_{\Sigma G0}}{\beta_1} = \frac{3.6008}{9.8288516} = 0.36635002 \\
 T_{.m2G0} &= \frac{J_{\Sigma G0}}{\beta_2} = \frac{3.6008}{13.61296} = 0.26451265 \\
 T_{.m3G0} &= \frac{J_{\Sigma G0}}{\beta_3} = \frac{3.6008}{18.853949} = 0.19098386 \\
 T_{.m4G0} &= \frac{J_{\Sigma G0}}{\beta_4} = \frac{3.6008}{26.112719} = 0.13789449 \\
 T_{.meG0} &= \frac{J_{\Sigma G0}}{\beta_e} = \frac{3.6008}{36.166116} = 0.09956281
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Час перехідного процесу: підйом із вантажем:

$$\begin{aligned}
t_{1\uparrow G} &= T_{m1G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G}}{M_2 - M_{c\uparrow G}}\right) = 0.374845 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 434.8525}{547.1515 - 434.8525}\right) = \\
&= 0.374845 \cdot 1.021381 = 0.382861 \\
t_{2\uparrow G} &= T_{m2G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G}}{M_2 - M_{c\uparrow G}}\right) = 0.270647 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 434.8525}{547.1515 - 434.8525}\right) = \\
&= 0.270647 \cdot 1.021381 = 0.276434 \\
t_{3\uparrow G} &= T_{m3G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G}}{M_2 - M_{c\uparrow G}}\right) = 0.195413 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 434.8525}{547.1515 - 434.8525}\right) = \\
&= 0.195413 \cdot 1.021381 = 0.199592 \\
t_{4\uparrow G} &= T_{m4G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G}}{M_2 - M_{c\uparrow G}}\right) = 0.141092 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 434.8525}{547.1515 - 434.8525}\right) = \\
&= 0.141092 \cdot 1.021381 = 0.144109 \\
t_{e\uparrow G} &= T_{meG} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G}}{M_2 - M_{c\uparrow G}}\right) = 0.101872 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 434.8525}{547.1515 - 434.8525}\right) = \quad (3.11) \\
&= 0.101872 \cdot 1.021381 = 0.104050
\end{aligned}$$

Опускання з вантажем:

$$\begin{aligned}
t_{1\downarrow G} &= T_{m1G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G}}{M_2 - M_{c\downarrow G}}\right) = 0.374845 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 234.9182}{547.1515 - 234.9182}\right) = \\
&= 0.374845 \cdot 0.494167 = 0.185237 \quad (3.12)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{2\downarrow G} &= T_{m2G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G}}{M_2 - M_{c\downarrow G}}\right) = 0.270647 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 234.9182}{547.1515 - 234.9182}\right) = \\
&= 0.270647 \cdot 0.494167 = 0.133745
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{3\downarrow G} &= T_{m3G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G}}{M_2 - M_{c\downarrow G}}\right) = 0.195413 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 234.9182}{547.1515 - 234.9182}\right) = \\
&= 0.195413 \cdot 0.494167 = 0.096567
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{4\downarrow G} &= T_{m4G} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G}}{M_2 - M_{c\downarrow G}}\right) = 0.141092 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 234.9182}{547.1515 - 234.9182}\right) = \quad (3.13) \\
&= 0.141092 \cdot 0.494167 = 0.069723
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
t_{e\downarrow G} &= T_{meG} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G}}{M_2 - M_{c\downarrow G}}\right) = 0.101872 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 234.9182}{547.1515 - 234.9182}\right) = \\
&= 0.101872 \cdot 0.494167 = 0.050342
\end{aligned}$$

Підйом без вантажу:

$$\begin{aligned}
t_{1\uparrow G0} &= T_{m1G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G0}}{M_2 - M_{c\uparrow G0}}\right) = 0.366350 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 4.3055}{547.1515 - 4.3055}\right) = \\
&= 0.366350 \cdot 0.313069 = 0.082811 \\
t_{2\uparrow G0} &= T_{m2G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G0}}{M_2 - M_{c\uparrow G0}}\right) = 0.264512 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 4.3055}{547.1515 - 4.3055}\right) = \\
&= 0.264512 \cdot 0.313069 = 0.082811 \\
t_{3\uparrow G0} &= T_{m3G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G0}}{M_2 - M_{c\uparrow G0}}\right) = 0.190983 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 4.3055}{547.1515 - 4.3055}\right) = \\
&= 0.190983 \cdot 0.313069 = 0.059791 \\
t_{4\uparrow G0} &= T_{m4G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G0}}{M_2 - M_{c\uparrow G0}}\right) = 0.137894 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 4.3055}{547.1515 - 4.3055}\right) = \\
&= 0.137894 \cdot 0.313069 = 0.043171 \\
t_{e\uparrow G0} &= T_{meG0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\uparrow G0}}{M_2 - M_{c\uparrow G0}}\right) = 0.099562 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 4.3055}{547.1515 - 4.3055}\right) = \quad (3.14) \\
&= 0.099562 \cdot 0.313069 = 0.031170
\end{aligned}$$

Опускання без вантажу:

$$\begin{aligned}
t_{1\downarrow G0} &= T_{m1G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G0}}{M_2 - M_{c\downarrow G0}}\right) = 0.366350 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 2.3259}{547.1515 - 2.3259}\right) = \\
&= 0.366350 \cdot 0.312091 = 0.114335 \quad (3.15) \\
t_{2\downarrow G0} &= T_{m2G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G0}}{M_2 - M_{c\downarrow G0}}\right) = 0.264512 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 2.3259}{547.1515 - 2.3259}\right) = \\
&= 0.264512 \cdot 0.312091 = 0.082553 \\
t_{3\downarrow G0} &= T_{m3G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G0}}{M_2 - M_{c\downarrow G0}}\right) = 0.190983 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 2.3259}{547.1515 - 2.3259}\right) = \\
&= 0.190983 \cdot 0.312091 = 0.059605 \\
t_{4\downarrow G0} &= T_{m4G0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G0}}{M_2 - M_{c\downarrow G0}}\right) = 0.137894 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 2.3259}{547.1515 - 2.3259}\right) = \quad (3.16) \\
&= 0.137894 \cdot 0.312091 = 0.043036 \\
t_{e\downarrow G0} &= T_{meG0} \cdot \ln\left(\frac{M_1 - M_{c\downarrow G0}}{M_2 - M_{c\downarrow G0}}\right) = 0.099562 \cdot \ln\left(\frac{746.71 - 2.3259}{547.1515 - 2.3259}\right) = \\
&= 0.099562 \cdot 0.312091 = 0.031073
\end{aligned}$$

Побудуємо перевірочну таблиця розрахунків характеристик перехідних процесів (табл. 3.2):

Таблиця 3.2 – Перевірочна таблиця з даними

$P_{ном} = 26000$	$r_{статора} = 0.182$	$M_M / M_{ном} = 2.5$	$\lambda = 1.385$
$n_{ном} = 715$	$x_{статора} = 0.313$	$p = 4$	$J_{\Sigma G} = 3.6843$
$ke=2.03$	$r_{ротора} = 0.095$	$\pi = 3.14$	$J_{\Sigma G0} = 3.6008$
$ki=2.03$	$x_{ротора} = 0.231$	$f = 50$	$s_e = 1.0000000$
$\omega_{ном} = 74.83667$	$x'_{ротора} = 0.951928$	$M_{ном} = 364.7944$	$s_{u4} = 1.0000000$
$\omega_c = 94.2$	$r'_{ротора} = 0.391486$	$M_{макс} = 911.9861$	$s_{u3} = 1.0000000$
$M_{c макс} = 434.8525$	$M_{неп} = 547.1515$	$q = 0.2848303$	$s_{u2} = 1.0000000$
$s_{k.e} = 0.306338$	$M_e = 540.4519$		$s_{u1} = 1.0000000$
$s_{k.u4} = 0.424278$	$M_4 = 679.6139$	$r_4 = 0.150722$	$R_{p4} = 0.542207$
$s_{k.u3} = 0.587625$	$M_3 = 809.4616$	$r_3 = 0.208750$	$R_{p3} = 0.750957$
$s_{k.u2} = 0.81386$	$M_2 = 895.3042$	$r_2 = 0.289119$	$R_{p2} = 1.040076$
$s_{k.u1} = 1.127196$	$M_1 = 906.2928$	$r_1 = 0.400429$	$R_{p1} = 1.440505$
$\beta_e = 30.13843$	$T_{ee} = 0.010396$	$T_{meG} = 0.122246$	$T_{meG0} = 0.11947537$
$\beta_4 = 21.7606$	$T_{4e} = 0.007506$	$T_{m4G} = 0.169311$	$T_{m4G0} = 0.16547338$
$\beta_3 = 15.71162$	$T_{3e} = 0.005420$	$T_{m3G} = 0.234495$	$T_{m3G0} = 0.22918064$
$\beta_2 = 11.34413$	$T_{2e} = 0.003913$	$T_{m2G} = 0.324776$	$T_{m2G0} = 0.31741518$
$\beta_1 = 8.19071$	$T_{1e} = 0.002825$	$T_{m1G} = 0.449815$	$T_{m1G0} = 0.43962003$
$t_{e\uparrow G} = 0.124860$	$T_{e\downarrow G} = 0.060410$	$t_{e\uparrow G0} = 0.037404$	$t_{e\downarrow G0} = 0.037287$
$t_{4\uparrow G} = 0.172931$	$T_{4\downarrow G} = 0.083668$	$t_{4\uparrow G0} = 0.051805$	$t_{4\downarrow G0} = 0.051643$
$t_{3\uparrow G} = 0.239510$	$T_{3\downarrow G} = 0.115880$	$t_{3\uparrow G0} = 0.071750$	$t_{3\downarrow G0} = 0.071750$
$t_{2\uparrow G} = 0.331721$	$T_{2\downarrow G} = 0.160494$	$t_{2\uparrow G0} = 0.099373$	$t_{2\downarrow G0} = 0.099063$
$t_{1\uparrow G} = 0.459434$	$T_{1\downarrow G} = 0.222285$	$t_{1\uparrow G0} = 0.137632$	$t_{1\downarrow G0} = 0.137202$

$step_4 = 1.203596$	$step_4 = 0.582327$	$Step_4 = 0.360559$	$Step_4 = 0.359434$
$step_3 = 1.030665$	$step_3 = 0.498659$	$Step_3 = 0.308755$	$Step_3 = 0.307791$
$step_2 = 0.791155$	$step_2 = 0.382779$	$Step_2 = 0.237005$	$Step_2 = 0.236265$
$step_1 = 0.459434$	$step_1 = 0.222285$	$Step_1 = 0.137632$	$Step_1 = 0.137202$

Параметр Step розраховується підсумовуванням часу перехідних процесів на певному етапі роботи механізму підйому.

Для підйому з вантажем:

$$Step_{1\uparrow G} = t_{1G} = 0.382861c$$

$$Step_{2\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} = 0.382861 + 0.276434 = 0.659296c$$

$$Step_{3\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} = 0.659296 + 0.199592 = 0.858887c$$

$$Step_{4\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} + t_{4G} = 0.858887 + 0.144109 = 1.002997c$$

Для опускання з вантажем:

$$Step_{1\downarrow G} = t_{1G} = 0.185237c$$

$$Step_{2\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} = 0.185237 + 0.133745 = 0.318982c$$

$$Step_{3\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} = 0.318982 + 0.096567 = 0.415549c$$

$$Step_{4\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} + t_{4G} = 0.415549 + 0.069723 = 0.485273c$$

Для підйому без вантажу:

$$Step_{1\uparrow G} = t_{1G} = 0.114693c$$

$$Step_{2\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} = 0.114693 + 0.082811 = 0.197504c$$

$$Step_{3\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} = 0.197504 + 0.059791 = 0.25729c$$

$$Step_{4\uparrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} + t_{4G} = 0.25729 + 0.043171 = 0.300466c$$

Для опускання без вантажу:

$$Step_{1\downarrow G} = t_{1G} = 0.114335c$$

$$Step_{2\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} = 0.114335 + 0.082553 = 0.196888c$$

$$Step_{3\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} = 0.196888 + 0.059605 = 0.256492c$$

$$Step_{4\downarrow G} = t_{1G} + t_{2G} + t_{3G} + t_{4G} = 0.256492 + 0.043036 = 0.299528c$$

Елементи *Transfer Fcn* заповнимо так: у чисельник заноситься жорсткість характеристики, у знаменник - електромагнітна постійна часу, що відповідає жорсткості.

$$\text{Transfer Fcn} = \frac{\beta}{T_e p + 1} = \frac{9.828851}{0.002825s + 1}$$

$$\text{Transfer Fcn1} = \frac{\beta}{T_e p + 1} = \frac{13.61296}{0.003913s + 1}$$

$$\text{Transfer Fcn2} = \frac{\beta}{T_e p + 1} = \frac{18.853949}{0.005420s + 1}$$

$$\text{Transfer Fcn3} = \frac{\beta}{T_e p + 1} = \frac{26.112719}{0.007506s + 1}$$

$$\text{Transfer Fcn4} = \frac{\beta}{T_e p + 1} = \frac{36.166116}{0.010396s + 1}$$

Графіки характеристик перехідних режимів побудовані далі на рисунках 3.6-3.17.

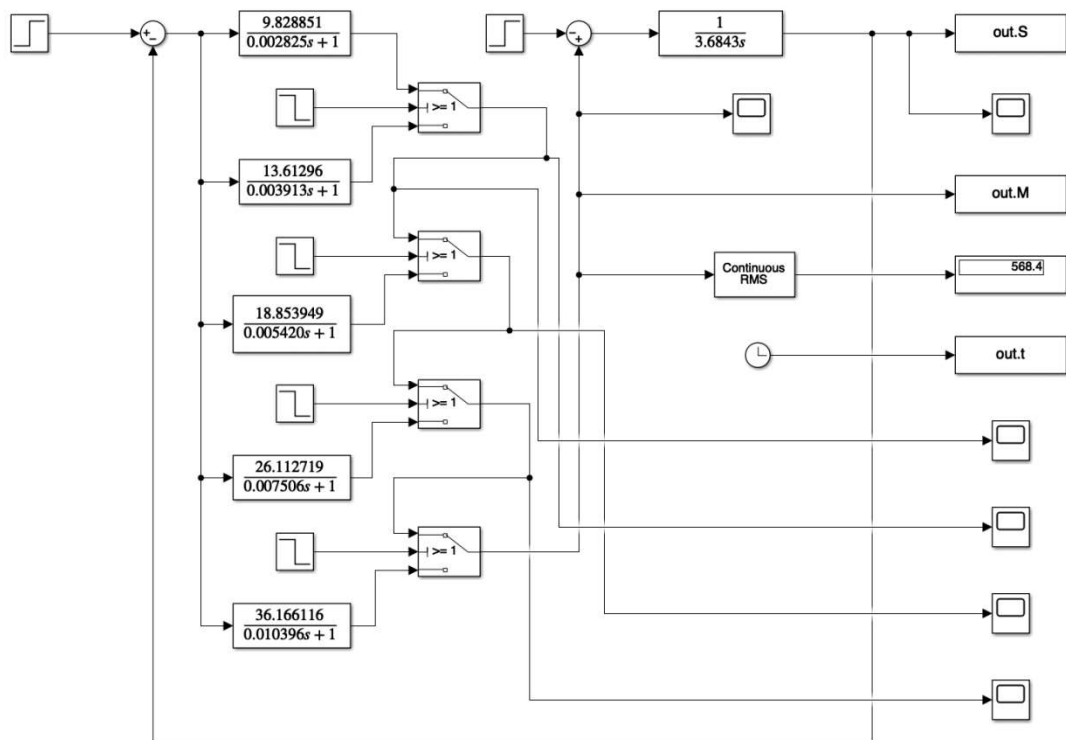


Рисунок 3.6 – Схема моделювання перехідних процесів за $M_c=434,8525 \text{ Н}\cdot\text{м}$

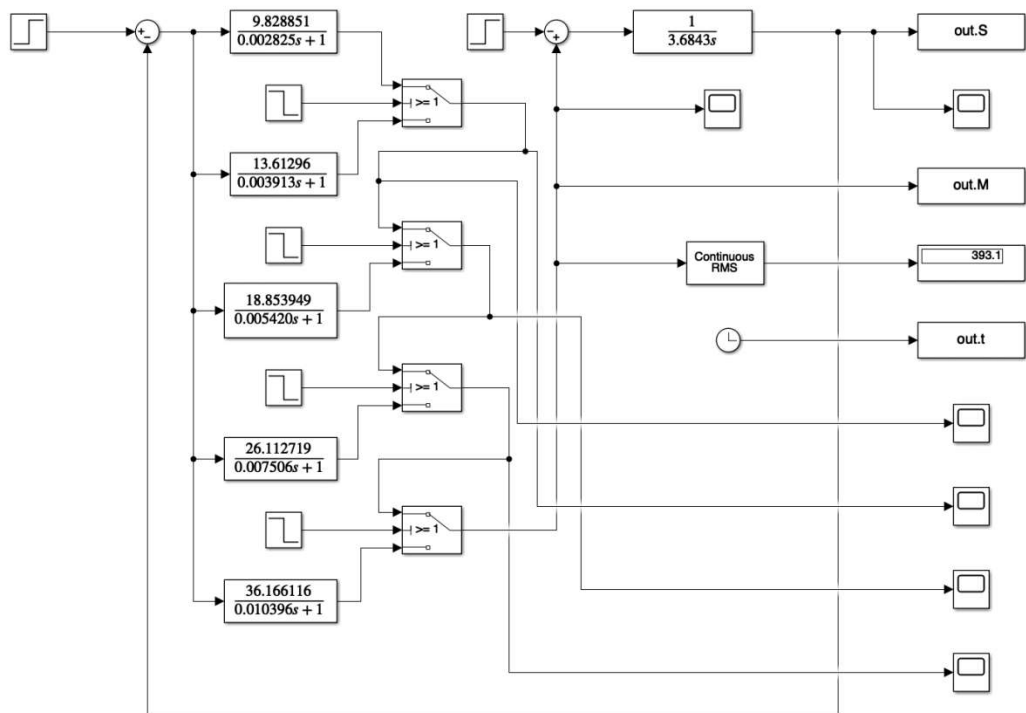


Рисунок 3.7 – Схема моделювання перехідних процесів за $M_c=234,9182\text{Н}\cdot\text{м}$

Було отримано графіки:

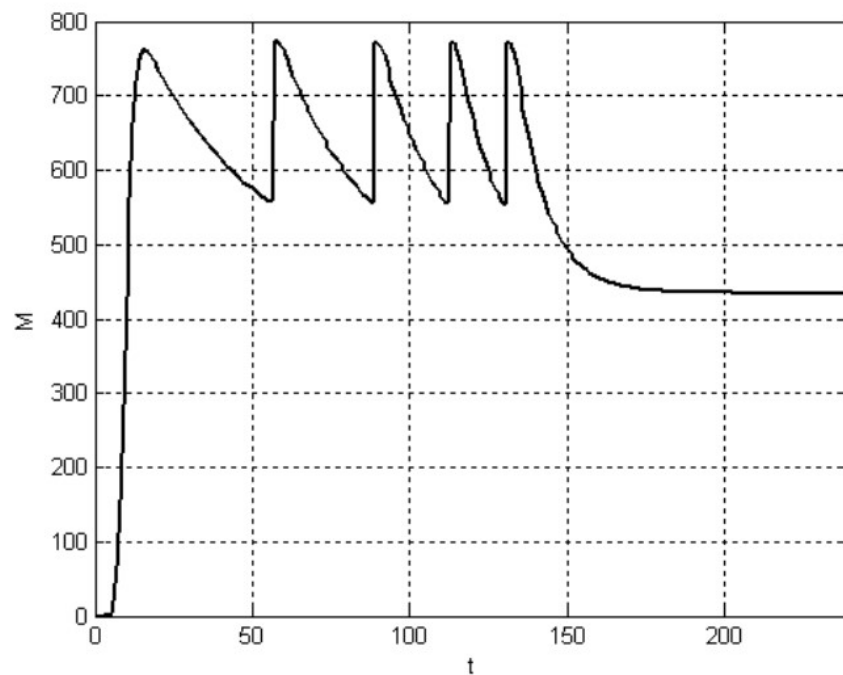


Рисунок 3.8 – Перехідний процес під час підйому з вантажем (момент від часу)

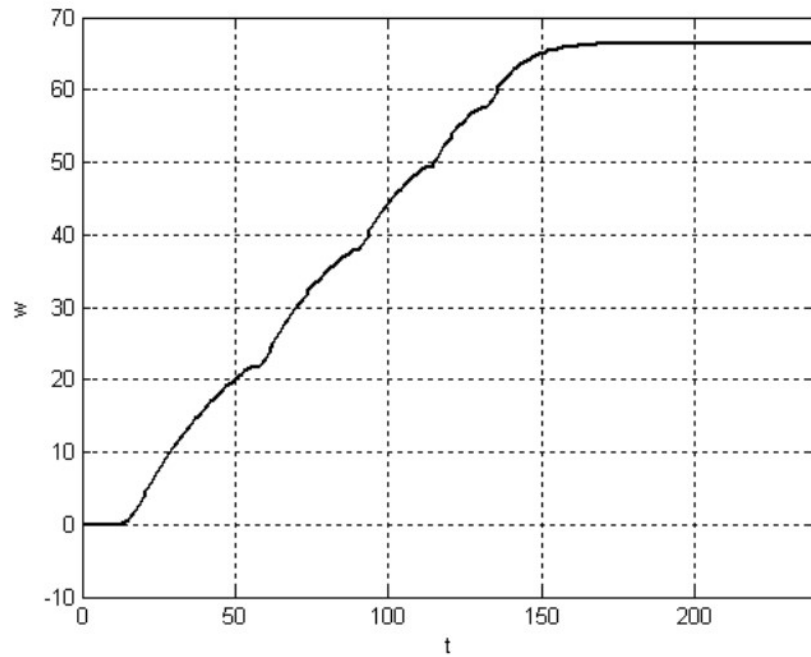


Рисунок 3.9 – Перехідний процес під час підйому з вантажем
(швидкість від часу)

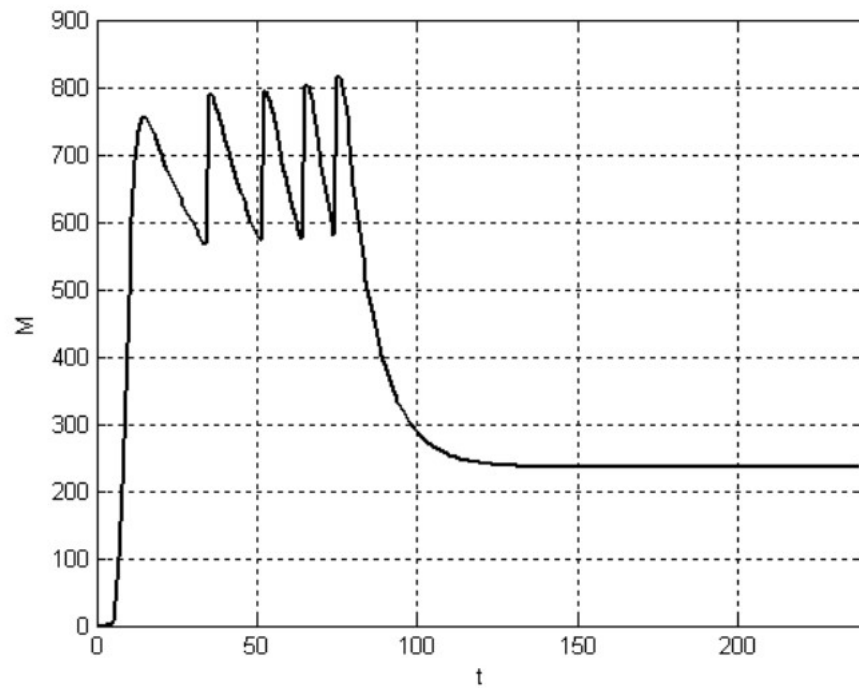


Рисунок 3.10 – Перехідний процес під час опускання з вантажем
(момент від часу).

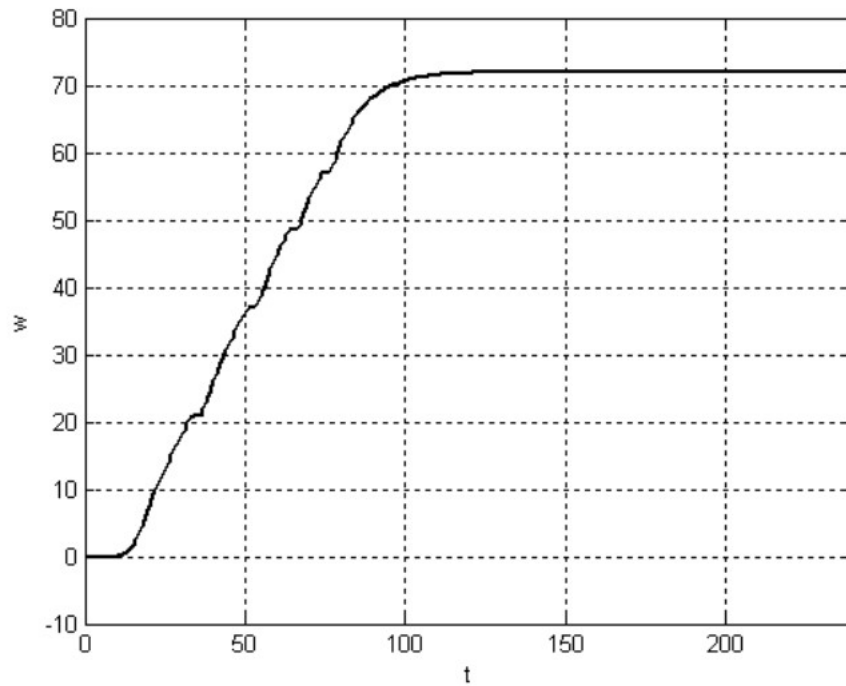


Рисунок 3.11 – Перехідний процес під час опускання з вантажем (швидкість від часу).

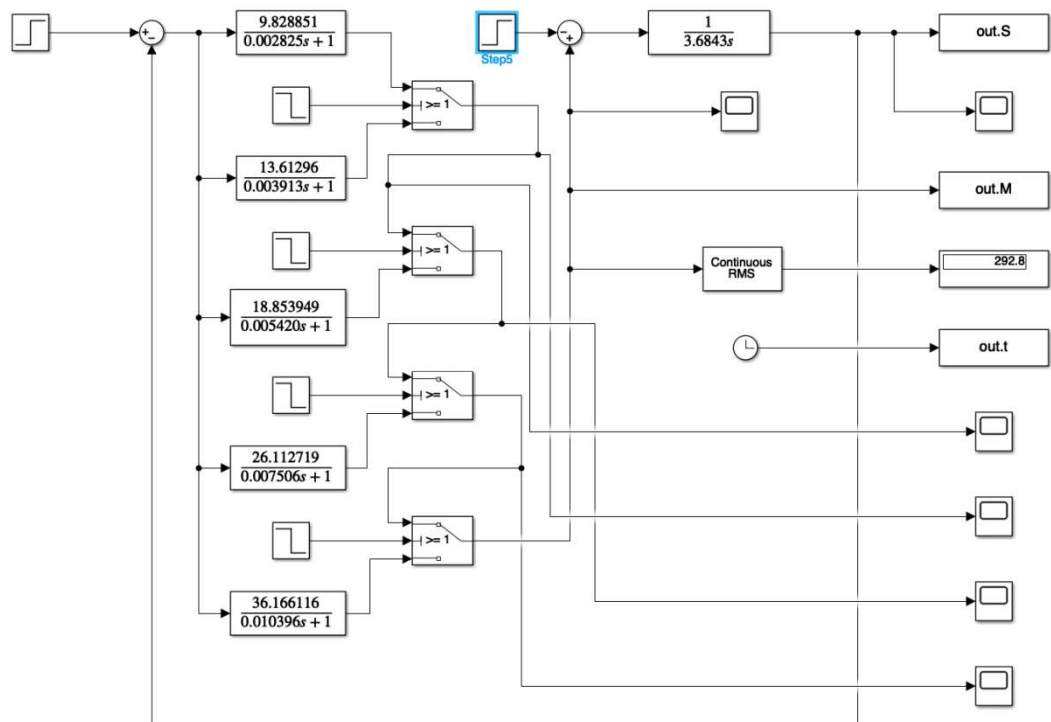


Рисунок 3.12 – Схема моделювання перехідних процесів за $M_c=4.3055\text{н}\cdot\text{м}$.

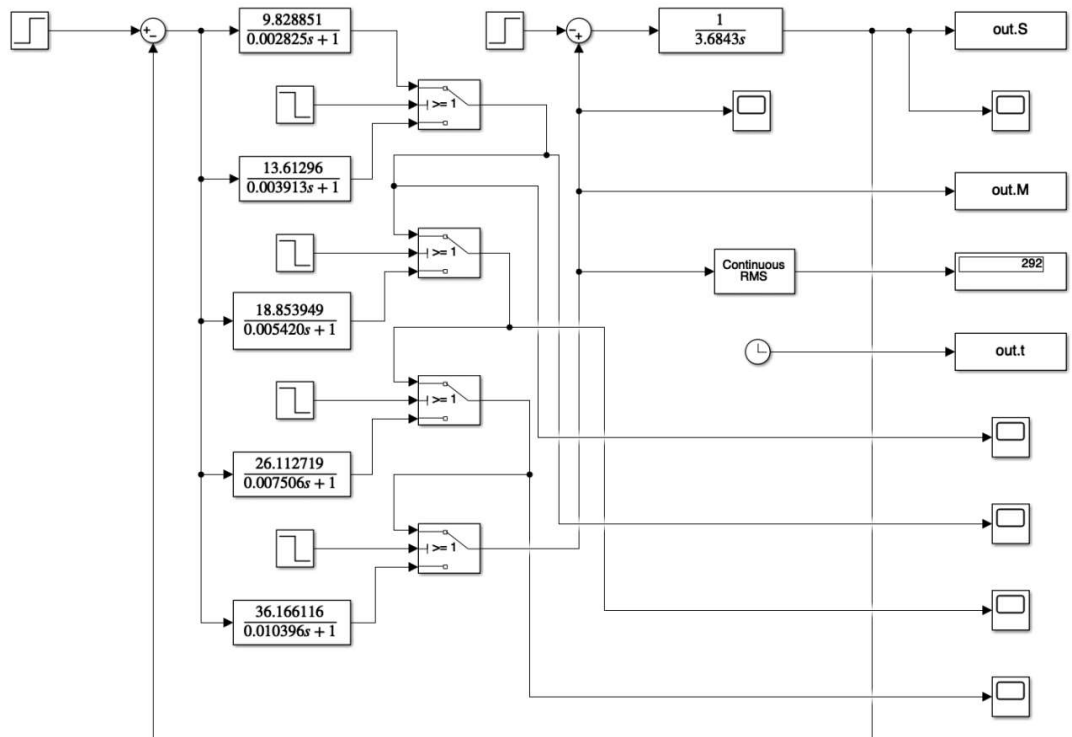


Рисунок 3.13 – Схема моделювання перехідних процесів за $M_c=2.3259\text{Н}\cdot\text{м}$

На відміну від малюнка 3.10 елементи Step – Step 4 заповнені новими значеннями часів етапів перехідного процесу.

Змінено значення статичного моменту в елементі Step 5.

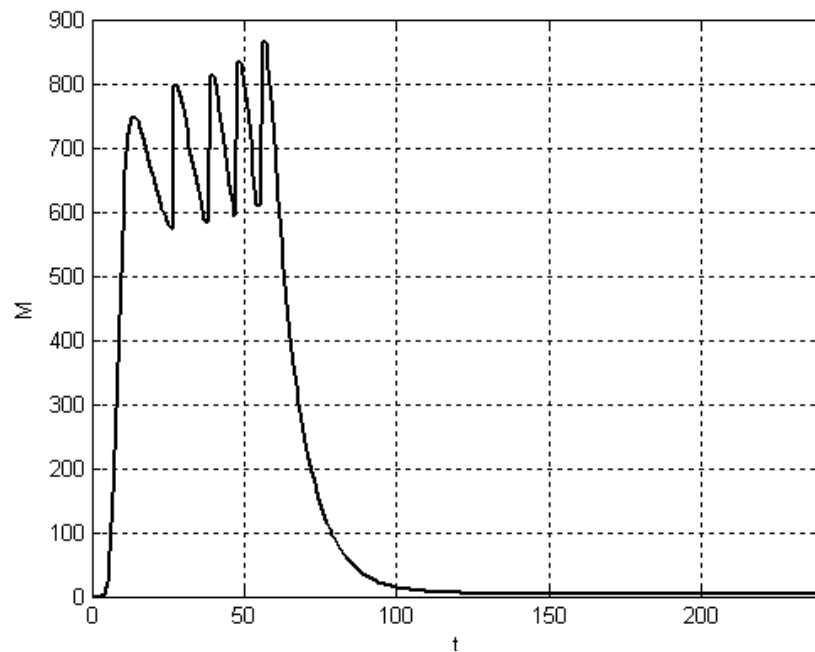


Рисунок 3.14 – Перехідний процес під час підйому без вантажу (момент від часу)

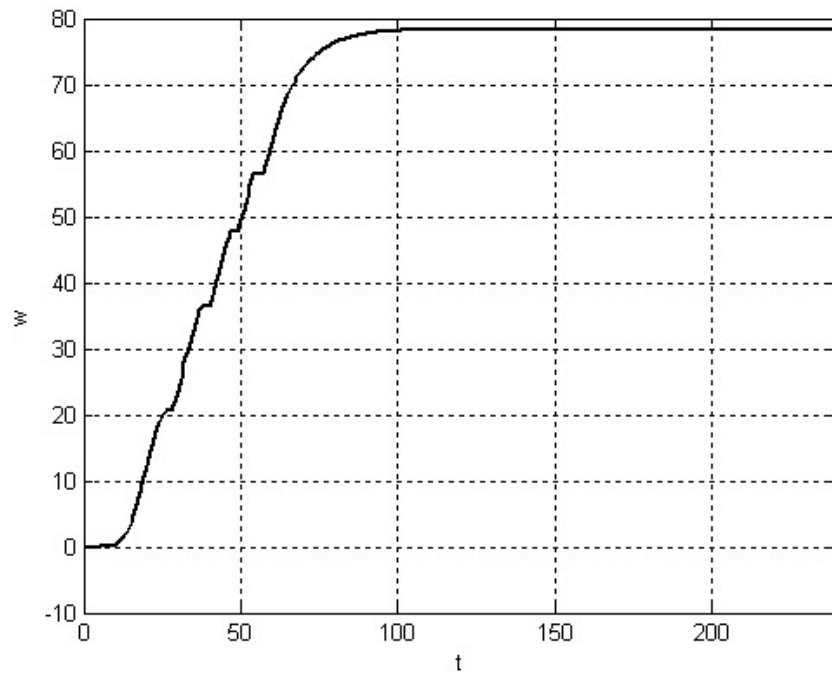


Рисунок 3.15 – Перехідний процес під час підйому без вантажу
(швидкість від часу)

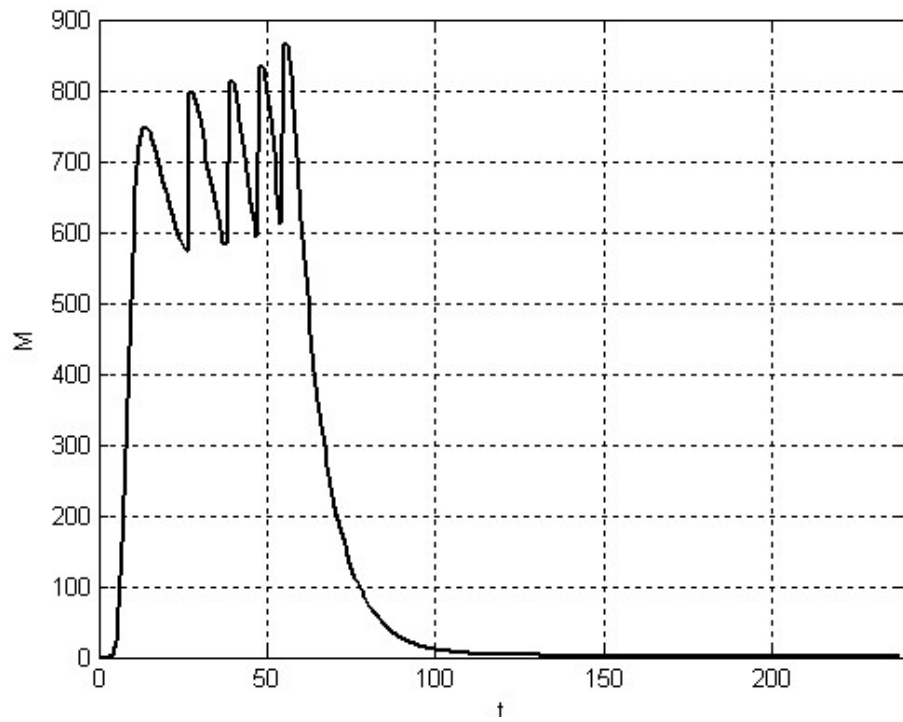


Рисунок 3.16 – Перехідний процес під час опускання без вантажу
(момент від часу)

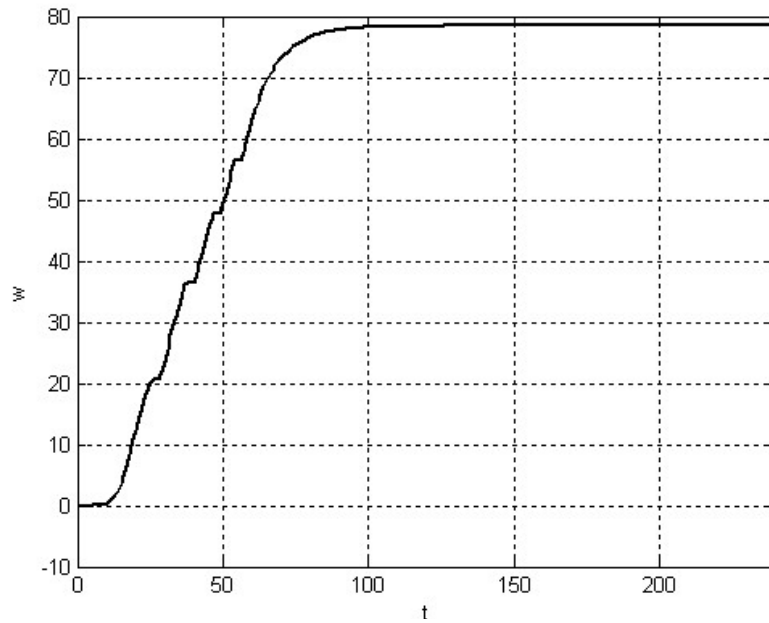


Рисунок 3.17 – Перехідний процес під час опускання без вантажу
(швидкість від часу).

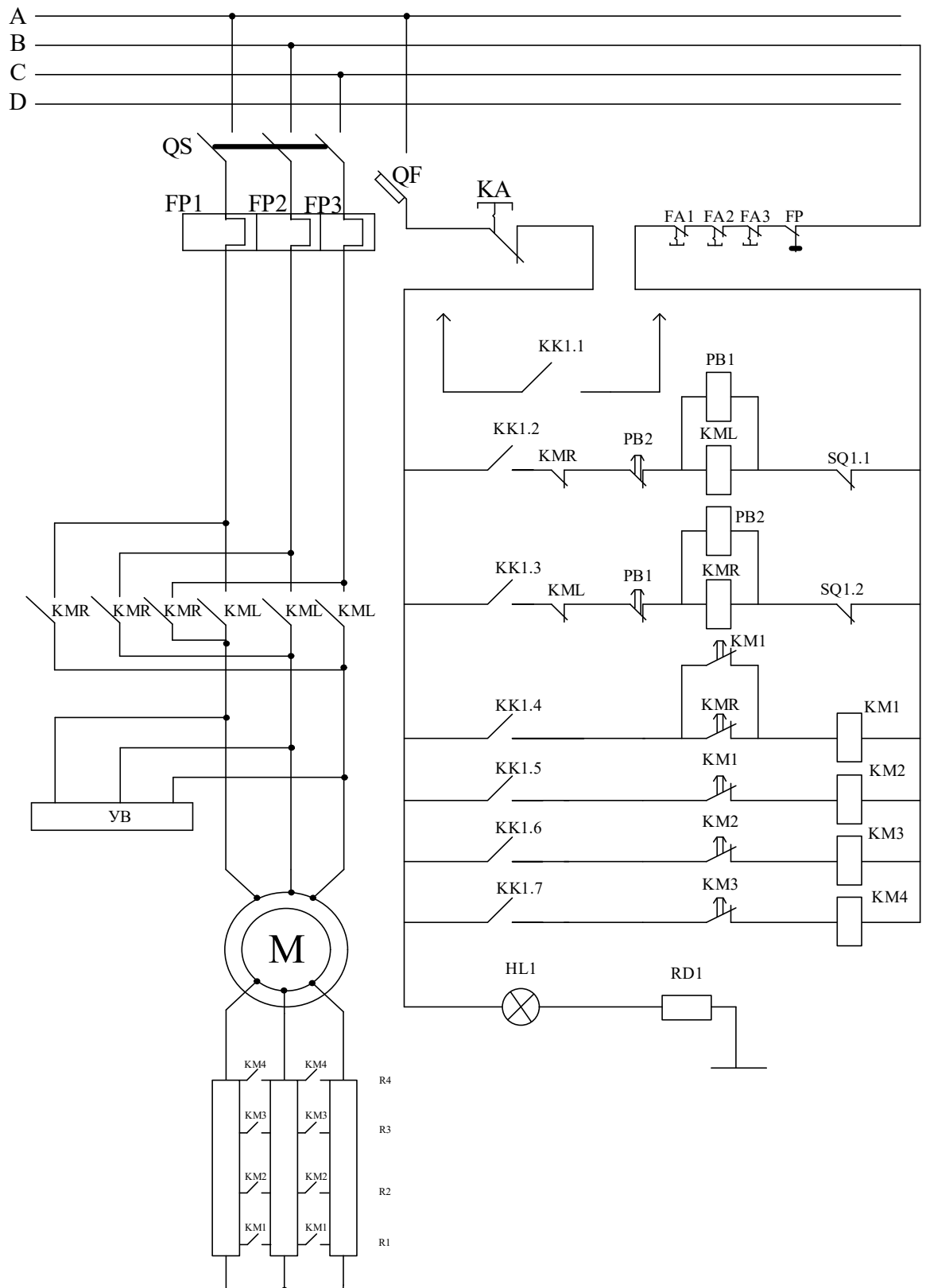


Рисунок 3.18 – Схема управління багатоступеневим пуском асинхронного двигуна з фазним ротором для механізму підйому вантажу.

3.2 Опис схеми керування

У даній принциповій схемі пуску з реверсом асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу, передбачений захист за максимальним струмом (FA1; FA2; FA3), а також тепловий (TP). Передбачено захист від протиувімкнення (PB1; PB2).

Кінцевий вимикач (SQ1.1; SQ1.2) відсікає схему керування статора двигуна за максимальної висоти підйому і за максимального опускання вантажного гака.

Коли вмикається автоматичний вимикач (QF), схему приводять у готовність до роботи, якщо ввімкнено аварійний вимикач (КпАв), також замкнено контакти командоконтролера (К.К1.1), які забезпечують "нульовий захист" загальної схеми ввімкнення крана.

Вмикаючи контакт командоконтролера (К, К, 1,2) подаємо живлення на котушки керування (PB1; KLM) через блок-контакти (KMR; PB2), силові контакти (KMR) подають живлення на статор двигуна (М) і механізму розгальмування приводу (УВ), двигун виходить на характеристику з повним ввімкненням опорів у ланцюг ротора, при цьому блок-контакти (KML) і контакти (PB1) розривають ланцюг (PB2; KMR). Це виключає можливість увімкнення (PB2; KMR).

Під час переведення КК у положення 2 (підйом) вмикається контакт (КК1.4), через затримку часу через контакти (КМЛ) отримує живлення котушка (КМ1) і своїми силовими контактами вмикає першу сходинку опорів із ланцюга ротора (М), двигун виходить на другу штучну характеристику. У третьому положенні (підйом) вмикається контакт (КК1.5), який вмикає (КМ2) з витримкою часу через (КМ1). Виводиться ще частина опорів із ланцюга ротора, двигун починає розганятися.

У четвертому положенні вмикається (КК1.6) і також через витримку часу (КМ2) вмикається (КМ3). Виводиться наступна частина опорів, двигун продовжує розгін.

У п'ятому положенні, також через витримку часу (КМ3) замикається (КК1.7) і вмикається (КМ4). Двигун виходить на характеристику, близьку до природної. Опори з ланцюга ротора практично виведені силовими контактами (КМ1...КМ4).

Під час переведення рукоятки командоконтролера в "0" або переходу в реверс, відключаються всі контакти цієї схеми. Також вимикається і (УВ), що гарантує механічне гальмування двигуна, а витримка контакту часу (РВ1) дає змогу системі керування повернутися в положення "0" і тільки потім під час увімкнення "спуск" дає змогу виходити двигуну на задану характеристику.

Висновки по 3 розділу:

1. В третьому розділі було виконано розрахунки синхронної швидкості двигуна, розрахунок його жорсткостей та електромагнітних постійних часу. Завдяки цим розрахункам було обраховано час перехідного процесу при підйому та опусканні вантажу. На основі цих даних було побудовано схему моделювання та схему управління багатоступеневим пуском АД з важним ротором для механізму підйому вантажу

2. Було описано схему принципову пуску з реверсом асинхронного двигуна з фазним ротором у функції часу.

РОЗДІЛ 4

Реалізація схеми механізму підйому мостового крана на основі частотного керування

4.1 Аналітичний огляд

Застосування релейно – контакторної схеми дає змогу розв'язати поставлену задачу керування механізмом мостового крана без великих капіталовкладень, водночас це рішення є жорстким. Застосування перетворювача частоти в цьому механізмі дає змогу перейти на вищий рівень автоматизації системи, що дасть змогу створити гнучку систему, яка дасть змогу виконувати складніші завдання керування об'єктом.

Перевагою частотного способу регулювання швидкості асинхронного двигуна є плавна зміна швидкості від нуля до максимальної (номінальної) за незмінної жорсткості механічної характеристики та перевантажувальної здатності двигуна.

Діапазон керування становить 5-10 для розімкнутих систем і 1000 і більше для замкнених. Недолік полягає у відносній складності та підвищеній вартості перетворювача частоти.

Функціональна схема частотного керування механізмом крана представлена на рис. 4.1

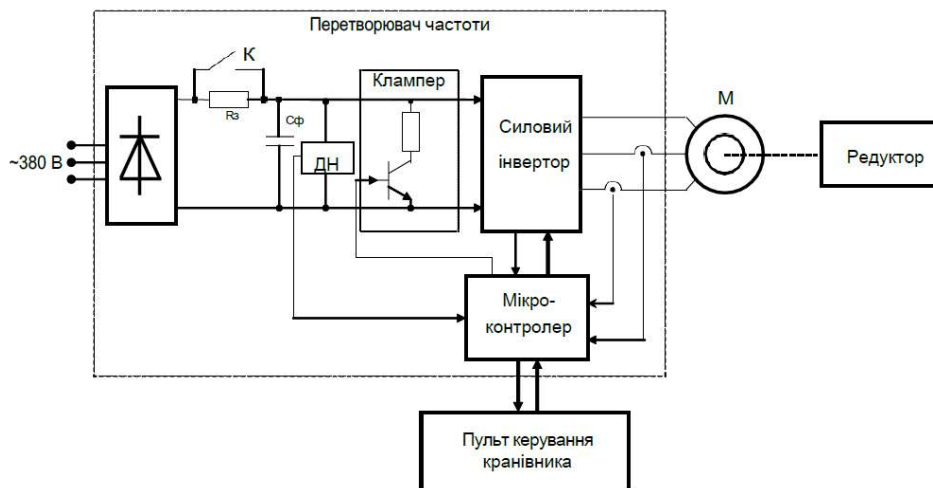


Рисунок 4.1 – Функціональна схема частотного керування механізмом крана

На рис.4.1 представлено перетворювач частоти, під'єднаний до пульта керування кранівника, асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, на валу якого розміщено редуктор.

Для реалізації цієї схеми застосуємо двигун МТКН412-8 з короткозамкненим ротором. Керування частотним перетворювачем надходить з пульта керування кранівника, який складається з ручки-потенціометра, кнопок "вгору", "вниз", а також елементів індикації процесу піднімання й опускання вантажу та стану системи.

4.2 Визначення параметрів динамічної моделі АД.

Для дипломного проекту було обрано двигун МТКН412-8, каталожні дані якого наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Таблиця даних з каталогу

№	Параметри	Позначення	Значення	Одиниці вимірювання
1	Число пар полюсів	p_n	4	-
2	Номінальна потужність	P_{2H}	26	кВт
3	Момент інерції	$J_{\text{дв}}$	2.8	$\text{кг} \cdot \text{м}^2$
4	Номінальна швидкість	$n_{\text{ном}}$	715	Об/хв
5	ККД	η	75	%
6	Коефіцієнт потужності	$\cos \phi$	0.68	-
7	Активний опір статора	R_1	0.31	Ом
8	Активний опір ротора	R_2	0.195	Ом
9	Індуктивність намагнічувального контуру	L_m	0.025	Ом
10	Індуктивність статора	L_1	0.029	Ом
11	Індуктивність ротора	L_2	0.029	Ом

Номінальне значення фазової напруги:

$$U_{\phi} = \frac{U_{c.l.}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393V \quad (4.1)$$

Амплітуда фазової напруги:

$$U_{1\phi_{Hmax}} = U_{1\phi_{H}} \cdot \sqrt{2} = 219.393 \cdot \sqrt{2} = 310.269V \quad (4.2)$$

Знайдемо

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2H}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_H \cdot \cos(\varphi)} = \frac{26000}{3 \cdot 219.393 \cdot 0.75 \cdot 0.68} = 77.24A \quad (4.3)$$

Номінальний крутний момент знайдемо за формулою:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{\pi \cdot 715}{30} = 74.836 \text{ рад} / \text{с} \quad (4.4)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{26000}{74.836} = 347.426 \text{ Нм} \quad (4.5)$$

4.3 Вибір перетворювача частоти

Виходячи зі знайденого номінального значення струму статора й умов дипломного проєкту, виберемо перетворювач серії Sinus K0049 4TBA2K2, який розробила компанія ELETTRONICA SANTERNO.

Основні технічні характеристики обраного перетворювача:

- потужність: 45 кВт;
- номінальний вихідний струм: 80А;
- номінальна вихідна напруга: 380-480В (3 фази);
- значення струмів перевантаження: 150% протягом 1 хв, 200% протягом 0,5 с;
- напруга живлення силового ланцюга: 380-480В (3 фази) - 50-60 Гц;
- допустиме відхилення напруги: +10%, -10%;
- допустиме відхилення частоти: +5%, -5%;
- спосіб охолодження: примусовий повітряний.

Основні параметри обраного перетворювача:

- спосіб управління: високочастотна широтно – імпульсна модуляція:

$$\frac{U}{f} = const, \text{ а також можливість векторного керування;}$$

- вихідна напруга: стабілізація вихідної напруги при зміні напруги живлення;

- робота за заданими швидкостями: можливість вибору до 15 швидкостей за комбінаціями сигналів на дискретних входах, можливість вибору заданого часу розгону, гальмування, обмеження моменту;

- функції захисту: сигналізація зупинки в разі аварії, обмеження струму, перевантаження за струмом і за напругою, коротке замикання на виході, обрив заземлення і фази в навантаженні, низька напруга живлення, короткочасне зникнення живлення, електронний термозахист двигуна від перевантаження, перевантаження статора за струмом під час старту, перевантаження за струмом у навантаженні під час старту, перевантаження резистора під час динамічного гальмування, захист від перегріву, екстрене зупинення;

- режим попередження аварійної зупинки: автоматичне зниження напруги в разі перевантаження;

- час розгону і гальмування: 0,01-3600 с, функція автоматичного вибору часу розгону і гальмування.

4.4 Структурна схема об'єкту регулювання

Частотно-керовані асинхронні електроприводи являють собою системи з двовимірним скалярним керуванням, компонентами якого є амплітуда і частота вектора напруги статора. Ідея частотного керування, отримана на основі розгляду статичних характеристик АД, уперше була запропонована Костенком у 20 роках минулого століття. Попри те, що частотні методи керування АД широко використовують у серійних електроприводах, їхнього суворого теоретичного обґрунтування з позицій динамічної поведінки досі

ще не було розроблено. Розгляд частотного керування асинхронним двигуном почнемо з побудови математичної моделі асинхронного двигуна.

4.5 Математична модель АД

Асинхронний двигун являє собою істотно нелінійну ланку. Для отримання більш точного уявлення про протікання перехідних процесів проведемо дослідження динаміки системи ПЧ-АД при використанні еквівалентної двофазної моделі двигуна у векторній формі.

Математичний опис процесів перетворення енергії в асинхронному двигуні здійснюється при живленні його від мережі. Перетворення енергії в цьому двигуні являє собою складне завдання у зв'язку з істотною нелінійністю рівнянь, зумовленою добутком змінних.

Двигун є трифазним, що ускладнює математичний опис через збільшення числа рівнянь, тому процеси в багатофазних електричних машинах подаються в еквівалентній двофазній моделі цієї машини. Умовою адекватності є інваріантність потужності машини під час перетворення рівнянь. Під час розв'язання задачі перетворення кожна реальна змінна двигуна - напруга, струм, потокозчеплення - подається у вигляді вектора. Напрямок вектора жорстко пов'язаний з відповідною даній обмотці (статора або ротора) віссю координат. Зі статором жорстко пов'язана ортогональна система координат з осями (a, b), а з ротором - з осями (d, q). Усі розрахункові змінні подаються в системі координат (d, q), яка обертається відносно нерухомого статора зі швидкістю ω_s .

Електрична машина є одним з основних елементів електроприводу, а також електромеханічних систем, де він використовується, безпосередньо забезпечуючи процес електромеханічного перетворення енергії. Адекватний математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в електричній машині є важливим питанням для розроблення алгоритмів керування цим процесом, його аналітичного дослідження та моделювання. Повномасштабне моделювання конкретного типу електричної машини

зазвичай призводить до складної багатовимірної моделі, яку важко використовувати для цілей керування. У зв'язку з цим математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії здійснюється на підставі так званих ідеалізованих машин, що базується на таких принципах:

- адекватний опис фундаментальних процесів, які проходять у конкретному класі електричних машин;
- ефекти другого порядку, як-от: неідеальність магнітних матеріалів і геометричної структури, несинусоїдальність МДС, асиметрія магнітних і електричних параметрів трифазних обмоток та інші, не враховуються.

Процеси в ідеалізованих машинах зазвичай описують так званою узагальненою машиною, до якої можуть бути зведені основні типи електричних машин.

Сучасні електричні машини, які спеціально сконструйовані для конкретного способу керування, наприклад асинхронні двигуни для частотного і векторного керування, мають характеристики, які з високою точністю збігаються з характеристиками ідеалізованих машин.

В електричних машинах електромагнітні процеси визначаються магнітними полями в повітряному зазорі, які створюються струмами, що проходять уздовж осі машини, оскільки струми в лобових частинах машини мають менший вплив і утворюють магнітні потоки розсіювання. У більшості випадків достатньо вважати, що силові лінії магнітного поля в зазорі перпендикулярні до циліндричних поверхонь статора і ротора, які утворюють повітряний зазор. Розподіл струмів, у свою чергу, залежить від типу обмотки, а зміни їх у часі - від характеру підведеної до обмоток напруги.

У багатополюсних електричних двигунах усі електромагнітні процеси повторюються через кожну пару полюсів, тому під час вивчення теорії ідеалізованих електричних машин достатньо розглянути двополюсну електричну машину.

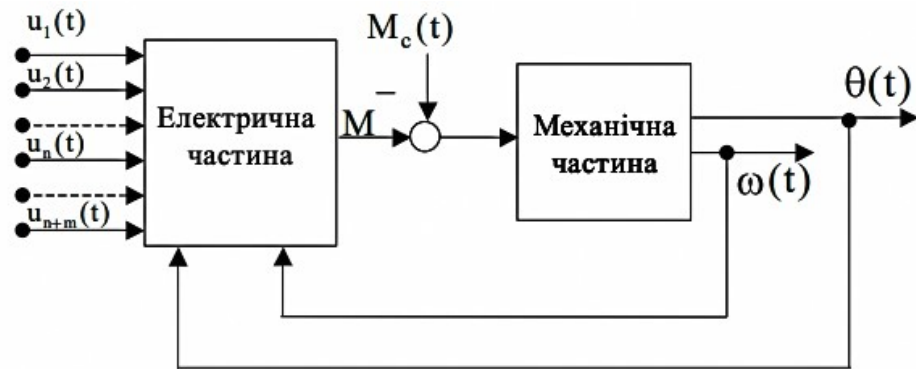


Рисунок 4.2 – Декомпозиція електромеханічного перетворювача

Електромеханічний перетворювач енергії можна розглядати як такий, що складається з двох частин: електричної та механічної, рис. 4.2.

Будемо розглядати клас електричних машин, спроектованих таким чином, що виконуються такі умови:

1. Магнітний ланцюг машини не насичується і має нескінченну магнітну проникність, втрати на гістерезис і вихрові струми нехтувано малі.

2. Матриця індуктивностей $L(\varepsilon)$ розміром $(n+m) \times (n+m)$ симетрична і позитивно визначена, тобто $L(\varepsilon) = L^T(\varepsilon) \succ 0$, де ε - кутове положення ротора, T - знак транспонування, n і m - число фаз статора і ротора відповідно.

3. Індуктивності розсіювання не залежать від кутового положення ротора.

При виконанні цих умов процес електромеханічного перетворення енергії може бути описаний у загальному вигляді таким чином. Сформуємо вектори напруг, струмів і потокозчеплень електричної машини:

$$\begin{aligned}
 u &= (u_{1s}, u_{2s}, \dots, u_{ns}; u_{1r}, u_{2r}, \dots, u_{mr})^T \\
 i &= (i_{1s}, i_{2s}, \dots, i_{ns}; i_{1r}, i_{2r}, \dots, i_{mr})^T \\
 \psi &= (\psi_{1s}, \psi_{2s}, \dots, \psi_{ns}; \psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{mr})^T
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Взаємозв'язок між струмами і потокозчепленнями задається лінійним алгебраїчним рівнянням:

$$u = L(\varepsilon)i \quad (4.7)$$

Узагальнене рівняння електричної рівноваги записується у формі рівняння Кірхгофа:

$$u = Ri + u \quad (4.8)$$

Де $R = \text{diag}(R_{1S}, R_{2S}, \dots, R_{nS}; R_{1R}, R_{2R}, \dots, R_{mR})$

Після підстановки (5.7) у (5.8), знаходимо диференціальне векторне рівняння, яке встановлює зв'язок між вектором струмів і вектором напруг:

$$\dot{i} = L^{-1}(\varepsilon)(-Ri - \omega \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} i + u) \quad (4.9)$$

У рівнянні (5.8) обернена матриця індуктивностей завжди існує через умову $L(\varepsilon) = L^{-1}(\varepsilon) > 0$

При виконанні умови (5.8) момент, який розвивається електричною машиною, перебуває у вигляді:

$$M = \frac{\partial W_e(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \quad (4.10)$$

Де електромагнітна енергія W_e ε матиме вигляд:

$$W_e = \frac{1}{2} i^T L(\varepsilon) i \quad (4.11)$$

З урахування останнього виразу момент АД запишеться:

$$M = \frac{1}{2} i^T \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} i \quad (4.12)$$

Доповнюючи рівняння (5.9), які описують динамічні процеси в електричній частині машини, і рівняння моменту (5.12) рівняннями руху механічної частини з постійним моментом інерції, отримаємо узагальнену модель:

$$\begin{aligned} \varepsilon^g &= \omega \\ \omega^g &= \frac{1}{J} M - \nu \omega - M_c(t), \quad M = \frac{1}{2} i^T \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} i \\ i^g &= L^{-1}(\varepsilon) \left(-Ri - \omega \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} i + u \right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

де $\nu > 0$ коефіцієнт в'язкого тертя.

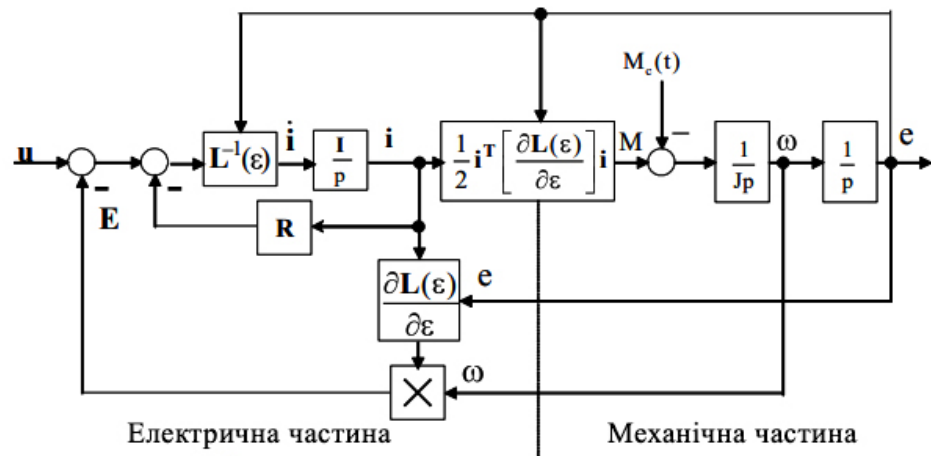


Рисунок 4.3 – Узагальнена структурна схема електричної машини

У теорії ідеалізованих електричних машин математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії можна істотно спростити в результаті переходу до еквівалентної двофазної моделі.

Можливість такої заміни забезпечує отримання узагальненого математичного опису процесів електромеханічного перетворення енергії для обертових електричних машин за допомогою ідеалізованого двофазного електромеханічного перетворювача, які називають узагальненою електричною машиною.

Узагальнена електрична машина - це спрощена модель реальної машини. Крім названих вище припущень 1 - 3, вона ґрунтується на тому, що магнітні потоки і ММШ, які створюють обмотки статора і ротора, синусоїдально розподілені уздовж довжини ланцюга машини. Для обмоток, які мають несинусоїдальну МДС, враховують першу просторову гармоніку поля, магнітні потоки від вищих гармонік відносять до потоків розсіювання.

Відповідно до (4.7) і (4.8), а також за умов симетричного живлення, динамічні процеси в електричній частині елементарної узагальненої електричної машини, схема якої зображена на рис. 4.4, описуються чотирма рівняннями електричної рівноваги в колах його обмоток і рівнянням електромагнітного моменту двигуна як функції струмів обмоток і механічних координат ω і ε .

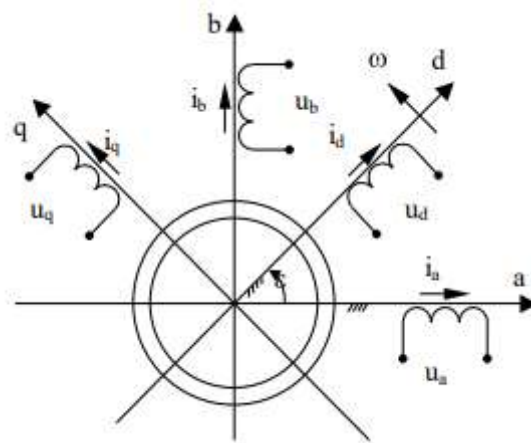


Рисунок 4.4 – Схема елементарної узагальненої двофазної машини

Запишемо рівняння електричної рівноваги, що встановлюють взаємозв'язок між векторами напруги, які прикладають, та векторами струмів (потокозчеплень). Нехай $u = [u_1^T, u_2^T]^T$ - вектор прикладених напружень пф $i = [i_1^T, i_2^T]^T$ - вектор струмів, $\psi = [\psi_1^T, \psi_2^T]^T$ - вектор потокозчеплень статора, $L(\varepsilon)$ - матриця індуктивностей, $R = \text{diag}(R_1, R_2)$ - матриця опорів машини. Тоді вектор напруг запишеться як:

$$u = Ri + \frac{du}{dt} \quad (4.14)$$

$$\psi = L(\varepsilon)i \quad (4.15)$$

Виразивши з (4.15) вектор i і підставивши його в (4.14), отримаємо рівняння електричної рівноваги у формі потокозчеплень. Рівняння електричної рівноваги заведено записувати відносно векторів статора і ротора:

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 i_1 + L_{12} e^{j\varepsilon} i_2 \\ u_2 &= L_2 i_2 + L_{12} e^{-j\varepsilon} i_1 \end{aligned} \quad (4.16)$$

де L_{12} - максимальне значення взаємної індуктивності між будь-якою з обмоток статора і ротора, а $e^{j\varepsilon(t)}$ і $e^{-j\varepsilon(t)}$ поворотні матриці, які відповідно дорівнюють:

$$e^{j\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon(t) & -\sin \varepsilon(t) \\ \sin \varepsilon(t) & \cos \varepsilon(t) \end{bmatrix}; \quad e^{-j\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon(t) & \sin \varepsilon(t) \\ -\sin \varepsilon(t) & \cos \varepsilon(t) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Необхідно зазначити, що оператори $e^{j\varepsilon(t)}$ та $e^{-j\varepsilon(t)}$ забезпечують координатні перетворення векторів з обертової системи координат у стаціонарну і навпаки.

Підставивши (4.16) у (4.17) отримаємо рівняння електричної рівноваги АД:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{12} e^{j\varepsilon} \frac{di_2}{dt} + L_{12} \omega J e^{j\varepsilon} i_2 \\ u_2 &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{12} e^{-j\varepsilon} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \omega J e^{j\varepsilon} i_1 \\ \omega &= \frac{d\varepsilon}{dt} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Система (4.18) - це система нелінійних диференціальних рівнянь 4-го порядку. У векторно - матричній формі після перетворення, (4.18) перепишеться у вигляді:

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_{12} e^{j\varepsilon} \\ L_{12} e^{-j\varepsilon} & L_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 - R_1 i_1 - \omega L_{12} J e^{j\varepsilon} i_2 \\ u_2 - R_2 i_2 - \omega L_{12} J e^{j\varepsilon} i_1 \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

Виразимо з останнього рівняння вектор струмів:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = L^{-1}(\varepsilon) \begin{pmatrix} -R_1 i_1 - \omega L_{12} J e^{j\varepsilon} i_2 + u_1 \\ -R_2 i_2 - \omega L_{12} J e^{j\varepsilon} i_1 + u_2 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Для отримання статичної електромеханічної характеристики необхідно в отриманих диференціальних рівняннях ухвалити умову відповідності сталому режиму, тоді рівняння перетворюються на алгебраїчні.

Рівняння електричної рівноваги, доповнене рівнянням моменту, визначає динамічну механічну характеристику. Таким чином, отримуємо повну модель АД:

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[\frac{1}{2} i^T \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - M_c \right] \\ \frac{d\bar{i}}{dt} &= L^{-1}(\varepsilon) \left(u - Ri - \omega \frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} i \right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Входом цієї моделі є вектор керуючих напруг, що формується за допомогою пристрою керування. Змінними стану є кутова швидкість, кутове положення і вектор струмів. Ця модель являє собою систему диференціальних рівнянь шостого порядку. У ній можна виокремити дві підсистеми - механічну, входом якої є момент, що генерується, а виходами - кутова швидкість (положення), та електромагнітну підсистему, входом якої є вектор напруг u , кутова швидкість і положення, а виходом - електромагнітний момент M . До механічної частини прикладено збурювальний момент M_c . Ці підсистеми включені послідовно і мають внутрішній негативний зворотний зв'язок через $L(\varepsilon)$ і проти-ЕРС. Ця властивість називається електромеханічним зв'язком. Похідна матриці індуктивностей має вигляд:

$$\frac{\partial L(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} e^{J\varepsilon} J \\ -L_{12} e^{-J\varepsilon} J & 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Де J – косиметрична матриця.

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Розглянемо систему координат (a-b), пов'язану зі статором і систему (d-q), пов'язану с полем машини (рис. 4.2), яка обертається в просторі зі швидкістю $\omega_0 = \frac{d\varepsilon_0}{dt}$. Враховуючи, що системи (d-q) і (a-b) пов'язані виразами:

$$\begin{aligned}x_1^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0(t)} \cdot x_1 \\x_2^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0(t)} \cdot x_2\end{aligned}\quad (4.24)$$

рівняння електричної рівноваги матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}u_1 &= R_1 i_1 + \frac{du_1}{dt} + J\omega_0 u_1 \\0 &= R_2 i_2 + \frac{du_2}{dt} + J\omega_0 - \omega u_1\end{aligned}\quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}u_1 &= L_1 \cdot i_1 + L_m \cdot i_2 \\u_2 &= L_m \cdot i_1 + L_2 \cdot i_2\end{aligned}\quad (4.30)$$

де $L_m = \frac{3}{2} \cdot L_{12}$ - індуктивність намагнічувального контуру.

В системі (4.25) друге рівняння дорівнює нулю, оскільки як для АД з короткозамкненим ротором $u_2 = 0$.

Запишемо такі вирази для моменту АД:

$$\begin{aligned}M &= L_{12} \cdot (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) = (\psi_{1d} i_{1q} + \psi_{1q} i_{1d}); \\M &= \frac{L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12} \cdot L_{12}} (\psi_{1q} i_{2d} + \psi_{1d} i_{2q})\end{aligned}\quad (4.31)$$

Виключимо з диференціальних рівнянь (4.25) i_2, u_1 , використовуючи для цього вирази поточкозчеплень із (129):

$$\begin{aligned}i_2 &= \frac{u_2}{L_2} - \frac{L_m}{L_2} i_1 \\u_1 &= \frac{L_m}{L_2} u_2 \sigma i_1\end{aligned}\quad (4.32)$$

$$\text{де } \sigma = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}{L_2}$$

Роблячи підстановку (4.32) у рівняння (4.25) і виконавши перетворення, отримаємо рівняння математичної моделі АД у проекціях на осі системи координат (d-q):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \omega_0 i_{1q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\ \frac{d}{dt} i_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2q} + \beta p_n \omega \psi_{2d} - \omega_0 i_{1d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\ \frac{d}{dt} i_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + \alpha L_m i_d + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} \\ \frac{d}{dt} i_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} + \alpha L_m i_q - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} \\ M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2d} i_q - \psi_{2q} i_d) - M_c \end{aligned} \quad (4.33)$$

Розрахункові параметри моделі асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}{L_2} = \frac{0.029 \cdot 0.029 - 0.0025^2}{0.029} = 0.0075 \\ \alpha &= \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.195}{0.029} = 6.724 \\ \beta &= \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2} = \frac{0.025}{0.0075 \cdot 0.029} = 114.95 \frac{1}{\text{Гц}} \\ \gamma &= \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m = \frac{0.31}{0.0075} + 6.724 \cdot 114.95 \cdot 0.025 = 60.65 \end{aligned} \quad (4.34)$$

Модель АД у стаціонарній системі координат (a-b) має вигляд:

$$\begin{aligned}
\overset{g}{\theta} &= \omega \\
\overset{g}{\omega} &= \frac{1}{J} M - \nu \omega - M_c \\
M &= \mu_1 \psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a} \\
\overset{g}{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a} \\
\overset{g}{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b} \\
\overset{g}{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} \\
\overset{g}{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Динамічна модель асинхронного двигуна (4.35) дає змогу простежити поведінку змінних двигуна (струми і потокозчеплення, момент і швидкість) у різних режимах роботи електричної машини. Розглянутий математичний опис електромеханічних процесів базується на двофазному поданні змінних. Така можливість зумовлена тим, що поле більшості машин можна розглядати як плоске. Тим часом, більшість машин мають 3 і більше фаз. Виникає необхідність встановити взаємозв'язок між багатофазними та двофазними системами. Перетворення змінних 3-х фазної машини до змінних 2-х фазної для статорних струмів мають вигляд:

$$\begin{aligned}
i_{1a} &= i_{s1} \\
i_{1b} &= \frac{1}{\sqrt{3}} i_{s2} - i_{s3}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Зворотне перетворення записується:

$$\begin{aligned}
i_{s1} &= i_{1a} \\
i_{s2} &= -\frac{1}{2} i_{1a} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1b} \\
i_{s3} &= -\frac{1}{2} i_{1a} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1b}
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Таким чином, математичні моделі реальних електричних машин можуть бути зведені до двофазної узагальненої машини. Для цього змінні

ротора приводяться до статора, а трифазні змінні приводяться до двофазних. Така трансформація змінних електричної машини не змінює їхньої фізичної суті.

Рівняння (4.36) - (4.37) являють собою собою еквівалентну двофазну математичну модель асинхронного двигуна в координатах статора (a-b). На рис. 4.5 представлено структурна схема двигуна, побудована на їхній підставі.

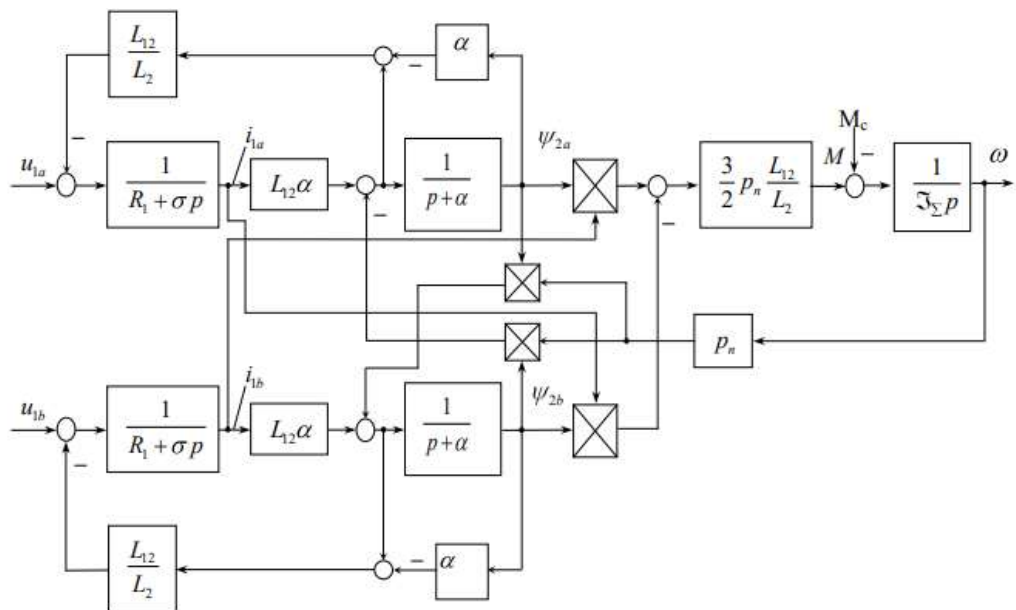


Рисунок 4.5 – Структурна схема АД у системі координат статора

На рис. 4.5:

U_{1a} , U_{1b} - проекції вектора напруги статора на осі a-b - синусоїдальні функції зміщені на 90 ел.град;

i_{1a} , i_{1b} - проекції струмів статора на осі a-b;

ψ_{2a} , ψ_{2b} - проекції вектора потокозчеплення на осі a-b;

4.6 Структурна схема перетворювача частоти

Частотний перетворювач при дослідженні методом математичного моделювання представляється у вигляді аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_{\text{ПЧ}}(p) = \frac{K_{\text{ПЧ}}}{T_{\mu}p + 1} \quad (4.38)$$

де $K_{\text{ПЧ}}$ - коефіцієнт передачі перетворювача; T_{μ} - постійна часу перетворювача. Трифазний асинхронний двигун живиться від мережі симетричною синусоїдальною напругою

$$\begin{aligned} U_A &= U_m \sin 2\pi f_1 t \\ U_B &= U_m \sin \left(2\pi f_1 t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_C &= U_m \sin \left(2\pi f_1 t + \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad (4.39)$$

де U_m - амплітуда живильної напруги; f_1 - частота живильної напруги.

Перехід до системи координат $(\alpha - \beta)$ здійснюється на підставі відомих співвідношень (Рис 4.6)

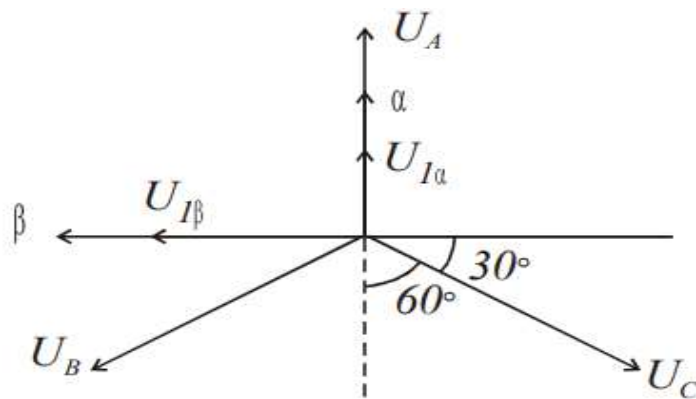


Рисунок 4.6 – Перехід від трифазної системи координат до двофазної

$$U_A + U_B + U_C = 0$$

$$U_{1\alpha} = U_A - U_C \cos 60^\circ - U_B \cos 60^\circ = U_A - U_C + U_B = \frac{3}{2} U_A \quad (4.40)$$

$$U_{1\beta} = U_B \cos 30^\circ - U_C \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_B - U_C$$

Структурну схему цього переходу подано на рис. 4.6. При цьому амплітуда живильної напруги двигуна задається значенням U_m , а частота напруги - значенням f_1 .

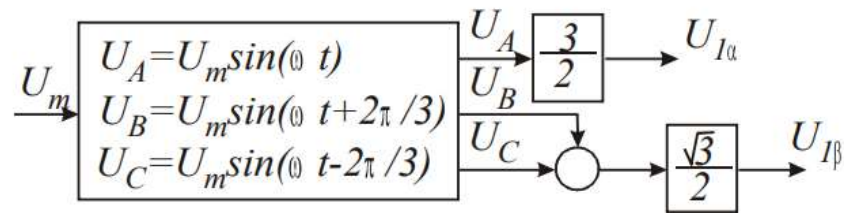


Рисунок 4.7 – Еквівалентна двофазна напруга живлення двигуна

Структурну схему перетворювача частоти з урахуванням переходу від трифазного представлення напруги до двофазного, представлено на рис. 4.8

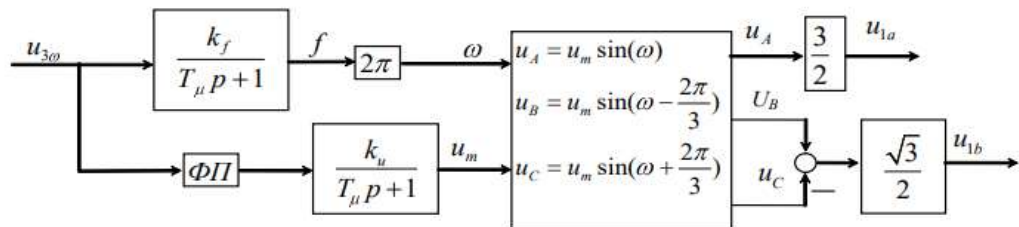


Рисунок 4.8 – Структурна схема перетворювача частоти

Параметри структурної схеми розраховуються наступним чином:

$$k_f = \frac{f_{\max}}{U_{zf \max}} = \frac{50}{10} = 5 \frac{\Gamma\text{ц}}{B} \quad (4.41)$$

$$K_u = \frac{U_m}{U_{3U_m}} \approx \frac{310}{10} = 31$$

У зв'язку з досить високою швидкістю перетворювача частоти постійну часу приймаємо $T_\mu \approx 0.01\text{с}$.

Висновки по 4 розділу:

1. В даному розділі було виконано реалізацію схеми підйому мостового крану на основі частотного керування та побудовано функціональну схему. Перетворювач частоти дає змогу програмним способом обмежити прискорення, а також максимальну швидкість обертання вала двигуна для забезпечення прийнятних швидкісних характеристик для механізму підйому мостового крану.

2. Було проведено дослідження динаміки системи ПЧ-АД при використанні еквівалентної двофазної моделі двигуна у векторній формі

РОЗДІЛ 5

Дослідження динаміки електромеханічної системи підйомного механізму мостового крана

Для дослідження перехідних процесів було використано пакет моделювання динамічних систем Simulink, середовища MATLAB. Для цього зібрано модель системи ПЧ-АД, яка представлена на рис. 5.1

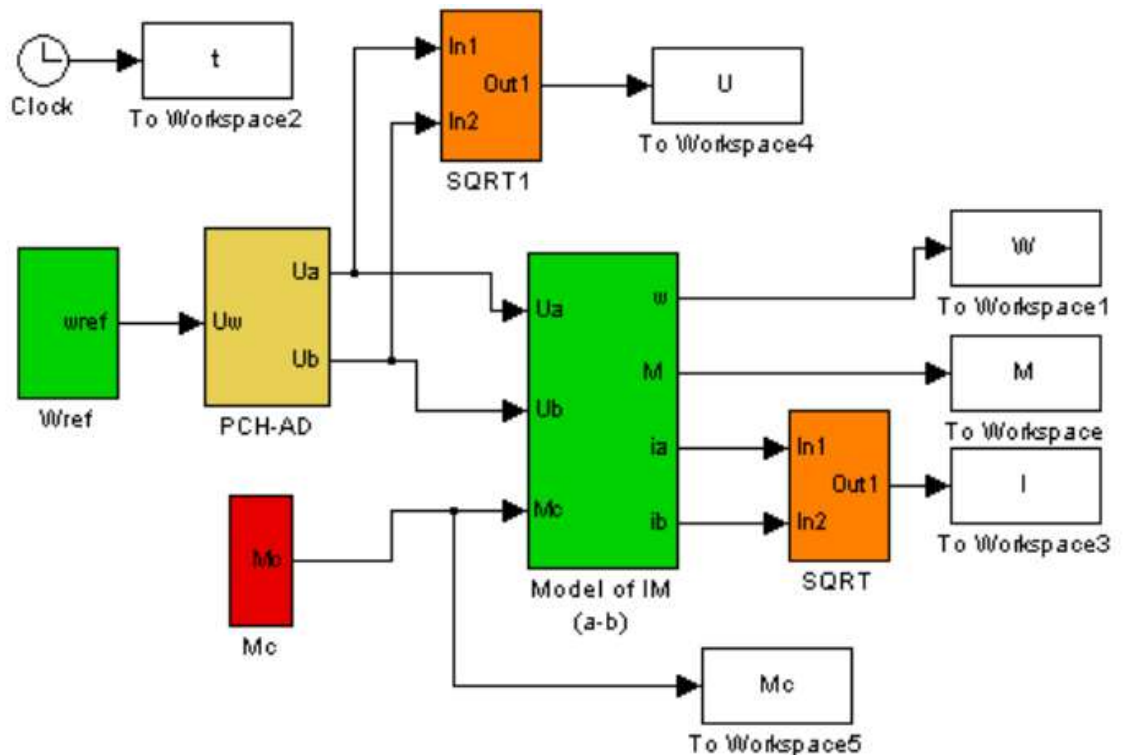


Рисунок 5.1 – Модель системи ПЧ-АД при використанні еквівалентної двофазної моделі двигуна у векторній формі

Опис елементів моделі. Блок PCH-AD - це блок, що містить модель перетворювача частоти і перехід від трифазної системи координат до двофазної. Структура блоку наведена на рис. 5.2

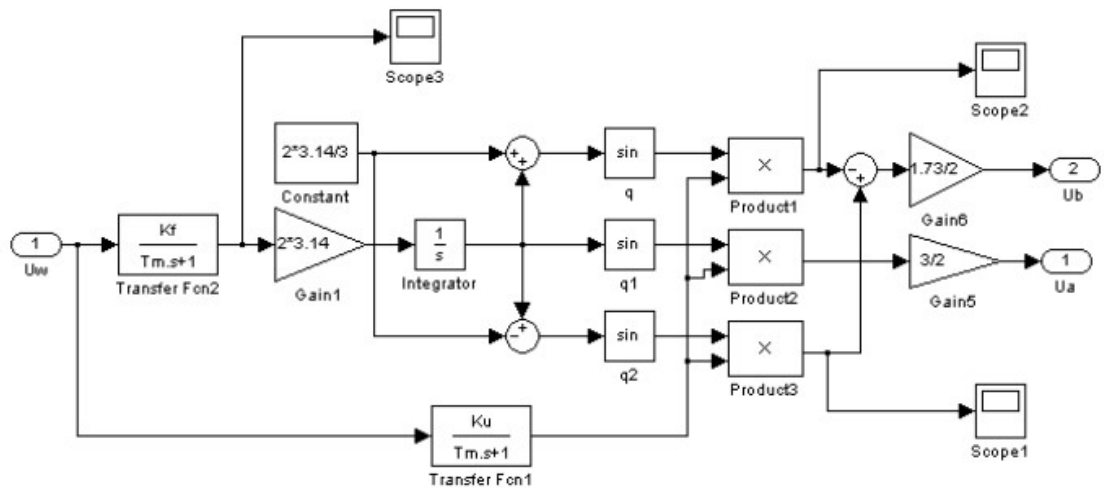


Рисунок 5.2 – Модель ПЧ та перехід від трифазної системи координат до двофазній (PCH-AD)

Блок Model of IM (a-b) - це модель асинхронного двигуна представленого в координатах (a-b). Зміст цього блоку описано вище (математична модель АД). Структура блоку представлена на рис. 5.3

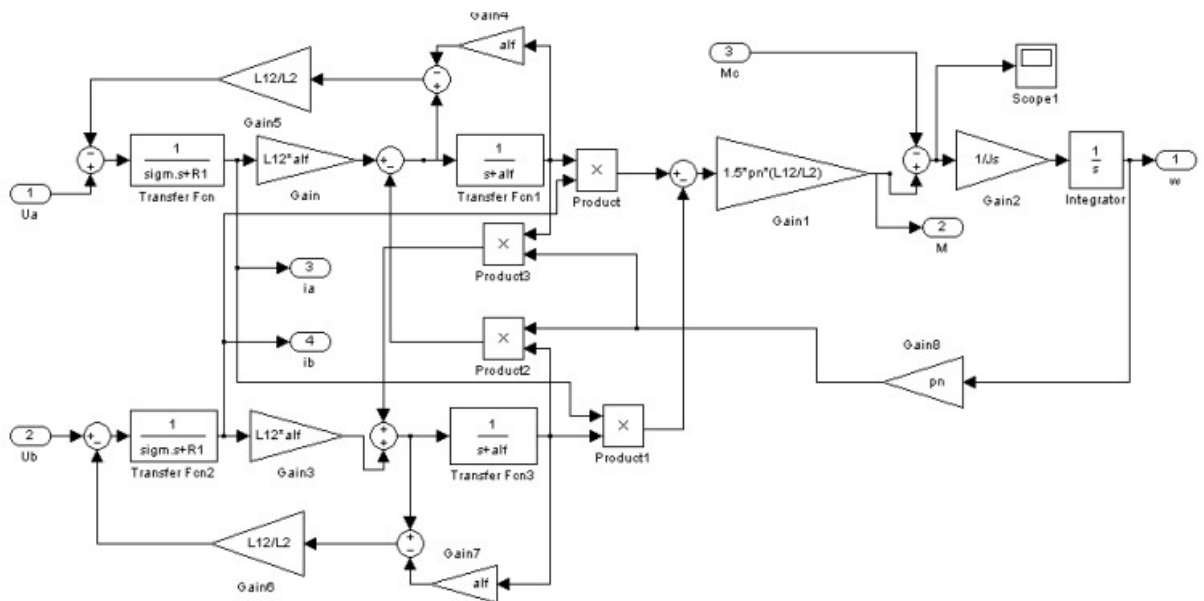


Рисунок 5.3 – Еквівалентна двофазна модель двигуна у векторній формі (Model of IM)

Блок Wref – це блок завдання швидкості. Цей блок задає величину заданої швидкості, що надходить від системи управління. Цей блок має структуру зображену на рис. 5.4

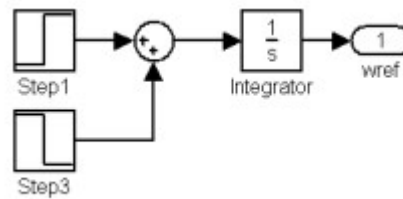


Рисунок 5.4 – Вміст блоку Werf

Блок SQRT виконує математичну функцію $\sqrt{a^2 + b^2}$. Структура блоку наведено на рис. 5.5

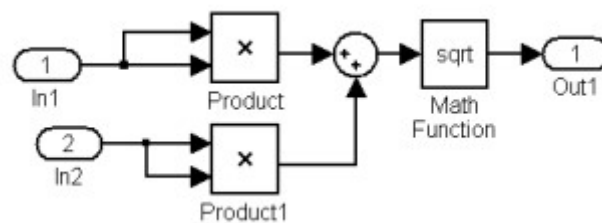


Рисунок 5.5 – Вміст блоку SQRT та SQRT1

Блок Mc – це блок завдання моменту навантаження. Структура блоку представлена на рис. 5.6

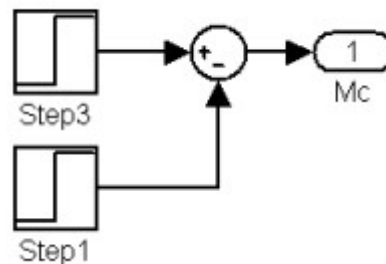


Рисунок 5.6 – Вміст блоку Mc

Дослідження динамічних процесів, що відбуваються в механізмі підйому, будемо проводити для таких варіантів. Варіант 1. Завдання по швидкості змінюється за законом, відображеним з максимальним прискоренням $12,5 \text{ В/с}^2$, при цьому сумарний момент інерції на валу двигуна становить $3,68 \text{ кгм}^2$. У момент часу $t=2\text{с}$ від двигуна потрібно відпрацювати ступінчастий момент навантаження, що дорівнює 434.85 Нм , що відповідає

максимальному завантаженню масою в 12,5 т. На рис. 5.7 представлено графіки перехідних процесів у системі за вище зазначених умов.

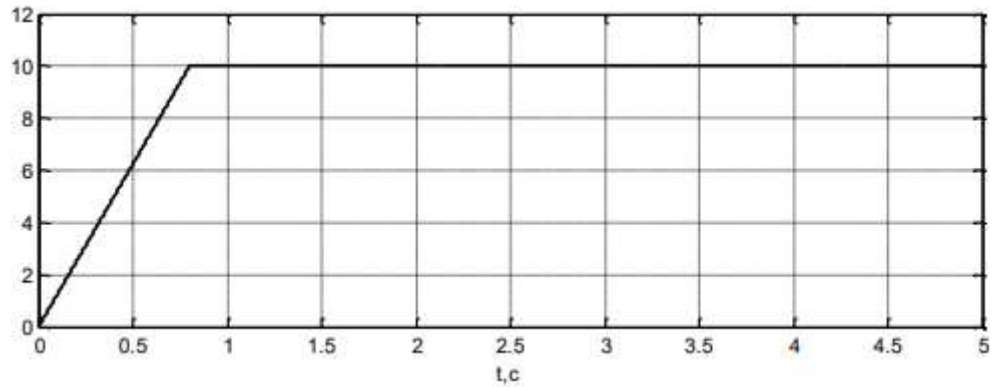


Рисунок 5.7 – Графік сигналу завдання по швидкості U_w

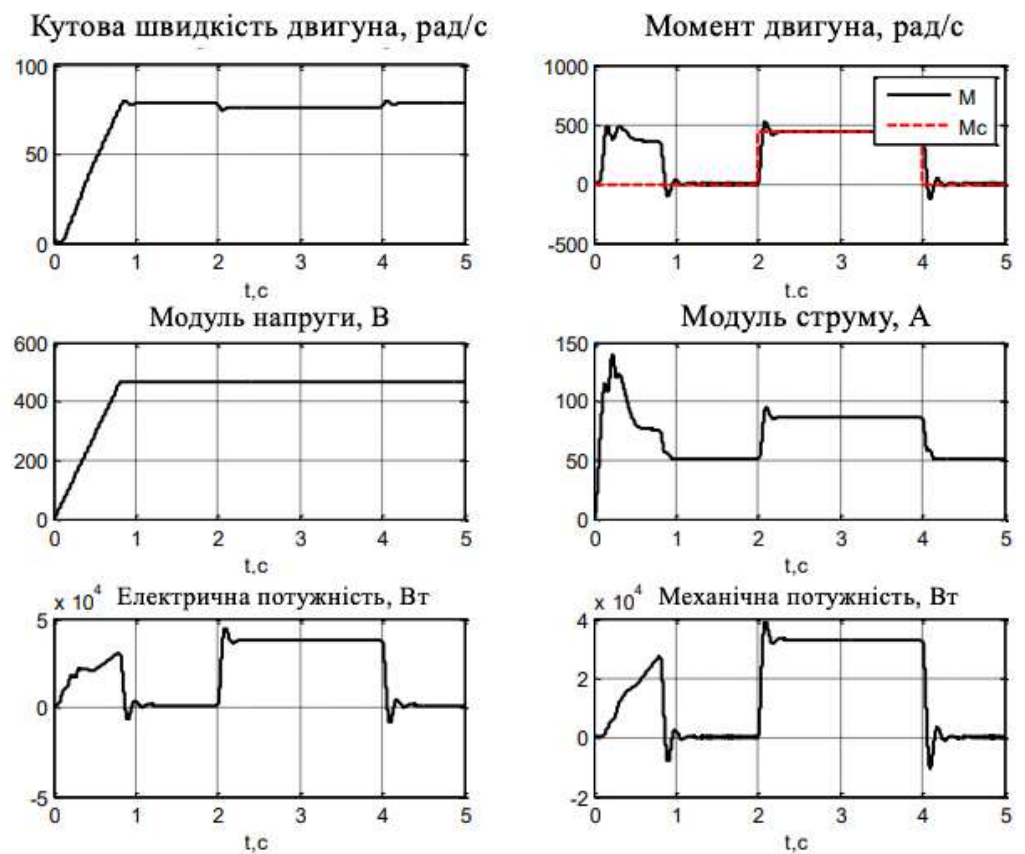


Рисунок 5.8 – Графіки перехідних процесів при $U_w=10В$ та $M_c=434 Нм$

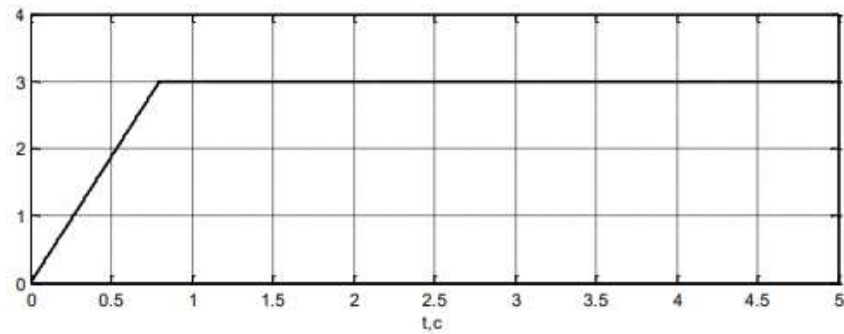
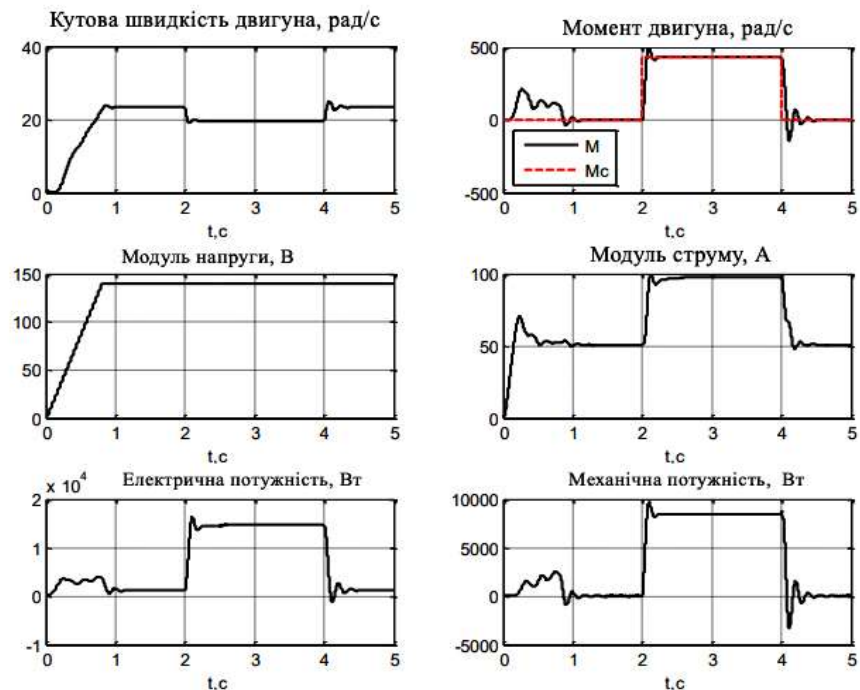
На рис. 5.8 відображено графіки перехідних процесів кутової швидкості двигуна ω , моменту двигуна і статичного моменту навантаження M і M_c , модуля струму двигуна I і модуля напруги двигуна U .

Як видно з графіків, за заданого сигналу завдання за швидкістю $U\omega$, здійснюється пуск двигуна на холостому ходу до швидкості 78,5 рад/с за 0,8 с, що відповідає максимальному лінійному прискоренню гака підйомального механізму, що дорівнює 0,25 м/с², з динамічним моментом, що не перевищує в піку 500Нм. Модуль напруги і струму двигуна при цьому досягає значення 466В і 140А відповідно.

У момент, що дорівнює 2с, відбувається накидання статичного моменту навантаження, що дорівнює 434Нм. Кутова швидкість двигуна при цьому падає до значення 75.8 рад/с, що відповідає значенню лінійної швидкості 0.196 м/с, а двигун генерує момент, що дорівнює моменту навантаження. Модуль струму двигуна при цьому становить 86А. Активна споживана потужність із мережі становить 37.5кВт. А механічна потужність на валу двигуна становить 33кВт.

Як видно, за максимального завантаження крана, механізм підйому витримує повне навантаження і забезпечує лінійний рух вантажу зі швидкістю близькою до максимальної.

Варіант 2. Завдання за швидкістю змінюється за законом, відображеним на рис. 45 з максимальним прискоренням 12.5 В/с², при цьому сумарний момент інерції на валу двигуна становить 3.68 кгм². У момент часу $t=2$ с, від двигуна потрібно відпрацювати ступінчастий момент навантаження, що дорівнює 434.85Нм, що відповідає максимальному завантаженню масою в 12,5 т. На рис. 6.9 представлено графіки перехідних процесів у системі за вище зазначених умов.

Рисунок 5.9 – Графік сигналу завдання по швидкості U_{ω} Рисунок 5.9 – Графіки перехідних процесів при $U_{\omega}=10\text{В}$ та $M_c=434\text{ Нм}$

На рис. 5.9 відображено графіки перехідних процесів кутової швидкості двигуна ω , моменту двигуна і статичного моменту навантаження M і M_c , модуля струму двигуна I і модуля напруги двигуна U .

Як видно з графіків, за заданого сигналу завдання за швидкістю $U_{\omega}=3\text{ В}$, здійснюється пуск двигуна на холостому ходу до швидкості $23,5\text{ рад/с}$ за $0,8\text{ с}$, з динамічним моментом, що не перевищує в піку 215 Нм . Модуль напруги і струму двигуна при цьому досягає значення 140 В і 51 А відповідно.

У момент, що дорівнює 2 с , відбувається накидання статичного моменту навантаження, що дорівнює 434 Нм . Кутова швидкість двигуна при

цьому падає до значення 19.5 рад/с, що відповідає значенню лінійної швидкості 0.05 м/с, а двигун при цьому генерує момент, що дорівнює моменту навантаження. Модуль струму двигуна при цьому становить 98А. Активна споживана потужність із мережі становить 14.6кВт. А механічна потужність на валу двигуна становить 8.5 кВт.

Висновки по 5 розділу:

1. Було досліджено перехідні процеси динамічних систем у середовищі Simulink, де було описано кожен блок моделі.
2. Було знайдено графіки перехідних процесів та графіки сигналу завдання по швидкості. Із графіків перехідних процесів видно, що система за максимального навантаження, яке відповідає масі, що піднімається, яка дорівнює 12,5 тонн, забезпечує заданий діапазон регулювання швидкості.

РОЗДІЛ 6

Практична реалізація електромеханічної системи підйомного механізму мостового крана

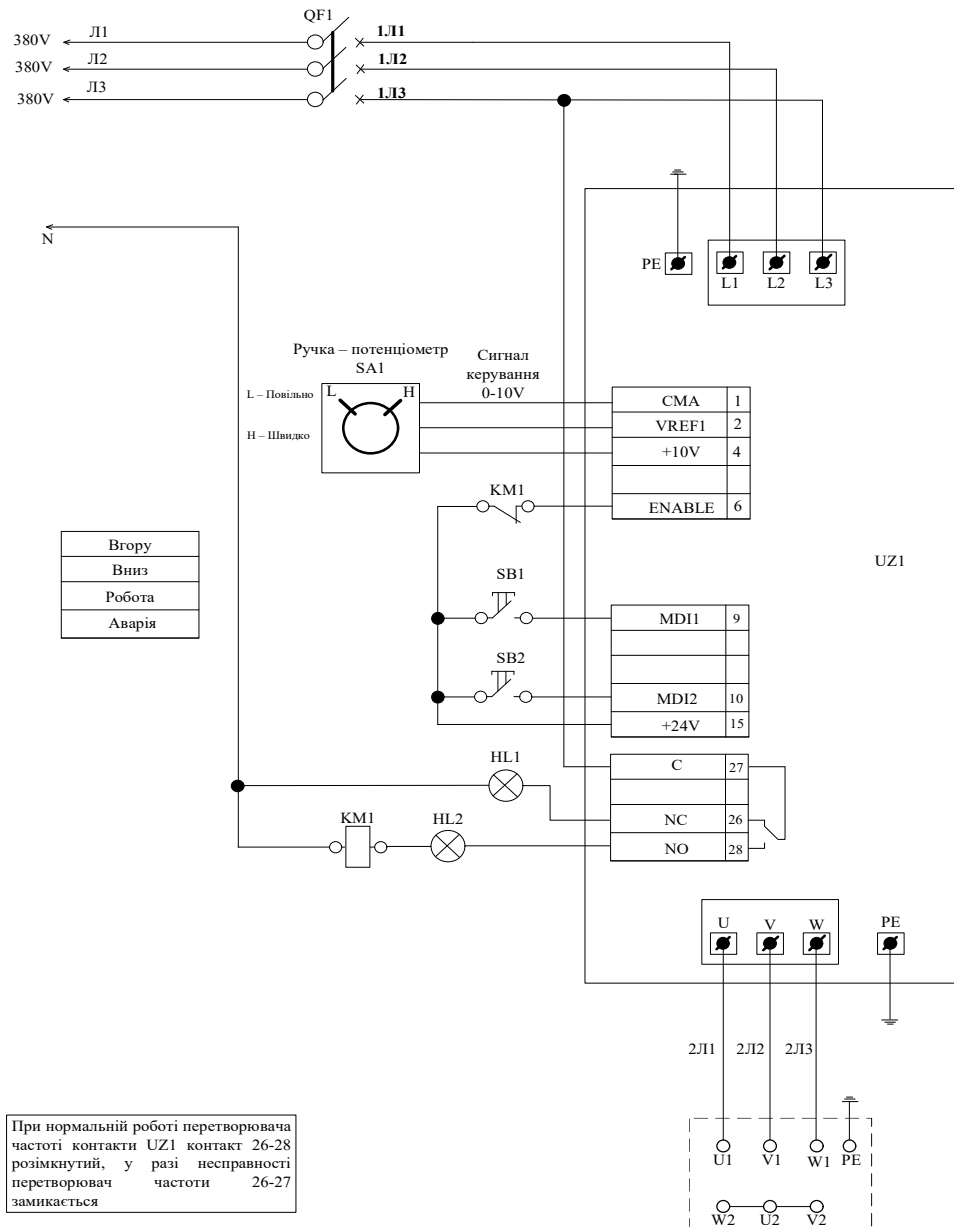


Рисунок 6.1 – Схема електрична принципова підйомного механізму

Опис схеми електричної принципової підйомного механізму

У разі нормальної роботи перетворювача частоти UZ1 контакт 26 - 28 розімкнутий, у разі несправності перетворювача частоти контакт 26 - 27 замикається.

Схема електрична принципова включає в себе:

автоматичний вимикач QF1 (BA57-31) призначений для захисту перетворювача частоти від струмів короткого замикання;

асинхронний двигун M1 (МТКН412-8), який обертає редуктор підйомного механізму;

перетворювач частоти UZ1 (Sinus K0049 4ТВА2К2) для частотного регулювання швидкості обертання вала асинхронного двигуна M1, залежно від завдання, що надходить із пульта керування оператора.

Пульт управління оператора включає:

ручку-потенціометр SA1, яка під'єднана до перетворювача частоти і залежно від положення ручки-потенціометра формує завдання 0-10В, прямо пропорційне лінійній швидкості руху гака підйомного механізму 0-0.2 м/с;

кнопка підйому вантажу SB1, що формує завдання на напрямок обертання вала двигуна в напрямку руху вантажу вгору; кнопка опускання вантажу SB2, що формує завдання на напрямок обертання вала двигуна в напрямку руху вантажу вниз;

лампа індикації HL1, яка сигналізує про працездатність системи загалом; лампа індикації HL2, яка сигналізує про аварійний стан системи (випадки появи струмів короткого замикання, перевантаження, зникнення напруги живлення, перекосу фаз тощо).

Контактор KM1 призначений для блокування керування підйомним механізмом у разі виникнення аварійної ситуації. В останньому випадку контактор KM1 розмикає нормально замкнутий контакт KM1, у такий спосіб знімаючи дозвільний сигнал роботи для перетворювача частоти, а також призводить до спрацьовування електромеханічного гальма, що блокує редуктор, у такий спосіб блокуючи самостійне опускання вантажу.

У додатку 1 представлено зовнішній вигляд пульта керування перетворювача частоти Sinus K0049 4ТВА2К2.

Додаток А

Світлодіод RUN:
Світлиться при роботі перетворювача

Світлодіод REF:
Світлиться при наявності заданої частоти/швидкості/моменту

Світлодіод REF горить, якщо команди керування надходять через послідовний інтерфейс

Світлодіод TRM горить, якщо команди керування надходять через клеми

Тільки за VTC:
Світлодіод RUN:
миготить, якщо перетворювач готовий до роботи (двигун має живлення)

Тільки за IFD:
Світлодіод RUN та світлодіод REF:
два світлодіода миготять, якщо перетворювач знижує швидкість до 0.

↓ Стрілка вниз:
переміщення по меню та зменшення значень параметрів

Prog вхід та вихід з підменю.
Дозволяє зміння параметрів

MENU вхід в головне меню



RESET:
Зкид сигналу тривоги

↑ Стрілка вгору:
переміщення по меню та збільшення значень параметрів

SAVE:
зберігає значення параметрів

START:
Пуск двигуна
(тільки в режимі KeyPad)

STOP:
Зупинка двигуна
(тільки в режимі KeyPad)

Рисунок 6.2 – Зовнішній вигляд лицьової панелі пульта управління частотного перетворювача

Висновки по 6 розділу:

1. Було побудовано схему електричну принципову та повністю її описано.
2. Також у додатку А було описано функції кожної кнопки на панелі пульта управління частотного перетворювача

ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

Позна-чення	Найменування	Кільк.	Примітка
	<i>Автоматичний вимикач</i>		
QF1	BA57-31	1	
	<i>Кнопка</i>		
SB1, SB2	Lemanso LSW34	2	
	<i>Електродвигун</i>		
M1	МТКН412-8 26кВт 380В 715 об/хв	1	
	<i>Перетворювач частоти</i>		
UZ1	Sinus K0049 4ТВА2К2	1	
	<i>Лампа індикації</i>		
HL1, HL2	AcKo AD22-22DS	2	
	<i>Ручка потенціометр</i>		
SA1	KLS4-PK02 G21-S	1	

141.ЕП9212.024.БР				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Ступеньков Д.С.		
Керівн.		Сергієнко О. В.		
Реценз.		Виш		
Н. Контр.		Теряев. В. І.		
Зав. каф		Ковбаса С. М.		
Автоматизація електромеханічної системи мостового крана Специфікація				
		Літ.	Арк.	Акрушів
		КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, каф. АЕМС-ЕП зп. ЕП-92		

Загальні висновки

У результаті виконання дипломної роботи (проєкту) було розроблено і досліджено автоматизований електропривод для механізму підйому вантажу і механізму переміщення візка мостового крана. Ухвалено рішення про спосіб регулювання швидкості приводу механізму підйому мостового крана.

Для досягнення мети в роботі виконано:

- аналітичний огляд розімкнених систем керування швидкістю механізму підйому вантажу і механізму переміщення візка мостового крана;
- розраховані та обрані основні елементи приводів; - досліджено функціональну та структурну схеми;
- обрано регулятор швидкості.

Також було досліджено перехідні процеси під час пуску та накидання навантаження, що показало незаперечну перевагу використання саме частотного регулювання швидкості АД. Розраховано механічні характеристики відповідно до частотного закону регулювання швидкості АД.

Перевагою частотного способу регулювання швидкості асинхронного двигуна є плавна зміна швидкості від нуля до максимальної (номінальної) за незмінної жорсткості механічної характеристики та перевантажувальної здатності двигуна. Діапазон керування становить 5-10 для розімкнутих систем і 1000 і більше для замкнутих. Недолік полягає у відносній складності та підвищеній вартості перетворювача частоти. Але цей недолік компенсується тим, що окупність експлуатації перетворювача частоти значно вища за рахунок економії електроенергії.

З усього перерахованого вище можна зробити висновок, що незважаючи на значну вартість частотного перетворювача, витрати компенсуються не тільки якісними показниками, а й економічними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирнітський Б.В. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів/Б.В. Смирнітський. - Харків, ХДПУ, 1998. - 380 с.
2. Єсаков В.П. Електроустаткування та електропривод промислових установок. Київ: Вища школа, 1981. - 247 с.
3. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика) / За редакцією М.Г.Поповича, В.В.Кострицького: навчальний посібник. – К.:КНУТД, 2008. – 408 с.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За редакцією М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
5. Теорія електропривода / За ред. М.Г. Поповича. -К.: Вища школа, 1993. 494 с.
6. B. Bose. Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. Elsevier 2010. 935p.
7. How to Select the Right Drive For Your Overhead Crane | Hi-Speed Industrial Service. Hi-Speed Industrial Service. URL: <https://www.gohispeed.com/how-to-select-the-right-drive-for-your-overhead-crane/> (16.06.2023).
8. Wikiwand - Підйомно-транспортні машини. Wikiwand. URL: https://www.wikiwand.com/uk/Підйомно-транспортні_машини (дата звернення: 16.06.2023).
9. Автоматичний вимикач: <https://zyabkin.com.ua/ua/avtomaticheskij-viklyuchatel-va57-31-341810-40a-400-690ac-nr400ac-uhl3-keaz/p230410/>
10. Кнопка: <https://lemanso.com.ua/ua/elektromontazhnoe-oborudovanie/knopki-elektricheskie/knopka-lemanso-lsw34-kruglaya-chyornaya-bez-fiks-ds-227->

[mgno?gclid=EAIaIQobChMIgOy15ObI_wIVzgWiAx2AHwm4EAQYASABEgK_TGfD_BwE](https://www.google.com/search?q=mgno?gclid=EAIaIQobChMIgOy15ObI_wIVzgWiAx2AHwm4EAQYASABEgK_TGfD_BwE)

11. Електродвигун: <https://agroug.in.ua/ua/p1288987537-kranovyj-elektrodvigatel-mtfn.html>

12. Перетворювач частоти: <https://eleksun.com.ua/uk/sinuspenta00404tba2k5-preobrazovatel-chastoty-sinus-penta0049-37kvt-380v-elettronica-santerno.html>

13. Лампа сигналізації: https://luxelectro.com.ua/ru/signalnaya-lampa-asko-ad22-22ds-220v-ac-22-ip54-krasnyj-detail.html?gclid=EAIaIQobChMIqK_buufI_wIV7xJ7Ch0YfA-qEAQYASABEgLGTPD_BwE

14. Ручка потенціометр: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/cls4-pk02-g21-s_162066.html