ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРІ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЛІПШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КРАНУ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:
Дмитро ІВАНЕНКО
гр. ХарЕМ22-1з

Керівник:
Віталій Колотіло
Старший. вікл, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЄТ

_____ Микола ХВОРІСТ

_____2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Іваненко Дмитро Ігорович
прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Поліпшення динамічних властивостей електроприводу механізму пересування крану

керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи Колотіло Віталій Іванович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від 27.02.2026 № 184-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 15.06.2026 р.

3.Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики, статистичні дані щодо надійності та відмов транспортних засобів, літературні джерела з експлуатації, обслуговування та ремонту обладнання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка)

- Призначення та технічні характеристики козлового крана .
- Кінематичні особливості козлових кранів.
- Огляд існуючих систем керування електроприводами механізмів пересування козлових кранів.
- Особливості дворухового електроприводу.

4.2. Розробка технічного завдання (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо, розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм управління, програмне забезпечення)

- Вибір двигуна.
- Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.
- Вибір перетворювача частоти.
- Розрахунок природних характеристик електроприводу.
- Розрахунок статичних характеристик двигуна та елементів силового каналу та навантаження електроприводу при частотному векторному керуванні.
- Параметри, структурні схеми та моделі системи перетворювач частоти - асинхронний двигун.

4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм управління, програмне забезпечення)

- Оптимізація контуру струму з ПІ-регулятором.
- Параметри контуру контуру струму з ПІ-регулятором.
- Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором.
- Розробка імітаційної моделі електроприводу.

4.4. Охорона праці.

- Загальні питання.
- Аналіз виявлених шкідливих факторів проектованого виробничого середовища.
- Заходи захисту від шкідливих факторів виробництва.
- Охорона навколишнього середовища.
- Розрахунок пристрою захисного заземлення.
- Захист у надзвичайних ситуаціях.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

1. Титульний.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Мета, задачі, актуальність роботи.
4. Технологічна схема обладнання.
5. Кінематична схема механізму пересування крана.
6. Електричний двигун AMTKE132L6 .
7. Оптимізація контурів регулювання.
8. Моделювання.
9. Імітаційна модель дворухового електроприводу при скалярному керуванні .
10. Імітаційна модель дворухового електроприводу при векторному керуванні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна.
11. Висновки.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	**Ім'я Прізвище та посада консультанта**	**Підпис, дата**	
		завдання бачив	**завдання прийнявши**
Основна частина	*Колотіло ВІТАЛІЙ*		
Антиплагіат	*Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.*		
Нормоконтроль	*В'ячеслав ШАВКУН, доц.*		

7. Дата видачі завдання 16.05.2026 нар.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	**Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи**	**Строк виконання етапів роботи**	**Примітка**
1	*Стан питання*	23.05 – 29.05.2026	
2	*Розробка технічного завдання*	30.05 – 05.06.2026	
3	*Розрахункова частина*	06.06 – 12.06.2026	
4	*Охорона праці*	06.06 – 12.06.2026	
5	*Оформлення паперового та електронного варіантів роботи*	06.06 – 12.06.2026	
6	*Підготовка доповіді та презентації*	12.06 – 20.06.2026	

Здобувач **Дмитро ІВАНЕНКО**
(підпис) (прізвище та ініціалі)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи **Віталій КОЛОТІЛО**
(підпис) (прізвище та ініціалі)

Анотація

Випускна кваліфікаційна робота 72 аркуші, 28 малюнки, 9 джерело.

Ключові слова: дводвигуновий електропривод, частотно-регульований, електропривод, кран козловий, управління векторне, вирівнювання навантаження.

Актуальність роботи: Механізм пересування козлового крана повинен забезпечити синхронне обертання двох електроприводів навіть при зміні навантаження для нього потрібно розробити модель дворухового електроприводу

Об'єктом дослідження є електропривод дворухового механізму козлового крана його пересування.

Завдання та цілі роботи полягають у дослідженні та розробці дворухової системи управління з частотними перетворювачами та з датчиками по зв'язках зворотним, що забезпечує обертання узгоджене, при якому реалізовуватиметься рух рівномірний опор крана козлового.

Робота складається з розділів, так само ведення, та висновок, представлений список використаних джерел.

У процесі роботи провели дослідження електроприводу дворухового частотно-регульованого.

За результатами дослідження було обґрунтовано адекватність імітаційних моделей, так само отримано параметри налаштування даної системи, яка забезпечує синхронізації швидкостей при роботі обертання двох приводів та при зміні навантаження.

Зміст

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС 9
1.1 Призначення та технічні характеристики козлового крана 9
1.2 Кінематичні особливості козлових кранів 12
1.3 Огляд існуючих систем керування електроприводами механізмів пересування козлових кранів 15
1.4 Особливості дворухового електроприводу 18
2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КОЗЛОВОГО КРАНА 21
2.1 Вибір двигуна 21
2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна 27
2.3 Вибір перетворювача частоти 31
2.4 Розрахунок природних характеристик електроприводу 34
2.5 Розрахунок статичних характеристик двигуна та елементів силового каналу та навантаження електроприводу при частотному векторному керуванні 36
2.6 Параметри, структурні схеми та моделі системи перетворювач частоти - асинхронний двигун 38
3 ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ 41
3.1 Оптимізація контуру струму з ПІ-регулятором 41
3.2 Параметри контуру контуру струму з ПІ-регулятором 42
3.3 Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором 44
3.3.1 Контуру потокозчеплення 45
3.3.2 Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором 46
3.4 Розробка імітаційної моделі електроприводу 47
3.4.3 Математична модель асинхронного двигуна 47

3.4.4 Механічна частина електроприводу механізму пересування козлового крана 51

3.4.5 Перевірка адекватності розробленої моделі асинхронного двигуна .. 53

3.4.6 Дослідження способів керування для електроприводу системи "перетворювач частоти - асинхронний двигун" 54

4 ОХОРОНА ПРАЦІ 62

4.1 Загальні питання 62

4.2 Аналіз виявлених шкідливих факторів проектованого виробничого середовища 62

4.3 Заходи захисту від шкідливих факторів виробництва 64

4.4 Охорона навколишнього середовища 66

4.5 Розрахунок пристрою захисного заземлення 67

4.6 Захист у надзвичайних ситуаціях 69

ВИСНОВКИ 71

ПЕРЕЛІК ЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 72

ВСТУП

Підйомно-транспортні машини є великою категорією пристроїв загальнопромислового призначення, призначених для виконання різноманітних вантажно-розвантажувальних операцій. Серед них виділяються крани різних типів: мостові, баштові, козлові, поворотні та інші. Особливо затребуваними у складних умовах експлуатації та при інтенсивних режимах роботи є козлові крани.

Козлові крани оснащені дворуховими електроприводними системами, що забезпечують горизонтальне переміщення крана. Ці системи включають механізми переміщення, які встановлюються біля основи стійок, що формують основну несучу частину конструкції. Однією з ключових вимог механізму переміщення є узгоджений рух опор козлового крана при однаковій швидкості обертання його електроприводів, що вимагає використання спеціалізованої системи синхронізації або узгодження. Дані механізми переміщення є унікальними у необхідності застосування таких систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Вибрати електродвигуни та перетворювачі частоти, зробити розрахунок їх технічних характеристик на основі схеми заміщення, а також отримати механічні та електромеханічні параметри двигунів.

2. Побудувати модель у середовищі Simulink Matlab, що дозволяє симулювати дворуховий електропривод для переміщення козлового крана. Модель повинна включати два перетворювачі частоти, два двигуни, реактивне навантаження та контури зворотних зв'язків.

3. Провести дослідження створеної імітаційної моделі асинхронного частотно-регульованого електроприводу в різних режимах роботи – за різних рівнів перевантаження та заданих швидкостей. Також необхідно підібрати коефіцієнти для компенсації моменту та ковзання з метою мінімізації навантажень двигунів з різними параметрами.

4. Провести аналіз небезпечних та шкідливих умов експлуатації, оцінити можливі негативні впливи на навколишнє середовище, а також вивчити

наднормативні ситуації, які можуть виникати під час використання електроприводу козлового крана.

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

1.1 Призначення та технічні характеристики козлового крана

У період козлові крани займають ключову роль механізації перевантажувальних і складських операцій, охоплюючи різні галузі економіки народного господарства. Ці крани відносяться до мостових типів і входять до категорії підйомно-транспортних машин, що характеризуються короткочасним або повторно-короткочасним режимом роботи електроприводів.

Залежно від призначення козлові крани поділяються на три основні категорії: загального призначення (перевантажувальні), будівельно-монтажні та спеціалізовані. Вони широко застосовуються обслуговування відкритих складів і вантажних майданчиків, монтажу конструкцій, забезпечення роботи промислових підприємств, гідротехнічних споруд, і навіть виконання вантажних операцій на контейнерних майданчиках залізничних станцій. Робоча температура їхньої експлуатації варіюється від -40 до +40 градусів. Вантажопідйомність таких кранів зазвичай становить від 3,2 до 50 тонн, а проліт від 10 до 40 метрів. Висота підйому вантажу залежить від умов завантаження/розвантаження транспортних засобів або штабелювання і коливається в межах 7–16 метрів.

Особливе місце серед цих конструкцій посідає унікальний кран моделі ЛТ-62. Він знайшов широке застосування на нижніх лісових складах для розвантаження хлистів з лісовозів та формування запасів деревини.

Конструкція крана ЛТ-62 включає ферму, що несе, розташовану на високих опорах — жорсткій і шарнірній. Опори встановлюються на ходові візки, які переміщаються крановими шляхами. Шарнірне з'єднання опор компенсує їх нахил щодо один одного і нівелює можливі неточності укладання шляхів. Вантажний візок переміщається вздовж ферми, що несе, за допомогою лебідки. У ряду моделей передбачено дві лебідки, закріплені на різних ділянках ферми. Кабіна оператора знаходиться у верхній частині жорсткої опори.

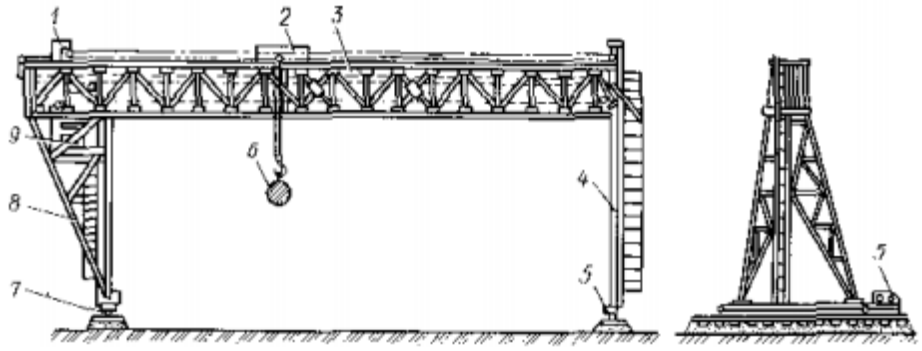


Рисунок 1 - Козловий кран ЛТ-62: Лебідка 1; Вантажний візок 2; Несуча ферма 3; Опори - твердої 8 і 4 шарнірної конструкції; Ходові візки 5 та 7; Вантаж 6; Кабінка кранівника 9;

Вантаж можна переміщати в трьох напрямках: вертикально при підйомі або опусканні, вздовж прольоту крана під час руху візка і підкрановими шляхами разом з самою конструкцією. Штабелі розміщуються усередині прольоту крана.

Шляхи для переміщення вантажного візка можуть бути розташовані або на фермі, що несе, або перед нею. У першому випадку використовуються рейки, а у другому - двотавровий швелер, закріплений до нижнього поясу ферми. Механізм підйому та опускання вантажу у таких кранів складається з вантажної лебідки та канатно-блокової системи, що включає поліспаст з гаковою обоймою. Лебідка може бути розташована або безпосередньо на вантажному візку, або на фермі, що несе. У моделей з високою вантажопідйомністю можливе використання двох лебідок, встановлених з обох боків ферми. Вантажний візок є рамною конструкцією з ходовими колесами, а також вузлами поліспаста і, в деяких випадках, вантажною таллю. Залежно від положення шляху візка (на фермі або перед ним), він або спирається на колеса, або підвішується до них. При цьому конструкція візка може включати два поліспасти, з гілки яких звисають по обидва боки ферми, що несе.

Однобарабанна реверсивна лебідка відповідає за переміщення візка вздовж ферми, зазвичай розташовуючись біля жорсткої опори. У барабані цієї лебідки фіксуються обидва кінці тягового каната. Конструкція дозволяє забезпечувати рух візка завдяки намотуванні одного кінця троса при

розмотуванні іншого. Напрямок руху регулюється реверсуванням двигуна лебідки, а зупинка здійснюється за рахунок електромагнітного гальма. Для безпечної експлуатації колії візки обладнані обмежувальними упорами.

У вантажному візку мостових кранів встановлюються пристрої підйому вантажу та механізми його руху з індивідуальними приводами. Ці пристрої оснащені гальмівними системами та обмежувачами висоти підйому вантажу, а також кінцевими вимикачами руху візка для запобігання аварійним ситуаціям.

Електропостачання козлових кранів зазвичай здійснюється за допомогою еластичних чотирижильних кабелів. Різні моделі кранів оснащені барабанним механізмом, який автоматично намотує та розмотує електричний кабель під час руху крана. Електродвигуни козлових кранів отримують електроенергію через тролейні провідники, прокладені вздовж естакади. Електроенергія, що подається до двигунів вантажного візка, також надходить із тролейних провідників, розташованих уздовж моста. Козлові крани з краями ферми, що несе, які виступають за межі опор у формі консолей, називаються консольно-козловими. Такі крани дозволяють розміщувати штабелі додатково перед консолями, що збільшує зону для розміщення вантажів і за тієї ж довжини кранових шляхів забезпечує можливість більшого обсягу лісоматеріалів.

Основні параметри та характеристики обладнання представлені в таблиці 1.

Показники	Норма
Номінальна вантажопідйомнісить т	32
Найвища висота підйому	11,8
Швидкість підйомк вантажу, м/хв	13,4±1,0
Швидкість переміщення візка, м/хв	32,6±1,0
Швидкість уповільненої посадки вантажу, м/хв	12,0±1,0
Швидкість пересування перевантажувальника, м/хв	51,0±2,0
Встановлена потужність, кВт не більше	129
Режим роботи двигуна, ТВ	Середній 25
Довжина прольту, м	40-0,04
Вага конструкції, т	95,6

Технічні дані канатів, встановлених на перевантажувачі, наведено у таблиці 2.

Наіменування	Діаметр	Довжина пролёта	Позначення
Канат грузовой (2 конца)	21,5	203	21,5-Г-В-Н-180 ГОСТ 3079-69
Тяговой канат пересування візка	15,0	126	15-Г-1-Н-170 ГОСТ 3081-69

Таблиця 3. Технічні данні підйомної лебідки

Наіменування показника	Норма
	3899
Тяговое усилие максимальное Н	4506
Диаметр каната мм	21,5
Диаметр барабана мм	571,5
Передаточное число редуктора	У2У-400Н-25-22М - 25

Таблиця 4 - Технічні данні механізму перевантаження

Наіменування показника	Норма
Діаметр ходових колес мм,	600
Передатне число відкритої зубчастої зубної пари	2,82
Загальне передатне число	35,
Передатне число редуктора	У2У-200Н-12,5-22М – 12,5

1.2 Кінематичні особливості козлових кранів

В меанізмах переміщення кранів найбільшого поширення набув багатомоторний привід, у якому кожна кінцева балка моста переміщається з допомогою власного незалежного приводу. Однак між приводами, встановленими на різних кінцевих балках, існує взаємозв'язок, який забезпечується зовнішньою системою синхронізації, не пов'язаною безпосередньо з металоконструкціями. Такий підхід дозволяє точно здійснювати пересування крана рейками.

На рисунку 2 представлена кінематична схема механізму пересування крана. Конструктивно машини для переміщення виконуються у вигляді одновісних або балансирних візків, закріплених на стійках та з'єднаних із опорною частиною. Рідко зустрічаються ходові балки, на які припадають дві стійки. У цій схемі роботи механізму пересування козлового крана продемонстровано два одночасно працюючі приводи. Кожен із них складається з двигуна (1), з'єднаного через муфту (2) з редуктором (4), який передає обертання на провідні колеса (7). Вісь приводної шестерні об'єднана з тихохідним валом редуктора за допомогою перехідного валу (6) та зубчастих муфт (5). На напівмуфті швидкохідного валу редуктора встановлено гальмо (3).

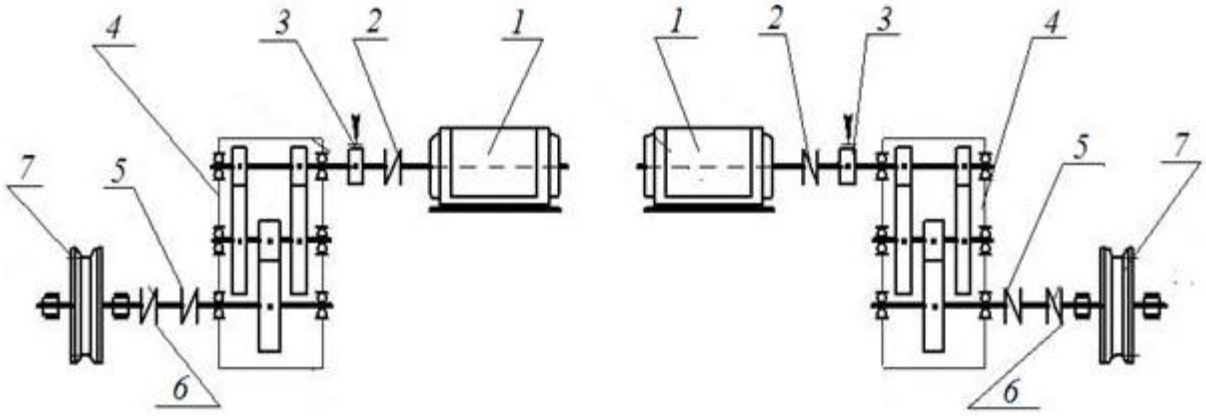


Рисунок 2 - Кінематична схема механізму пересування крана:

До переваг багатомоторного приводу відносяться компактність конструкції, мінімальний момент інерції електродвигунів та скорочення часу запуску. Як електроприводи в механізмах переміщення застосовуються двигуни постійного та змінного струму. Однак з розвитком технологій електроприводів застосування двигунів постійного струму стало менш актуальним, і на сьогоднішній день широкого поширення набули асинхронні електричні машини з фазним або короткозамкненим ротором.

Такі двигуни проектують для роботи в режимі повторно короткочасного навантаження, що характеризується тривалістю включень (ТВ) 15, 25, 40 або 60% при циклі менше 10 хвилин. Основним номінальним режимом роботи кранових двигунів змінного струму вважається ТВ = 40%. Вибір типу

електроприводу визначається робочими режимами механізмів, а також параметрами вантажопідйомності пристрою.

Вимоги до електроприводу механізму горизонтального пересування:

До механізмів горизонтального пересування відносять елементи пересування кранів, вантажних візків, а також механізми повороту. Усі вони характеризуються реактивним моментом навантаження (незалежним від напрямку переміщення). Оптимальний електропривод такої системи повинен забезпечувати жорсткі механічні характеристики як режимах розгону, так і гальмування (рисунок 3). На відміну від підйому, гальмування у пристроях горизонтального руху займає порівняно малу частину робочого циклу та відбувається, як правило, при переході від високих швидкостей до низьких.

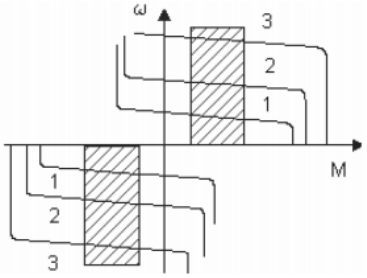


Рисунок 3 - Бажані механічні характеристикиелектроприводу механізму горизонтального переміщення

Як приклад на рисунку 3 наведені бажані характеристики електроприводу механізму горизонтального пересування.

При гальмуванні електропривід може працювати навіть під час ухилу, що буває, наприклад, якщо пошкоджені рейкові шляхи або при дії вітрового навантаження.

Значною особливістю механізмів пересування та повороту є велика механічна інерція. Ця властивість стає особливо помітною при зростанні маси конструкції, що пересувається, і збільшенні швидкості її руху. Щоб уникнути надлишкових динамічних навантажень на металоконструкції, електропривод повинен обмежувати прискорення під час запуску та гальмування установки. Момент інерції рухомих мас для кранових механізмів може бути в 2-20 разів більший за момент інерції самого двигуна.

З цієї причини при високій частоті випробувань значне навантаження зазнають через динамічні дії, що визначають необхідну потужність двигуна. У цьому статичні навантаження залишаються щодо невеликими.

У системі гальмування горизонтальних електроприводів використовується спрощений принцип проти механізмами підйому. Завдяки особливостям реактивного моменту зняття гальма допускається до досягнення двигуном статичного моменту обертання. Однак ключова вимога полягає в тому, щоб гальмо накладалося при мінімальних швидкостях руху, близьких до нуля. Це дозволяє знизити динамічні навантаження та зменшити знос гальмівних накладок.

Діапазон регулювання швидкості пристрою за заданої номінальної потужності орієнтований на досягнення необхідної зниженої швидкості. Наявність такої зниженої швидкості, до якої пристрій переходить перед зупинкою, полегшує роботу оператора, підвищує зручність управління та забезпечує більш точну зупинку. [1, 7]

1.3 Огляд існуючих систем керування електроприводами механізмів пересування козлових кранів

У механізмах переміщення козлових кранів застосовується кілька типів систем управління, включаючи релейно-контакторні, дросельні та частотно-регульовані. На сьогодні найбільш поширеним типом електроприводу для цих кранів залишається система на основі асинхронного двигуна з фазним ротором і реостатним управлінням, що реалізується через силові контролери або релейно-контакторні схеми. Ця практика обумовлена тривалими термінами експлуатації більшості кранів, які найчастіше перевищують десятки років і переважно випущені в радянський період. До системи управління також входить функція узгодження механізмів руху.

Застосування релейно-контакторних систем керування викликане особливостями умов експлуатації козлових кранів, що включають тролейне живлення, підвищений вміст пилу, високу вологість, загазованість, перепади

температури, значну інтенсивність роботи обладнання, а також часті та тривалі підключення. Незважаючи на широке використання даних систем, їхня ефективність залишається низькою. Це пояснюється низкою факторів. По-перше, перемикання щаблів пускових опорів у процесі розгону двигуна викликає стрибки моменту і значні коливання струмів, що посилюється зменшенням кількості щаблів. Така поведінка системи призводить до виникнення механічних вібрацій та знижує плавність перехідних процесів. По-друге, у багаторухових електроприводах козлових кранів з довгими прольотами (наприклад, 25 метрів) несинхронне замикання контактів релейно-контакторної системи викликає відмінності в прискоренні кожного з асинхронних двигунів з фазним ротором, що призводить до додаткових динамічних навантажень на механізми та конструктивні елементи. Зрештою, це знижує продуктивність і призводить до передчасного виходу з ладу окремих компонентів.

Крім релейно-контакторної, для керування механізмом крана застосовується дросельна система, яка виявляється більш ефективною в нерегульованому електроприводі. Використання пускового дроселя дозволяє обмежити струм асинхронного ротора двигуна під час запуску і гальмування, забезпечуючи плавність даних процесів навіть за відсутності системи управління ротором. Швидкість обертання ротора підтримується в межах 0,5–0,6 від синхронної, що нівелює надмірні стрибки моменту. Дросельна система ліквідує необхідність застосування релейно-контакторної схеми управління та виключає використання кабельних з'єднань для включення пристроїв у ланцюг ротора. Це спрощує конструкцію електроприводу та підвищує надійність пристрою. Завдяки забезпеченню плавного запуску обладнання та м'якшого гальмування збільшується термін служби автоматичних вузлів крана. Додатково усувається вплив людського фактора, оскільки параметри розгону та гальмування встановлені в процесі налаштування та залишаються незмінними.

Тим не менш, використання асинхронних двигунів з фазним ротором на сучасному етапі вважається неактуальним через високу вартість реалізації такого рішення. Для підвищення довговічності та надійності роботи механізмів

необхідна модернізація існуючих систем керування або розробка нових підходів до регулювання електроприводів крана. Це дозволить врахувати всі технічні вимоги, що пред'являються, і поліпшити експлуатаційні характеристики обладнання.

В даний час спостерігається стійка тенденція переходу від нерегульованих електроприводів козлових кранів з релейно-контакторними та дросельними системами до регульованих частотно-регульованих приводів на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором (АКЗ). Частотне регулювання є найефективнішим способом керування швидкістю двигуна змінного струму, надаючи оптимальні механічні характеристики асинхронних машин.

Серед переваг частотно-регульованих приводів можна виділити:

- Плавне керування швидкістю та висока стабільність динамічних характеристик, що дозволяють реалізувати регулювання у широкому діапазоні.

- Економічне керування: двигун функціонує з мінімальними значеннями ковзання, що зменшує втрати енергії.

На сьогоднішній день в галузі використання частотно-регульованих електроприводів у козлових кранах відсутні розроблені математичні моделі дворухового електроприводу, які застосовуються до автоматичного електроприводу системи маневрування краном. Це особливо актуально при регулюванні швидкостей обертання двигунів з використанням напівпровідникових перетворювачів за схемою «Перетворювач частоти – асинхронний двигун із короткозамкненим ротором» (ПЧ-АТ). Крім того, досі не проведено дослідження ефективності методів керування для таких систем частотно-регульованих електроприводів.

Особливістю електроприводів горизонтального переміщення і те, що у більшості випадків їх реалізація здійснюється як багаторухових систем. У цій ситуації електродвигуни можуть отримувати харчування як від єдиного перетворювача частоти, що є більш економічним варіантом, і від окремих

перетворювачів. Останній підхід дозволяє забезпечити гнучкіше управління крановими механізмами.

Використання окремих перетворювачів частоти живлення кожного двигуна виявляється найбільш доцільним у приводах систем маневрування мостових і козлових кранів з великими прольотами. У такій конфігурації можна досягти більш високого рівня гнучкості керування, включаючи розподіл навантаження між двигунами за схемою «ведучий-відомий», синхронізацію роботи приводів для запобігання перекосу мосту та інші переваги.

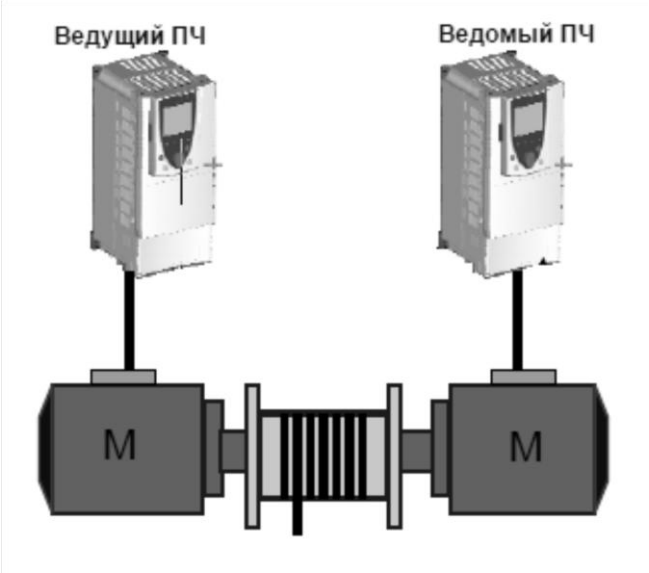


Рисунок 4 - Конфігурація «ведучий-відомий»

1.4 Особливості дворухового електроприводу

Основна відмінність багаторухової електричної системи приводу від одно-рухової полягає в тому, що передача силового потоку до провідної ланки здійснюється не від одного, а від кількох джерел енергії, тобто двигунів. Очевидно, що багаторуховий привід має низку переваг у порівнянні з одно-рухової системою, особливо при використанні у важких технічних пристроях.

З теоретичної точки зору багаторухові електроприводи демонструють розширені можливості, включаючи більш точне регулювання швидкості та моменту обертання, взаємне резервування потужності, зниження сумарного моменту інерції системи в порівнянні з одноруховими системами, а також можливість створення потужних установок за рахунок застосування серійних

електричних машин малої потужності. Крім того, вони сприяють спрощенню автоматизованого обладнання та забезпечують ефективніший розподіл електродвигунів.

Проте практика експлуатації багаторухових систем виявила низку проблем. Зокрема, в деяких механізмах виникають значні коливальні процеси в трансмісіях, що спричиняє серйозні навантаження і в ряді випадків призводить до руйнування окремих елементів приводу. Це тим, що у ідентичних двигунах можуть спостерігатися відмінності в механічних характеристиках через неоднорідності обмоток, відмінностей у магнітних потоках та інших чинників. Зазначені особливості сприяють виникненню складних коливальних явищ, які зумовлюють нерівномірність кутових швидкостей двигунів та неминучий перерозподіл навантажень між ними.

Нерівномірний розподіл навантажень між електродвигунами може призводити до перевантаження окремих двигунів, а також до нерівномірного зношування компонентів кінематичної передачі, включаючи зубчасті передачі, редуктори та шпинделі. Таким чином, одним із ключових завдань у багаторухових системах машинних апаратів є забезпечення рівномірного розподілу навантаження між двигунами як у статичних, так і динамічних режимах.

У зв'язку з цим виникає необхідність аналізу процесу розподілу навантаження у статичних умовах. Розглянемо спрощену модель багаторухового приводу із двома асинхронними електродвигунами. На рисунку 5 демонструється характер розподілу навантаження між двома асинхронними двигунами з різними жорсткостями механічних характеристик. Двигун Д2 з більш м'якою характеристикою виявляється менш навантаженим.

Якщо у двигунів номінальний момент однаковий і відповідає половині моменту опору системи, один з них (Д2) залишиться недовантаженим, тоді як другий (Д1) зазнає значного навантаження. При тривалій роботі це неминуче викликає перегрів двигуна Д1, що може призвести до його виходу з експлуатації.

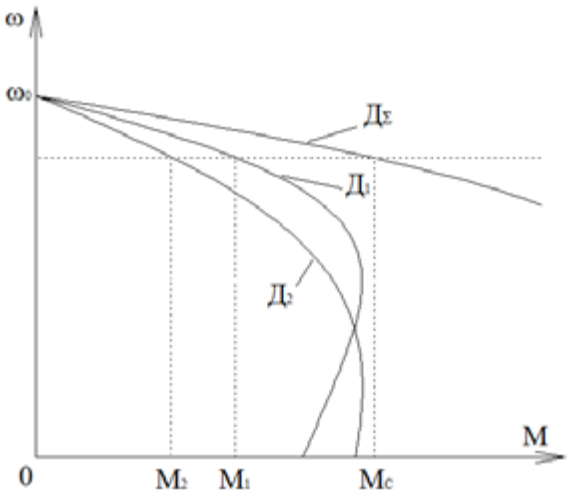


Рисунок 5 – Розподіл навантажень у приводі з двома асинхронні електродвигуни.

Виходячи з вищевикладеного, у роботі розглядатиметься дворуховий асинхронний електропривод, призначений для синхронізованого обертання механізмів маневру козлового крана. Управління такими багаторуховими електроприводами передбачається здійснювати з використанням окремих частотних перетворювачів.

З урахуванням вимог та специфіки, що висуваються до механізмів маневру козлових кранів, необхідно забезпечити узгодженість швидкостей роботи електроприводів, а також увагу до оптимальних режимів розгону, гальмування та стійкості до різних динамічних впливів, спричинених нерівномірним розподілом навантажень.

2 ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ КОЗЛОВОГО КРАНА

2.1 Вибір двигуна

Козловий кран ЛТ-62 спроектований до роботи на відкритих просторах, тому вибір потужності двигуна складає основі розрахунку зусиль, що у механізмі [5, 8, 9]. Для цього представимо навантажувальну діаграму, що відображає робочі навантаження, які має долати механізм у рамках технологічного циклу. Отримані діаграми будуть застосовуватись надалі при проведенні досліджень та імітаційного проектування.

Кран переміщуємось поперечно в одному напрямку спочатку масу m1: протягом часу tp1, потім масу m2 протягом часу tp2. Причому tp1 = tp2 = tp. між переміщеннями вантажів є рівні паузи для зняття та завантаження вантажу. Тоді навантажувальна діаграма матиме вигляд (Рисунок 6).

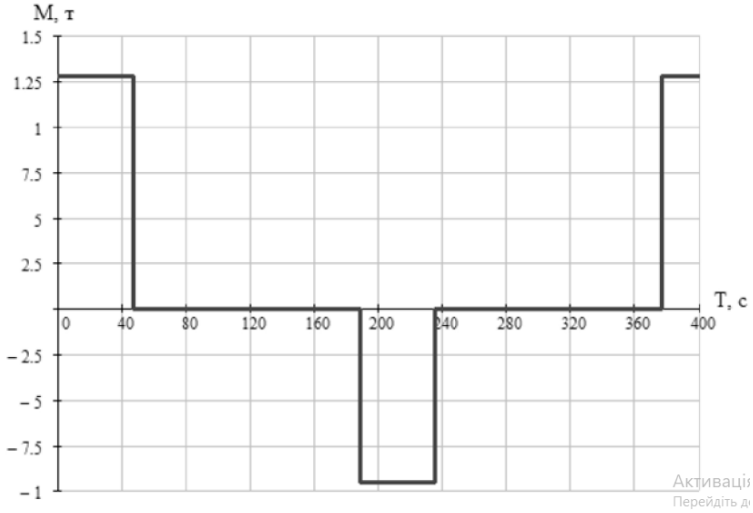


Рисунок 6 – Діаграма навантаження

Маси та m_2 знаходимо як

$$m_1 = m_н + m_{кр} = 32000 + 95600 = 127\ 600 \text{ кг}. \quad (2.1)$$

$$m_1 = m_{кр} = 95600 \text{кг}, \quad (2.2)$$

де $m_н$ - номінальна вантажопідйомність, т;

$m_{кр}$ -маса конструктивна, тобто.

Час роботи tp. визначимо за величиною переміщення L та номінальної швидкості крана vн,

$$t_р = L / vн = 40 \cdot 60/51 = 47{,}059 \text{ с.} \quad (2.3)$$

Цикл tц визначається часом, поле якого процес повторюється

$$t_ц = 2 \cdot tp / ТБ = 2 \cdot 47{,}059 / 0{,}25 = 376{,}471 \text{ с.} \quad (2.4)$$

Часи пауз tп визначаємо за вихідними даними механізму як

$$t_п = tp \cdot (1\text{-}ТВ) / ТБ = 47{,}059 \cdot (1\text{-}0{,}25) / 0{,}25 = 141{,}176 \text{ с.} \quad (2.5)$$

Сумарний час пауз

$$t_Σ = tц \cdot \text{-} 2) \cdot tp = 397{,}471\text{-}2.47{,}059 = 282{,}353\text{с.} \quad (2.6)$$

Визначимо потужності навантажувальної діаграми. Схема докладання зусиль для козлового крана представлена наРисунок 7.

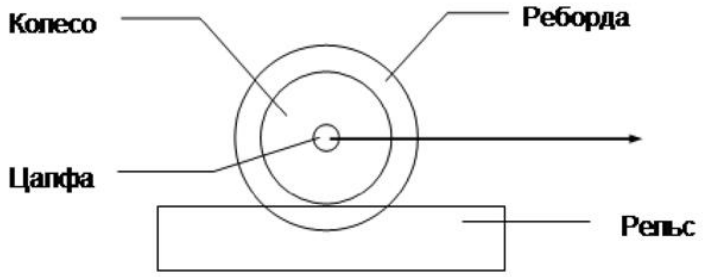


Рисунок 7 — Рух візка рейковим шляхом

Зусилля у разі визначається по [8, 9]:

$$F = \frac{k_р \cdot m \cdot g \cdot \left(\mu \cdot r_ц + f\right)}{R_к} \quad (2.7)$$

де m - сумарна маса вантажу, що перевозиться, кг;

R_k, - Радіус ходового колеса, м;

μ- Коефіцієнт тертя в підшипниках кочення коліс по рейках, приймаємо μ =0,02;

f- Коефіцієнт кочення ходових коліс по рейках, приймаємо f = 0,0004;

$До_р$- Коефіцієнт, що враховує опір від тертя реборд рейки, приймаємо Кр = 2,5;

$r_ц$, - Радіус цапфи ходового колеса, м;

Для переміщення крана з вантажем визначимо F1 згідно з формулою (2.7)

$$F1 = (0{,}25.127600 \cdot 9{,}81 \cdot (0{,}02 \cdot 0{,}6 + 0{,}0004)) / 0{,}3 = 16680 \text{ Н.}$$

Для переміщення крана без вантажу визначимо F2 згідно з виразом (2.7)

$$F_2 = 0{,}25 \cdot 95600 \cdot 9{,}81 \cdot (0{,}02 \cdot 0{,}6 + 0{,}0004) / 0{,}3 = 12500\text{Н}.$$

При відомій швидкості vн пересування механізму, статична потужність пересування визначається як

$$P_{ст} = v_н F. \qquad (2.8)$$

Підставляючи чисельні значення, отримуємо:

$$P_{ст.1} = 0{,}85\ 16680 \cdot = 14180\ \text{Вт},$$

$$P_{ст.1} = 12500 \cdot 0{,}85 = 10630\ \text{Вт}.$$

Знайдемо ККД передачі $\eta_{пров}$

$$\eta_{пер} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{пер.ном}} + \frac{\alpha}{k_з} - \alpha} \qquad (2.9)$$

де $\eta_{пров.}$— номінальний ККД кінематичної схеми, що дорівнює добутку її окремих частин, приймаємо $\eta_{пров.} = 0{,}92$;

α- Коефіцієнт, що застосовується рівним 0,08;

$до_з$, - Коефіцієнт завантаження.

Для випадку переміщення крана з вантажем коефіцієнт завантаження

$$до_{з1} = \text{m1} / (\text{mн} + \text{mкр}) = 12760 / (32000 + 95600) = 1{,}0$$

тоді

$$\eta_{пер1} = \frac{1}{\frac{1}{0{,}92} + \frac{0{,}8}{1{,}0} - 0{,}8} = 0{,}92.$$

Аналогічно визначаємо параметри для режиму переміщення крана без вантажу

$$до_{з2} = \text{m2} / (\text{mн} + \text{mкр}) = 9500 / (32000 + 95600) = 0{,}749$$

$$\eta_{пер2} = \frac{1}{\frac{1}{0{,}92} + \frac{0{,}8}{0{,}749} - 0{,}8} = 0{,}738.$$

Визначаємо еквівалентну потужність

$$P_{\text{е}}\left(ПВ=25\%\right)=\sqrt{\frac{P_{\text{ст1}}^{2}\cdot t_{\text{р1}}+P_{\text{ст1}}^{2}\cdot t_{\text{р2}}}{t_{\text{р1}}+t_{\text{р2}}}}, \quad (2.10)$$

$$P_{\text{е}}\left(ПВ=25\%\right)=\sqrt{\frac{14180\cdot 47,059+10630\cdot 47,059}{47,059+47,059}}=12530\text{Вт.}$$

Визначимо потужність двигуна з урахуванням коефіцієнта запасу

$$P_{\text{розр}}=K_{\text{з}}\cdot\frac{P_{\text{е}}}{\eta_{\text{пер.ном}}}=1,35\cdot\frac{12530}{0,92}=18390\text{ Вт}, \quad (2.11)$$

де Кз - коефіцієнт запасу, враховує додатковий нагрівання двигуна за час перехідних процесів, який не врахований при попередньому виборі потужності, приймаємо Кз = 1,35.

Розраховану потужність при реальному ТВ приводимо до потужності при стандартному ТВст = 40%

$$P_{\text{розр}}(\text{ТВ}=40\%)=P_{\text{розр}}(\text{ТВ}=40\%)\cdot\sqrt{\frac{25}{40}}=18390\cdot\sqrt{\frac{25}{40}}=14540\text{ Вт}, \quad (2.12)$$

Оскільки привід механізму пересування крана є роздільним, вибирається двигун повинен мати потужність приблизно вдвічі меншу за розрахункову. Згідно з каталогом та з урахуванням прийнятого коефіцієнта Ррозр, двигун слід підбирати таким чином, щоб умова Рдв > Ррозр була виконана.

За каталогом вибирається кілька електродвигунів найближчої потужності з різними номінальними частотами обертання [11].

Таблиця 5 – Електродвигуни найближчої більшої потужності з різними номінальними частотами обертання

Для кожного двигуна обчислюється передатне відношення (число) редуктора

$$i_{\text{р}}=\frac{n_{\text{н}}}{n_{max.\text{м}}}\text{ Вт}, \quad (2.13)$$

де nн - номінальна частота обертання двигуна;

$n_{\text{max.м}}$- Частота обертання виробничого механізму;

$$n_{\max м} = \frac{v_{пер}}{R_к \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{51}{0,3 \cdot 2 \cdot \pi} = 27 об/мин. \quad (2.14)$$

$$i_{р1} = \frac{n_{и1}}{n_{\max м}} = \frac{690}{27} = 25,5;$$

$$i_{р2} = \frac{n_{и2}}{n_{\max м}} = \frac{900}{27} = 33,3.$$

Для кожного двигуна визначається оптимальне за умовою мінімізації часу пуску передатне відношення редуктора.

$$i_{оптр} = \sqrt{\frac{J_м}{k \cdot J_{дв}}}. \quad (2.15)$$

де Jм – момент інерції виробничого механізму;

$J_{дв}$- момент інерції ротора двигуна;

до- Коефіцієнт, що враховує момент інерції редуктора, приймаємо до = 1,3,

$$i_{оптр1} = \sqrt{\frac{J_м}{k \cdot J_{дв1}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \cdot 0,281}} = 1,36;$$

$$i_{оптр2} = \sqrt{\frac{J_м}{k \cdot J_{дв2}}} = \sqrt{\frac{0,68}{1,3 \cdot 0,085}} = 2,48.$$

Для кожного двигуна визначається відношення обраного стандартного передатного відношення редуктора до оптимального передатного відношення.

$$\Theta = \frac{i_{оптр}}{i_{стр}}; \quad (2.16)$$

$$\Theta_1 = \frac{i_{оптр1}}{i_{стр1}} = \frac{1,36}{25} = 0,055;$$

$$\Theta_2 = \frac{i_{оптр2}}{i_{стр2}} = \frac{2,48}{31,5} = 0,079.$$

Промисловість випускає одно-, дво- та триступінчасті редуктори з передавальним числом зі стандартного ряду [4, 12]: 1,0; 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,24; 2,5; 2,8; 3,15; 3,55; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6; 6,3; 7,1; 8,0; 9,0.

Необхідне стандартне передатне відношення редуктора знаходимо так:

$$iстр = iст \cdot 10x \tag{2.17}$$

де істр: - Стандартне передатне число редуктора, приймаємо іст1 = 2,5, іст2 = 3,15;

х - ціле число, приймаємо х = 1;

$$iст1 = 2,5 \cdot 101 = 25$$

$$iст2 = 3,15 \cdot 101 = 31,5$$

Стандартне передатне відношення редуктора вибирається з ряду як найближче до розрахункового:

$$iстр \leq ip$$

$$25 \leq 25,5;$$

$$31,5 \leq 33,3.$$

Двигун з більшою потужністю приймається як приводний.

Вибираємо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором серії AMTKF1321L6, технічні дані представлені в таблиці 6. [11, 12]

Таблиця 6 - Технічні дані асинхронного двигуна AMTKE132L6

Тип двигуна	$P_н$, кВт	Частота обертання об/хв	$\eta_Н$, %	$\cos\varphi_Н$	$J_{дв}$, кг · м^2
AMTKF132L6	7,5	900	87	0,87	0,085
	$m_Н = \frac{M_{пуск}}{M_Н}$	$m_м = \frac{M_{мин}}{M_Н}$	$k_{iдв} = \frac{I_{пуск}}{I_Н}$	$m_к = \frac{M_{макс}}{M_Н}$	$s_Н$, %
	2,2	-	4,2	2,2	10

2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

У довідковій літературі відсутні дані параметрах схеми заміщення електродвигуна. Для їх визначення буде використовуватися Т-подібна схема заміщення, яка є найбільш простою та зручною для виконання інженерних розрахунків асинхронного двигуна. Ця схема представлена наРисунок 8[12].

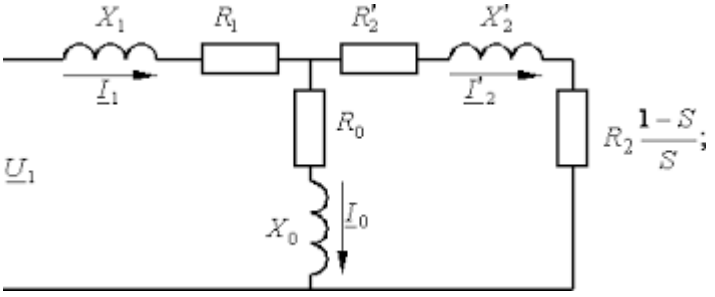


Рисунок 8 - Схема заміщення асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення

$$\begin{aligned} &\overline{U}_{1\phi} - \overline{E}_1 - j \cdot x_{1\sigma} \cdot \overline{I}_1 - \overline{R}_1 \cdot \overline{I}_1 = 0; \\ &\overline{E}_1 - j \cdot x`_{2\sigma} \cdot \overline{I}`_2 + \frac{\overline{R}`_2}{S} \cdot \overline{I}`_2 = 0; \\ &\overline{I}_1 + \overline{I}_2' - \overline{I}_0 = 0, \end{aligned} \qquad (2.18)$$

де U1ф - фазна напруга обмотки статора двигуна;

E1 – ЕРС обмотки статора;

$x_{1\sigma}$, - Індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

R_1-Активний опір обмотки статора;

$X'_{2\sigma}$- індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, приведений до обмотки статора;

R'_2- активний опір обмотки ротора, наведений до обмотки статора,

I_1- Струм обмотки статора;

I'_2- Струм обмотки ротора, наведеної до обмотки статора;

I_0- Струм холостого ходу обмотки статора.

Вихідними є каталожні дані асинхронного двигуна АМТКF132Мб, представлені в таблиці 6.

Струм холостого ходу асинхронного двигуна можна знайти за таким виразом:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left[\frac{p_* I_{1H}(1 - s_H)}{(1 - p_* s_H)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p_*(1 - s_H)}{(1 - p_* s_H)}\right]^2}} = \sqrt{\frac{11,007^2 - \left[\frac{0,75 \cdot 15,013 \cdot (1 - 0,1)}{(1 - 0,75 \cdot 0,1)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,1)}{(1 - 0,75 \cdot 0,1)}\right]^2}} = 1,552A, \quad (2.19)$$

де s – номінальне ковзання;

$$s_н = \frac{\omega_0 - \omega_н}{\omega_0} = \frac{104,72 - 94,248}{104,72} = 0,1, \quad (2.20)$$

де ω_0- швидкість холостого ходу, рад/с;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\max}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104,72\ рад/с; \quad (2.21)$$

$\omega_{ном}$ - номінальна швидкість обертання, рад/с;

$$\omega_{ном} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 900}{60} = 94,248\ рад/с; \quad (2.22)$$

$I_{ном}$- номінальний струм статора двигуна;

$$I_{1н} = \frac{P_н}{3 \cdot U_н \cdot \cos\varphi_н \cdot \eta_н} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,87} = 15,013\ A. \quad (2.23)$$

I_{11}- Струм статора двигуна при частковому завантаженні;

$$I_{11} = \frac{p_ж \cdot P_н}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos f_{р_ж} \cdot \eta_{р_ж}} = \frac{0,75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 0,87} = 11,007\ A. \quad (2.24)$$

Коефіцієнт завантаження двигуна

$$p_ж = \frac{P}{P_н} = 0,75 \quad (2.25)$$

З формули Клосса визначаємо співвідношення, яке необхідно для розрахунку критичного ковзання:

$$s_к = s_н \cdot \frac{m_к + \sqrt{m_к^2 - [1 - 2 \cdot s_н \cdot \beta \cdot (m_к - 1)]}}{1 - 2 \cdot \beta \cdot (m_к - 1)} =$$
$$= 0,1 \cdot \frac{2,2 + \sqrt{2,2^2 - [1 - 2 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,1 \cdot 1 \cdot (2,2 - 1)} = 0,542. \quad (2.26)$$

значення коефіцієнтаβзнаходиться в діапазоні 0,6 - 2,5, тому в першому наближенні приймаємоβ=1.

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{1,552}{2 \cdot 4,2 \cdot 15,013} = 1,012. \quad (2.27)$$

Активний опір ротора, наведений до обмотування статора асинхронного двигуна

$$R_2^{'} = \frac{3 \cdot U_н^2 (1 - s_н)}{2 \cdot C_1^2 \cdot m_к \cdot P_н \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_к}\right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,1)}{2 \cdot 1,012^2 \cdot 2,2 \cdot 7500 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,542}\right)} = 1,358\,Ом. \quad (2.28)$$

Активний опір статорної обмотки можна визначити за таким виразом

$$R_1 = C_1 \cdot R_2^{'} \cdot \beta = 1,012 \cdot 1,358 \cdot 2 = 1,375 Ом. \quad (2.29)$$

Визначимо параметр у, який дозволить знайти індуктивний опір короткого замикання Xi:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_к^2} - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,542^2}\right) - 1^2} = 1,551. \quad (2.30)$$

тоді

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2^{'} = 1,551 \cdot 1,012 \cdot 1,358 = 2,132\,Ом. \quad (2.31)$$

Щоб визначити опори розсіювання фаз статора і ротора із загального індуктивного опору Хкн, слід використовувати співвідношення, які застосовуються до серійних асинхронних двигунів.

Індуктивний опір роторної обмотки, наведений до статорної, може бути розрахований

$$X_{2\sigma}^{'} = \frac{0,58 \cdot X_{кн}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 2,132}{1,012} = 1,222\,Ом. \quad (2.32)$$

Індуктивний опір статорної обмотки може бути визначено за таким виразом

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 1,222 = 0,896\,Ом. \quad (2.33)$$

Згідно з векторною діаграмою ЕРС гілки намагнічування Е1, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі, дорівнює

$$E_1 = \sqrt{(U_{\text{Н}} \cos\varphi_{\text{Н}} - R_1 I_{\text{Н}})^2 + (U_{1\text{Н}} \sin\varphi_{\text{Н}} + X_{1\text{Н}} I_{\text{Н}})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0{,}87 - 1{,}375 \cdot 15{,}013)^2 + (220 \cdot 0{,}493 - 0{,}896 \cdot 15{,}013)^2} = 195{,}42\,B. \quad (2.34)$$

Тоді індуктивний опір намагнічування

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195{,}42}{1{,}552} = 125{,}891\,Ом. \quad (2.35)$$

Виходячи з розрахунків індуктивних опорів, розрахуємо індуктивність обмотки статора, ротора, намагнічування

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0{,}896}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2{,}851\,мГн; \quad (2.36)$$

$$L_2 = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1{,}222}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3{,}889\,мГн; \quad (2.37)$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{125{,}891}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0{,}40072\,Гн. \quad (2.38)$$

Перевіряємо адекватність розрахункових параметрів двигуна.

При знайдених параметрах розраховуються значення номінального електромагнітного моменту двигуна:

$$M^{*}_{\text{ЕМ.Н}} = \frac{3 \cdot U^2_{1\text{фн}} \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X^2_{\text{кн}} + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1{,}358}{104{,}72 \cdot 0{,}1 \cdot \left[2{,}132^2 + \left(1{,}375 + \frac{1{,}358}{0{,}1} \right)^2 + \left(\frac{1{,}375 \cdot 1{,}358}{0{,}1 \cdot 125{,}891} \right)^2 \right]} = 82{,}509\text{Н} \cdot \text{м} \quad (2.39)$$

$$M^{**}_{\text{ЕМ.Н}} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I^2_{1\text{н}} - I^2_0} = \\ = \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0{,}40072}{\left(0{,}40072 + 3{,}889 \cdot 10^{-3}\right)} \cdot 0{,}88 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{15{,}013^2 - 1{,}552^2} = 82{,}797\text{Н} \cdot \text{м} \quad (2.40)$$

де $\psi_{\text{н}}$- номінальне значення потокозчеплення, Вб

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 1,552 \cdot 0,40072 = 0,88 Вб \quad (2.41)$$

Перевіряємо виконання умов:

$$M_{дв.н} < M^{*}_{эм.н} \le 1.1 \cdot M_{дв.н};$$
$$M^{**}_{эм.н} \cong M^{*}_{эм.н}$$
$$79,577\,Н \cdot м < 82,509 Н \cdot м \le 87,535\,Н \cdot м;$$
$$82,509\,Н \cdot м \cong 82,797\,Н \cdot м$$

В результаті розрахунку визначимо значення моменту від сил тертя двигуна

$$\Delta M_{с.дв} = Мем.н - Мдв.н = 82,509 - 79,577 = 2,932 Н \cdot м. \quad (2.42)$$

2.3 Вибір перетворювача частоти

Вибір відповідного перетворювача частоти відіграє ключову роль для ефективності та довговічності роботи як самого пристрою, так і електроприводу в цілому. Якщо потужність перетворювача буде надмірною, він зможе забезпечити повноцінний захист двигуна. У той же час недостатня потужність призведе до обмеження у продуктивності, нездатності підтримувати високодинамічні режими роботи та потенційного виходу з ладу через перевантаження.

Крім правильного підбору перетворювача, велике значення має його грамотна експлуатація, що безпосередньо впливає термін служби устаткування. При виборі перетворювача частоти необхідно орієнтуватися не тільки на потужність двигуна, що підключається, але також враховувати діапазон робочих швидкостей, моменти обертання, характер навантаження і робочий цикл.

При проектуванні багаторухових приводів із загальним механічним зв'язком важливо враховувати специфіку взаємодії компонентів та рекомендації щодо налаштування таких систем. Для керування подібними установками оптимально використовувати перетворювачі частоти, наприклад Schneider Electric Altivar 71.

В даний час все частіше багаторухові промислові приводи будуються на основі регульованих електроприводів змінного струму із застосуванням асинхронних короткозамкнутих двигунів, що живляться через перетворювачі частоти. Силова частина таких систем може бути реалізована як у варіанті із загальним перетворювачем, так і з індивідуальними перетворювачами для кожного двигуна. Індивідуальні рішення забезпечують більш точне та гнучке керування процесами на промислових об'єктах.

Загальною характеристикою багаторухових систем є наявність загального навантаження. У зв'язку з цим проблема рівномірного розподілу навантаження між двигунами стає одним із ключових завдань при проектуванні та експлуатації таких систем.

- Ваговимірювання.
- Підйом із підвищеною швидкістю.
- Контролює стан гальма.
- Управління впливом кінцевих вимикачів закінчення

ходу.

- Вибір слабини тросів.

Технічні параметри перетворювача частоти Schneider Electric Altivar 71 представлені таблиці 7 [13].

Таблиця 7 - Технічні параметри перетворювача частоти

	Вихідна	частота	- 1600 Гц
Електропривід	Закон	управління	Векторне управління потоком в розімкнутою та замкненою системах, закон і е› напруга/частота” (2 або 5 точок), система адаптації потужності
	Перехідний	момент	220% номінального моменту двигуна протягом 2 з 170% протягом 60 с
	Кількість	функцій	> 150

				Кількість заданих	Попередньо швидкостей	16			
Функції				Кількість входів-виходів	Аналогові входи Диск іскретні входи Аналогові виходи Дискретний вихід Релейні виходи	-4 6-29 1-3 0_8 2-4			
Комунікаційний зв'язок				Вбудована		ModBus та CAopen			
						Інтерфейсні картки для датчиків абсолютного та відносного відліку,			
				Картки (додаткові)					
				Повна потужність 17,8 кКВА Максимальний перехідний струм 26,4А					
	Максимальний струм у режимі 17,6 А								
					Маса 7 кг				
								ПЕК/ЄМ 61800-5-1, МЕК/ЄМ	
								61800-3 (довкілля 1 та	
								2, С1 - С3), ЕМ 55011, ПЕК/ЄМ	
				Норми та сертифікати					
								61000-4-2/4-3/4-4/4-5/4-6/4-11 е,	
								ОГ., СЗА, ЗМУ С-Т1сК, МОМ	
									117, ГОСТ

2.4 Розрахунок природних характеристик електроприводу

Розрахунок природних характеристик виконується з метою оцінки ступеня відповідності параметрів ключових характерних точок розрахункових значень природних характеристик електродвигуна параметрам, визначеним виходячи з довідкових технічних даних обраного двигуна.

У разі векторного управління визначаються і графічно будуються лише природні механічні і електромеханічні характеристики електродвигуна при номінальних значеннях напруги $U_{1фн}$ і частоти $f_{1н}$.

Природна механічна характеристика $M_{ем}(s)$ електродвигуна для частоти $f_{1н}$ =50 Гц розраховується за виразом:

$$M_{эм}(s) = \frac{3 \cdot U_{1н}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} \quad (2.43)$$

де $M_{ем}$ - електромагнітний момент двигуна, Нм.

За результатами розрахунку будується механічна характеристика $\omega = f(M)$ при $f_{1н}$ =50 Гц, де значення кутової швидкості обертання двигуна знаходяться за виразом.

Природна механічна характеристика двигуна наведена наРисунок 9.

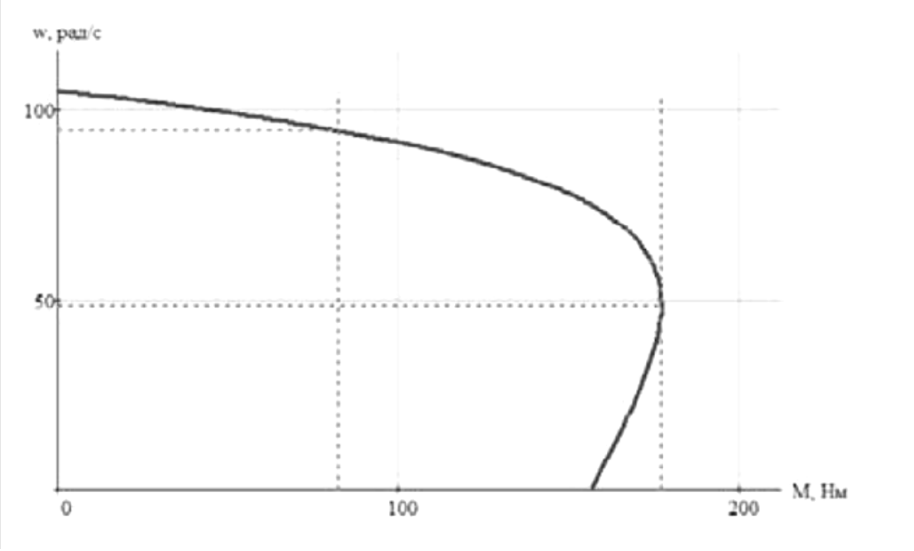


Рисунок 9 - Природна механічна характеристика асинхронного двигуна AMTKF132L6

Природна електромеханічна характеристика *I(s)* електродвигуна розраховується для частоти $f_{1н}$ = 50 Гц за виразом:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'^2(s) \cdot \sin\varphi_2(s)} \quad , \tag{2.44}$$

де I_1 - діюче значення фазного струму двигуна, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1н}}{\pm\sqrt{X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad , \tag{2.45}$$

I'_2 - приведений до обмотки статора струм ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{R_1^2 + \left(X_{1\sigma} + X_\mu\right)^2}} \quad , \tag{2.46}$$

I_0- Чинне значення струму холостого ходу, А;

$$\sin\varphi_2(s) = \frac{X_{кн}}{\sqrt{X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} \quad , \tag{2.47}$$

За результатами розрахунку будуються електромеханічна характеристика $\omega = f(I_1)$ та $\omega = f(I'_2)$ (Рисунок 10) при f1н = 50 Гц.

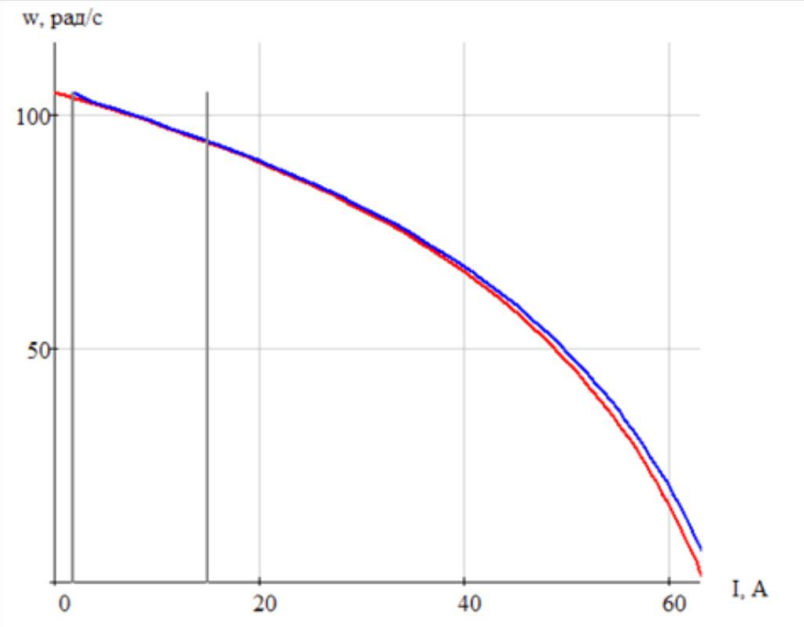


Рисунок 10 - Природні електромеханічні характеристики асинхронного двигуна AMTKF1321L6

2.5 Розрахунок статичних характеристик двигуна та елементів силового каналу та навантаження електроприводу при частотному векторному керуванні

При реалізації векторного управління необхідно розрахувати та побудувати природну механічну $\omega = f(M)$ та електромеханічну $\omega = f(I_1)$ характеристики електродвигуна, використовуючи номінальні значення напруги та частоти згідно з наведеними вище виразами [14].

На побудованій механічній характеристиці $\omega = f(M)$, представленої на Рисунок 9, повинні бути додатково позначені граничні характеристики, що відповідають тривалому та короткочасному режимам роботи.

$M_{\text{еп.макс}}$= 130 Н · м;

$M_{\text{с.прив.мін}}$= 10,9 Н · м;

$M_{\text{с.прив.макс}}$= 62,6 Н · м;

$M_{\text{ем.н}}$= 82,5 Н · м;

Мк = 177,1 Н · м;

$M_{\text{дов.дод}}$= 74,3 Н-м.

На Рисунок 11 у площині механічних характеристик побудовані характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження.

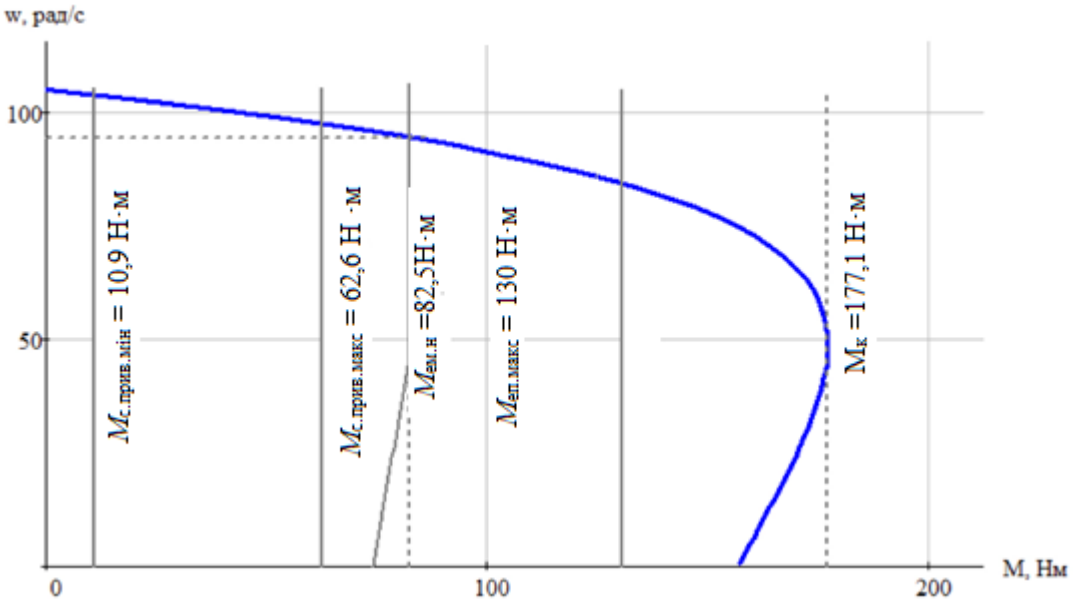


Рисунок 11 — Механічні характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження

на Рисунок 12 у площині електромеханічних характеристик побудовано характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження.

I_0= 1,552 А;

Іс.мін = 2,469 А;

$I_{с.макс}$=10,251 А;

$I_{еп.макс}$=212 4;

$I_{1н}$=15,013 F;

$I_{дов.доп}$= 13,512 А;

$I_{I\cdot ном}$= 17,6 А;

$I_{I\cdot макс}$= 26,4 А.

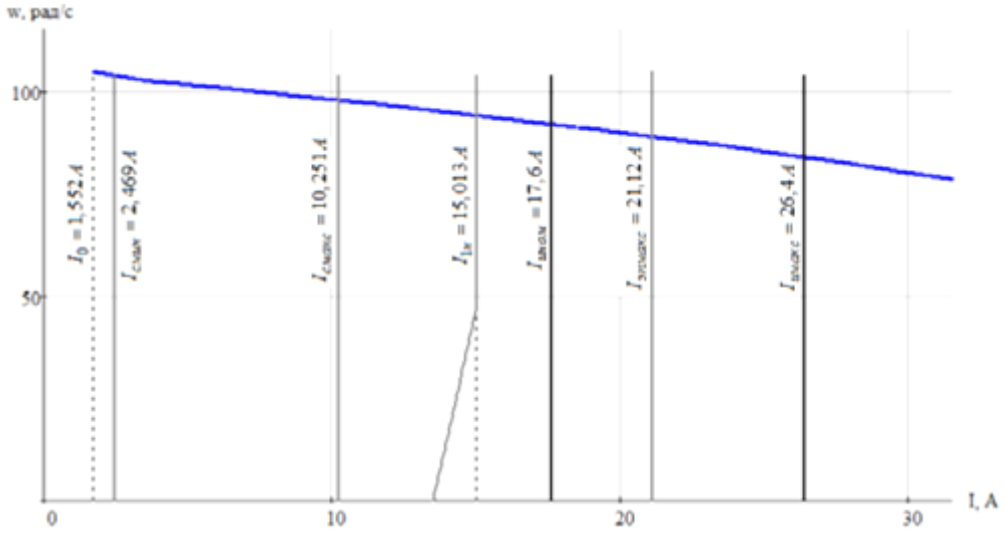


Рисунок 12 - Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження

Перевірка правильності вибору двигуна

За результатами побудови механічних характеристик електроприводу ω= f (М) та навантаження ω= f (I1) (рисунок 1!) перевіряється правильність вибору двигуна на момент. У всьому діапазоні повинні виконуватись умови

$$M_{ем.дов.доп} \geq M_{с.макс}$$

$$77{,}2\ Нм > 62{,}6\ Нм$$

Отже, двигун вибрано правильно.

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу $\omega(I)$ (рисунок 12) перевіряється правильність вибору двигуна по струму

$$I_{дв.дов.доп} \geq I_{с.макс}$$

13,5 А>10,2А.

Отже, двигун струмом обраний правильно.

Перевірка правильності вибору перетворювача За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу ω(I1) (Рисунок 12) перевіряється правильність вибору перетворювача за струмом:

- Умова

$$I_{с.макс}(\omega) \leq 0.8\, I_{і.н};$$

10,2 А <0,8.17,6 = 14,8 А,

- Умова

$$I_{еп.макс}(\omega) \leq I_{і.макс}$$

21,124 < 26,4А.

Отже, перетворювач вибрано правильно.

2.6 Параметри, структурні схеми та моделі системи перетворювач частоти - асинхронний двигун

Параметри ланок структурної схеми двигуна.

Еквівалентні індуктивності обмоток:

- Статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 2,851 \cdot 10^{-3} + 0,40072 = 0,40357 \text{ Гн.} \quad (2.48)$$

- ротора, приведена до ланцюга статора,

$$L_2' = L_{2\sigma}' + L_m = 3,889 \cdot 10^{-3} + 0,40072 = 0,40461 \text{ Гн.} \quad (2.49)$$

Коефіцієнт розсіювання магнітного поля

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0,40072^2}{0,40357 \cdot 0,40461} = 0,017. \quad (2.50)$$

Еквівалентний активний опір ланцюга статора (без урахування опору з'єднувальних проводів)

$$R_{1э} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 1,375 + 1,358 \cdot \frac{0,40072^2}{0,40461^2} = 2,707 \text{Ом}. \quad (2.51)$$

Електромагнітні постійні часу ланцюги статора та ротора:

$$T_{1e} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1e}} = \frac{0,017 \cdot 0,40357}{2,707} = 2,476 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.52)$$

Параметри перетворювача

У найпростішому випадку без урахування ШІМ інвертор являє собою лінійний підсилювач з чистим запізненням на величину періоду широтно-імпульсної модуляції ТШІМ

$$T_1 = T_{шім} = \frac{1}{f_{шім}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{с}. 476 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.53)$$

де Тшім - несуча частота інвертора (частота ШІМ), приймаємо Тшім = 10000Гц.

Максимальні значення діючої та амплітудної фазної напруги двигуна приймаються, відповідно, рівними:

$$U_{max}, = \sqrt{2}\, U_{1ф} = 2.220 = 311 \text{ В}. (\quad (2.54)$$

З урахуванням ШІМ напруги інвертора і при з'єднанні обмоток статора двигуна в зірку параметри перетворювача вибираються відповідно до наведених нижче виразів.

Лінійна напруга джерела живлення перетворювача

$$U_т = \sqrt{2} \cdot U_{1фн} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В}. \quad (2.55)$$

де U_c - напруга ланки постійного струму перетворювача, приймаємо виходячи з умови узгодження напруги перетворювача та двигуна.

$$U_d \geq \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1н} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220 = 538,88 \text{В}. \quad (2.56)$$

Коефіцієнт посилення інвертора

$$k_и = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = \frac{538,88}{\sqrt{3}} = 311,127. \quad (2.57)$$

Дворуховий електропривод механізму пересування козлового крана буде включати два асинхронних двигуна AMTKF132M6 потужність 7,5кВт (таблиця 6) з індивідуальними перетворювачами частоти Schneider Electric Altivar 71 (таблиця 7).

Розраховані параметри перетворювача частоти, асинхронного двигуна, а також механічні та електромеханічні характеристики є основою для подальшого вивчення дворухового електроприводу.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТУРІВ РЕГУЛЮВАННЯ

Характерною рисою частотно-регульованих електроприводів змінного струму є висока інерційність у зворотному зв'язку контурів регулювання таких параметрів, як струм, потокозчеплення та швидкість. Внаслідок цього класична теорія оптимізації систем підлеглого регулювання, представлена у роботах Кесслера, виявляється непридатною їх оптимізації. Надалі передбачається використовувати методи налаштування контурів управління з урахуванням інерційного зворотного зв'язку, описаних у навчальному посібнику. [1, 14, 15]

3.1 Оптимізація контуру струму з ПІ-регулятором

Структурна схема контуру струму наведена наРисунок 13. Контури струмів I_{1d} та I_{1q} реалізовані за однією схемою та мають однакові параметри

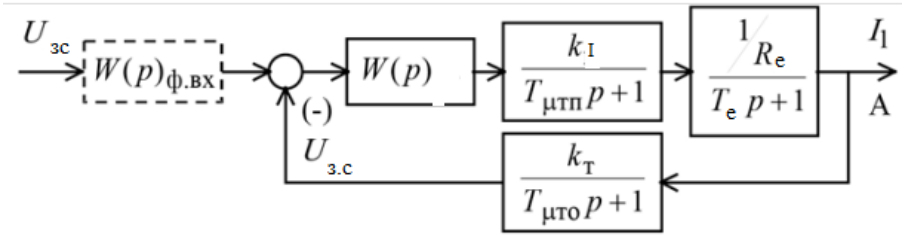


Рисунок 13 - Структурна схема контуру струму

Оптимізуємо цей контур за модулем

$$W_{роз.1} = W_{РС} \cdot \frac{k_{тп}}{T_{тп} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{1}{R_э}}{T_{1e} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{дс}}{T_{дс} \cdot p + 1}. \quad (3.1)$$

Постійні часу $T_{тп}$ і $T_{дс}$ зазвичай набагато менше, ніж T_i, тому відносимо їх до не компенсованих малим постійним часу. Відповідно з'являється можливість знизити порядок системи:

$$W_{розI} \approx W_{РС} \cdot \frac{k_{тп} \cdot k_{дс}}{T_{μI} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{1}{R_e}}{T_{1e} \cdot p + 1}, \quad (3.2)$$

де $T_{μI}$ - еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру струму, с.

Для налаштування на оптимум за модулем необхідний ПІ-регулятор

$$W_{рс} = \frac{k_{рс} \cdot \left(T_{рс} \cdot p + 1\right)}{T_{рс} \cdot p} \tag{3.3}$$

де T_i, - постійна часу регулятора струму, приймаємо $T_{рс} = T_{1е} = 0{,}2476$ с;

$K_{рс}$- Коефіцієнт регулятора струму;

$$k_{рс} = \frac{T_{1ТЕ} \cdot R_е}{2 \cdot T_{µI} \cdot k_{тп} \cdot k_{дс}}. \tag{3.4}$$

В результаті передатна функція розімкнутого контуру струму відповідає налаштуванню на оптимум за модулем:

$$W_{роз} = \frac{1}{2 \cdot T_{µI} \cdot p \cdot \left(T_{µI} \cdot p + 1\right)}. \tag{3.5}$$

Передатна функція замкнутого контуру струму:

$$W_I = \frac{W_{роз.I}}{1 + W_{разI}} \cdot \frac{T_{дс} \cdot p + 1}{k_{дс}} = \frac{1}{2 \cdot T_{µI} \cdot p \cdot \left(T_{µI} \cdot p + 1\right) + 1} \cdot \frac{T_{дс} \cdot p + 1}{k_{дс}}. \tag{3.6}$$

Нехтуючи в знаменнику членом другого порядку малості, у чисельнику постійна часу ТДС≈0, передатна функція контуру струму

$$W_I \approx \frac{\frac{1}{k_{дс}}}{2 \cdot T_{µI} \cdot p + 1}. \tag{3.7}$$

3.2 Параметри контуру контуру струму з ПІ-регулятором

Відповідно до рекомендацій щодо вибору параметрів при налаштуванні контурів струму [14, 15] приймаємо такі значення:

Коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання струму

$$\sigma_з > 1{,}2.$$

Коефіцієнт датчика струму

$$k_{дс} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{ацп.}}}{\sigma_т \cdot \sqrt{2} \cdot I_{еп.макс}} = \frac{0,5 \cdot 2^{10}}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 21,12} = 14,285. \quad (3.8)$$

Значення максимального завдання на вході контуру струму $N_{зс.макс}$

$$N_{зс.макс} = \frac{1}{\sigma_с} = \frac{1}{1,2} = 0,8333\,,$$

Тога

$$к_с = \frac{1}{\sigma_с \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1н}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,013}$$

$$к_с = \frac{1}{k_т} = \frac{1}{0,039}$$

Інтервали квантування сигналів у ланцюзі зворотного зв'язку контуру струму

$$T_{оз.с} = T_{пк.с} = T_{зп.і} = T_{ШІМ} = 1.10^{-4}\ с.$$

Постійна часу аналогового фільтра в ланцюгу вимірювання струму

$$T_{а.} = 0$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою для електроприводів загальнопромислового призначення

$$n_с = 3$$

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру струму

$$T_{μI} = \frac{T_{оз.с}}{n_с} + T_{зп.і} + T_{ф.от} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{3} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,333 \cdot 10^{-4}\ с.$$

Коефіцієнт типового налаштування контуру струму

$$\alpha_з = 2.$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму

$$k_{рс} = \frac{T_{1е} \cdot R_{1е}}{k_I \cdot k \cdot a_с \cdot T_{μI}} = \frac{2,47601 \cdot 10^{-3} \cdot 2,707}{311,127 \cdot 0,039 \cdot 2 \cdot 1,333 \cdot 10^{-4}} = 2,058\ в.о.$$

Еквівалентна постійна часу замкнутого контуру струму

$T_т = a\ T \cdot T_{μI} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4}$ с.

3.3 Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором наведена на Рисунок 14.

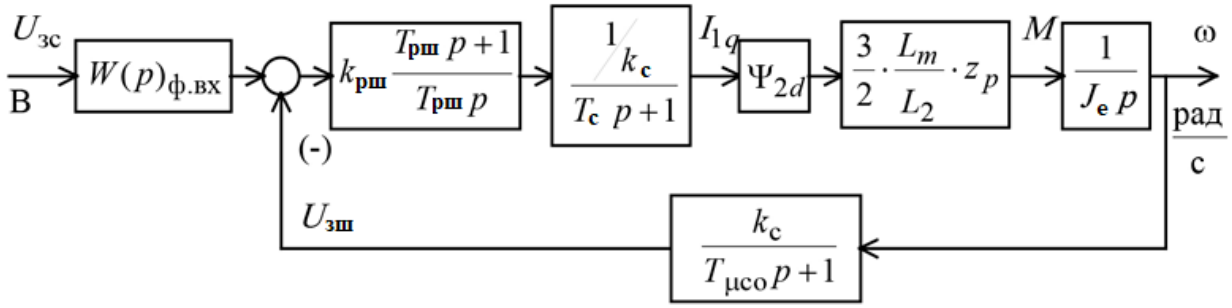


Рисунок 14 - Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

При оптимізації контуру потокозчеплення внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представлений усіченою функцією передачі 1-го порядку.

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру по потоку зчеплення

$$k_{\Psi} = \frac{U_{з\Psi макс}}{\Psi_{2н}} \tag{3.9}$$

Передатна функція ПІ-регулятора потокозчеплення

$$W_{рш} = k_{рш} \cdot \frac{T_{рш}p+1}{T_{рш} \cdot p} \tag{3.10}$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора потокозчеплення визначаються за виразами

$$k_{рш} = \frac{J_э \cdot k_т}{\Psi_{2н} \cdot k_{дв} \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu}}, \tag{3.11}$$

$$T_{рш} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu} \ .$$

де T_{μ} - Еквівалентна мала постійна контура потокосцепления, с.

Контур потокозчеплення з ПІ-регулятором, налаштований таким чином, має такі передавальні функції:

- Розімкнутого контуру

$$W_{\text{с.роз}} = \frac{b_c a_c T_{\mu\text{с}}\, p + 1}{b_c a_c^2 T_{\text{т}} T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{с}}^2\, p^4 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{с}}^3\, p^3 + b_c a_c^2 T_{\mu\text{с}}^2\, p^2}; \qquad (3.12)$$

- замкнутого контуру з управління

$$W_{\text{с зам}} = \frac{1}{k_{\text{с}}} \times$$

$$\times \frac{\left(b_{\text{с}} a_{\text{с}} T_{\mu\text{с}}\, p + 1\right) \cdot \left(T_{\mu\text{со}} p + 1\right)}{b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T\, T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{сэ}}^2 p^4 + b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T_{\mu\text{с}}^3\, p^3 + b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T_{\mu\text{сэ}}^2 p^2 + b_{\text{с}} a_{\text{с}} T_{\mu\text{с}}\, p + 1} \approx \qquad (3.13)$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_{\text{с}}} \left(b_{\text{с}} a_{\text{с}} T_{\mu\text{сэ}} p + 1\right) \cdot \left(T_{\mu\text{со}} p + 1\right)}{b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T_{\text{т}} T_{\mu\text{со}} T_{\mu\text{с}}^2\, p^4 + b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T_{\mu\text{с}}^3\, p^3 + b_{\text{с}} a_{\text{с}}^2 T_{\mu\text{с}}^2\, p^2 + b_{\text{с}} a_{\text{с}} T_{\mu\text{с}}\, p + 1}.$$

Налаштування контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором близьке до налаштування на МО системи 2-го порядку.

3.3.1 Контуру потокозчеплення

Відповідно до рекомендацій щодо вибору параметрів при налаштуванні контурів потокозчеплення [14, 15] приймаємо такі значення:

Коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання струму

$$\sigma_{\omega} > 1{,}2.$$

Коефіцієнт датчика потокозчеплення

$$k_{\text{дω}} = \frac{1}{\sigma_{\omega} \cdot \omega_{\text{н}}} = \frac{1}{1{,}2 \cdot 94{,}248} = 8{,}842 \cdot 10^{-3}.$$

Значення максимального завдання на вході контуру потокозчеплення

$$N_{\text{з}\omega.\text{макс}} = \frac{1}{\sigma_{\omega}} = \frac{1}{1{,}2} = 0{,}8333293.$$

Коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою для електроприводів загальнопромислового призначення

$$n_{\omega} = 2$$

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контуру швидкості

$$T_{\mu\omega} = 1{,}9 \cdot 10\text{-}3 \text{ с}.$$

Коефіцієнт типового налаштування контуру струму

$$a_{\omega}=2$$

Постійна часу регулятора

$$T_{\text{р}\omega}=T_{\mu\omega}\cdot 4=1,9\cdot 10^{-3}\cdot 4=7,6\cdot 10^{-3}\text{с}.$$

Коефіцієнт посилення регулятора струму

$$k_{\text{рш}}=\frac{J\cdot k_{\text{ш}}}{\Psi_{2\text{н}}\cdot k_{\text{дв}}\cdot k_{\text{ш}}\cdot a_{\text{ш}}\cdot T_{\mu\text{ш}}}=\frac{0,264\cdot 0,039}{0,88\cdot 4,457\cdot 8,842\cdot 10^{-3}\cdot 2\cdot 1,9\cdot 10^{-3}}=78,485. \quad (3.14)$$

Еквівалентна постійна часу замкнутого контуру струму

$$T_{\text{Т}}=\text{a}\cdot\text{Т}\mu=2\cdot 3\cdot 10\text{-}4=6\cdot 10\text{-}4\text{ с}.$$

3.3.2 Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором наведена наРисунок 15.

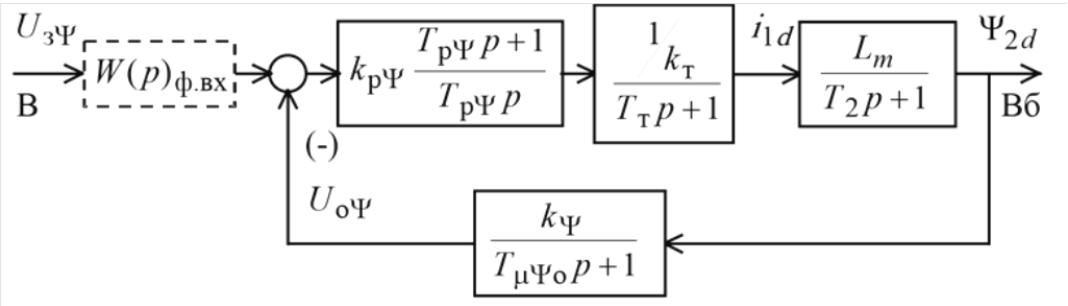


Рисунок 15 - Структурна схема контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

При оптимізації контуру потокосцепления внутрішній оптимізований замкнутий контур струму представлений усіченою функцією передачі 1-го порядку.

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру по потоку зчеплення

$$k_{\Psi}=\frac{U_{\text{з}\Psi\text{макс}}}{\Psi_{2\text{н}}} \quad (3.15)$$

Передатна функція ПІ-регулятора потокозчеплення

$$W_{\text{р}\psi}=k_{\text{р}\Psi}\cdot\frac{T_{\text{р}\Psi}\cdot p+1}{T_{\text{р}\Psi}\cdot p}. \quad (3.16)$$

Коефіцієнт посилення та постійна часу регулятора потокозчеплення визначаються за виразами

$$k_{\text{р}\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\text{т}}}{L_m \cdot k_{\Psi}} \cdot \frac{1}{a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi\text{э}}} \tag{3.17}$$

$$T_{\text{р}\Psi} = T_2$$

де Т2 - еквівалентна мала постійна контура потокозчеплення, с.

Контур потокозчеплення з ПІ-регулятором, налаштований таким чином, має такі передавальні функції:

- Розімкнутого контуру

$$W_{\Psi\,\text{раз}} = \frac{1}{a_{\Psi} T_{\text{т}} T_{\mu\Psi\text{о}} T_{\mu\Psi\text{э}} p^3 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}}^2 p^2 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}} p} \tag{3.18}$$

- замкнутого контуру з управління

$$W_{\psi\,\text{зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\Psi}} \cdot \left(T_{\mu\Psi\text{о}} p + 1\right)}{a_{\Psi} T_{\text{т}} T_{\mu\Psi\text{о}} T_{\mu\Psi\text{э}} p^3 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}}^2 p^2 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}} p + 1} \approx \approx \frac{\frac{1}{k_{\Psi}} \cdot \left(T_{\mu\Psi\text{о}} p + 1\right)}{a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}}^2 p^2 + a_{\Psi} T_{\mu\Psi\text{э}} p + 1}. \tag{3.19}$$

Налаштування контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором близьке до налаштування на МО системи 2-го порядку.

3.4 Розробка імітаційної моделі електроприводу

3.4.3 Математична модель асинхронного двигуна

Для дослідження у середовищі Matlab скористаємося двофазною моделлю реальної трифазної машини у системі координат d, q.

Якщо обертається синхронно з полем статора $\omega_{\text{кс}}=\omega_{\text{ел1}}$ системі координат x, у вісь x поєднати з вектором потокозчеплення ротора ψ_2, З урахуванням співвідношення, характерних для СК d, q

$$\Psi_{2d} = \left|\vec{\Psi}_2\right|; \tag{3.20}$$

$\psi_{2q} = 0$

отримаємо

$$\begin{aligned} &\left|\vec{\Psi}_2\right| = \Psi_{2x} = \Psi_{2d}, \\ &\Psi_{2y} = \Psi_{2q} = 0 \end{aligned} \tag{3.21}$$

і тоді система рівнянь матиме вигляд

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}I_{1d}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1d} - \dfrac{R_э}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1d} + \dfrac{R_2^{'} \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2^2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{кс} \cdot I_{1q}; \\ \dfrac{\mathrm{d}I_{1q}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot U_{1q} - \dfrac{R_э}{\sigma \cdot L_1} \cdot I_{1q} - \omega_{кс} \cdot I_{1d} - \dfrac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\ \dfrac{\mathrm{d}\Psi_{2d}}{\mathrm{d}t} = -\dfrac{R_2^{'}}{L_2} \cdot \Psi_{2d} + \dfrac{R_2^{'} \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1d}; \\ 0 = \dfrac{R_2^{'} \cdot L_m}{L_2} \cdot I_{1q} - \left(\omega_{кс} - z_p \cdot \omega\right) \cdot \Psi_{2d}; \\ M_{эм} = \dfrac{3}{2} \cdot \dfrac{L_m}{L_2^{'}} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\ \dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \dfrac{1}{J} \cdot \left(M_{эм} - M_c\right), \end{cases} \tag{3.22}$$

де $U_{1d} = U_{1q} = U_1$ — постійні за формою складові напруги статора в орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора ψ_2, що обертається синхронно з полем статора системі координат d, q;

I_d, I_q - складові струму статора в системі координат d, q, А;

$\Psi_{2d} = \left|\vec{\Psi}_2\right|$ - потокозчеплення ротора в системі координат d, q, Вб.

В операторній формі запису

$$
\begin{cases}
U_{1d} = R_э \cdot \left(T_э \cdot p + 1\right) \cdot I_{1d} - \dfrac{R_2^{'} \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d} - \omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}; \\
U_{1q} = R_э \cdot \left(T_э \cdot p + 1\right) \cdot I_{1q} + \omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \dfrac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}; \\
0 = \left(T_2 \cdot p + 1\right) \cdot \Psi_{2d} - L_m \cdot I_{1d}; \\
\omega_{кс} = z_p \cdot \omega + \dfrac{L_m \cdot R_2^{'}}{L_2} \cdot \dfrac{I_{1q}}{\Psi_{2d}}; \\
M_{эм} = \dfrac{3}{2} \cdot \dfrac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot I_{1q}; \\
\omega = \dfrac{1}{J \cdot p} \cdot \left(M_{эм} - M_c\right).
\end{cases}
\tag{3.23}
$$

Рівнянням (3.22) відповідає наведена на Рисунок 16 структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, виконана в системі координат, що обертається d, q орієнтованої по результуючого вектору потокосцепления ротора.

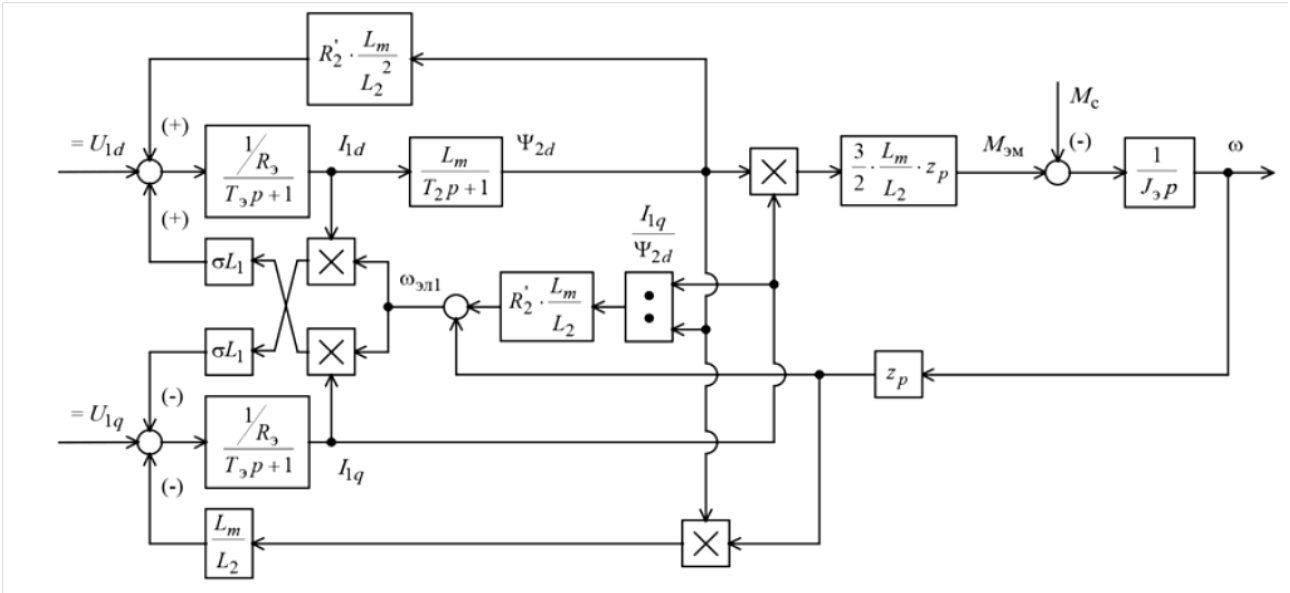
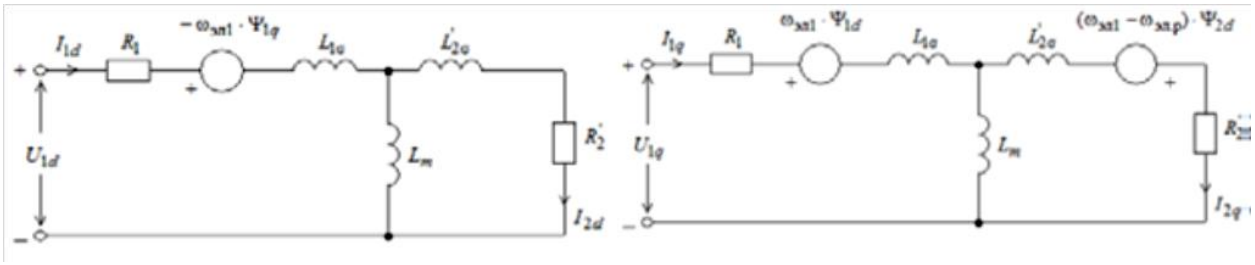


Рисунок 16 - Структурна схема асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у системі координат d, q, що обертається, орієнтованої за результуючим вектором потокосцепления ротора

Структурна схема, представлена рисунку 16, включає у собі внутрішні зворотні зв'язку, серед яких є і нелінійні перехресні. Характер цих зв'язків

визначається схемою заміщення, зображеної рисунку 17, і навіть рівняннями напруги, які стосуються статору цієї системи (3.26).



а) б)

Рисунок 17 – Схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у обертовій зі швидкістю $\omega_{эл1}$ орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора $\psi 2$ роторної системи координат d, q: а) - по осі d; б) - по осі q.

$$U_{1d} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)\, I_{1d} - e_d;$$
$$U_{1q} = R_e \cdot (T_e \cdot p + 1)\, I_{1q} - e_q, \qquad (3.24)$$

де e_d, eq - складові внутрішньої ЕРС двигуна, що наводяться у статорі;

$$e_d = \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d} + \omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q},$$
$$e_q = \omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}. \qquad (3.25)$$

$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d}$ - Падіння напруги в роторному ланцюзі;

$$\frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \Psi_{2d} = \frac{R_2' \cdot L_m}{L_2^2} \cdot \left(L_2 \cdot I_{2d} + L_m \cdot I_{1d}\right) = R_2' \cdot \left(\frac{L_m}{L_2} \cdot I_{2d} + \frac{L_m^2}{L_2^2} \cdot I_{1d}\right). \qquad (3.26)$$

$\omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}$, $\omega_{кс} \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d}$ - складові ЕРС самоіндукції (падіння напруги на індуктивному опорі статора);

$\frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2d}$ - ЕРС обертання, що наводиться в статорі потокозчепленням ротора.

Даній системі рівнянь відповідає модель Matlab Simulink, представлена на Рисунок 18.

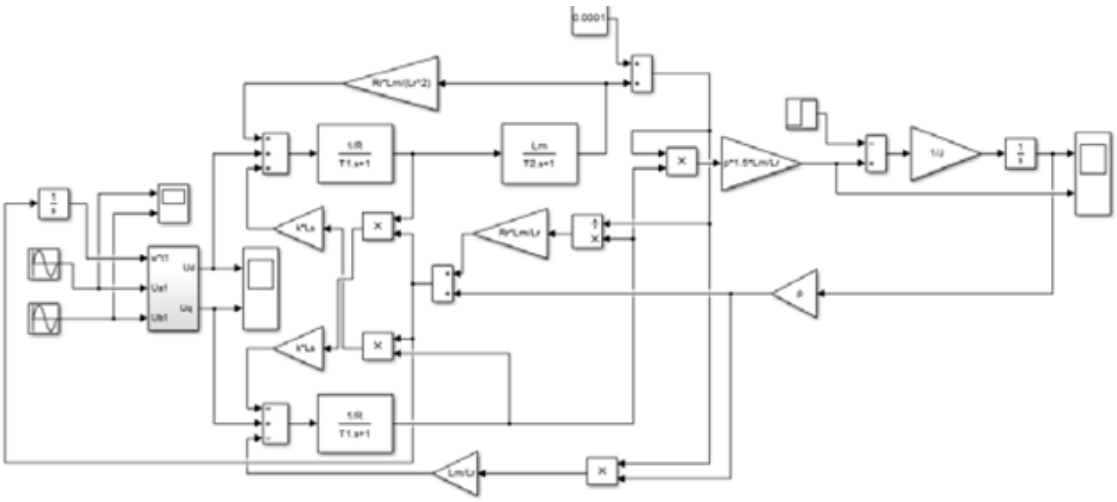


Рисунок 18 - Імітаційна модель асинхронного двигуна з активним навантаженням

3.4.4 Механічна частина електроприводу механізму пересування козлового крана

Модель на Рисунок 18 має активне навантаження, так як в реальності навантаження має реактивний характер, модель необхідно додатково включити систему блоків що імітує реактивне навантаження. Для цього використовуємо блок 5 Funcstion Bilder.

Компонент, що реалізує реактивний момент опору:

```
if (w[0]>0) M[0]=Minput[0];
if (w[0]<0) M[0]= - Minput [0];
if (w[0]==0) Mc[0]=0;
```

Алгоритм функціонування буде наступним:

1. Якщо швидкість позитивна, то момент опору дорівнює заданому.

2. Якщо швидкість негативна, то момент опору дорівнює заданому зі зворотним знаком

3. Якщо швидкість дорівнює «0», то момент опору дорівнює 0.

Відключення двигуна від мережі досягається за рахунок спрацювання блоку Switch в 0,5 с.

Для зручності електромеханічний - перетворювач та механічну частину об'єднаємо в окремі системи, результат представлений на Рисунок 19.

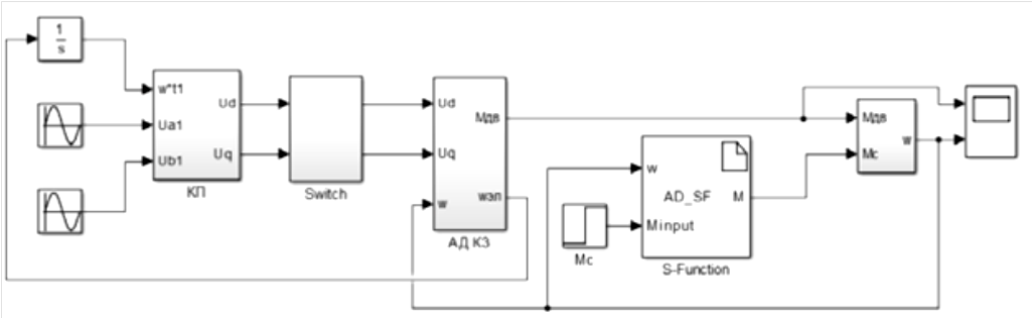


Рисунок 19 - Імітаційна модель асинхронного двигуна з реактивним навантаженням

Для перевірки працездатності імітаційної моделі реактивного навантаження, здійснимо пуск двигуна на малому навантаженні 10% Мн Нм, збільшимо навантаження до номінальної 82,502 Н·м в момент часу 0,25 с і відключимо двигун від мережі в момент часу 0,5 с. Так як навантаження реактивний двигун повинен загальмувати вибігом. На рисунку 20 показані одержані графіки. Отримані графіки відповідають очікуванням, отже модель реактивного навантаження працює правильно.

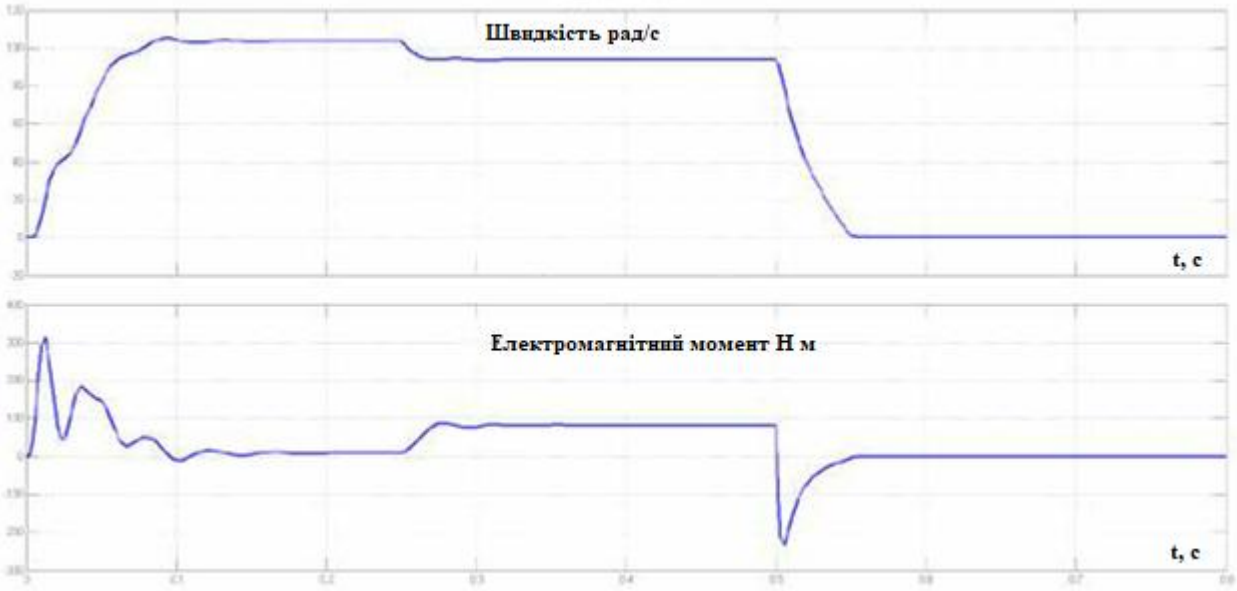


Рисунок 20 - Графіки залежностей ω(t) та M(t)

3.4.5 Перевірка адекватності розробленої моделі асинхронного двигуна

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі на основі модулів бібліотеки SimPowerSystem Simulink Matlab бобір імітаційна модель асинхронного двигуна зображена наРисунок 21.

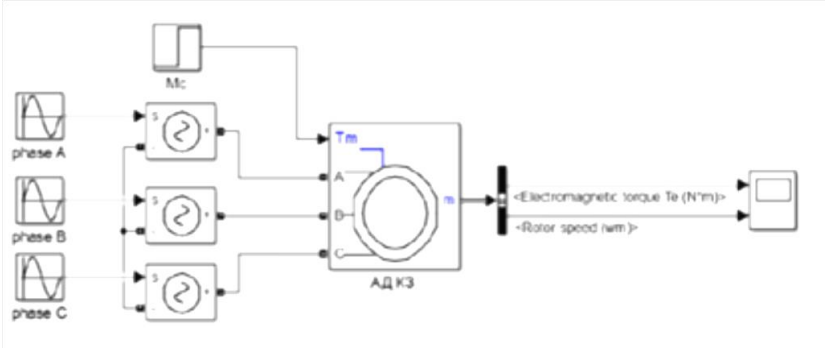


Рисунок 21 - Імітаційна модель асинхронного двигуна на основі модулів бібліотеки SimPowerSystem.

Динамічні характеристики, отримані за допомогою цієї моделі, представлені на рисунку 22. Характеристики отримані за допомогою математичної моделі представлені на рисунку 23. Двигун розганяється без навантаження, в момент часу 0,25 с. відбувається підключення завантаження $M_н$ = 82,502 Н·м

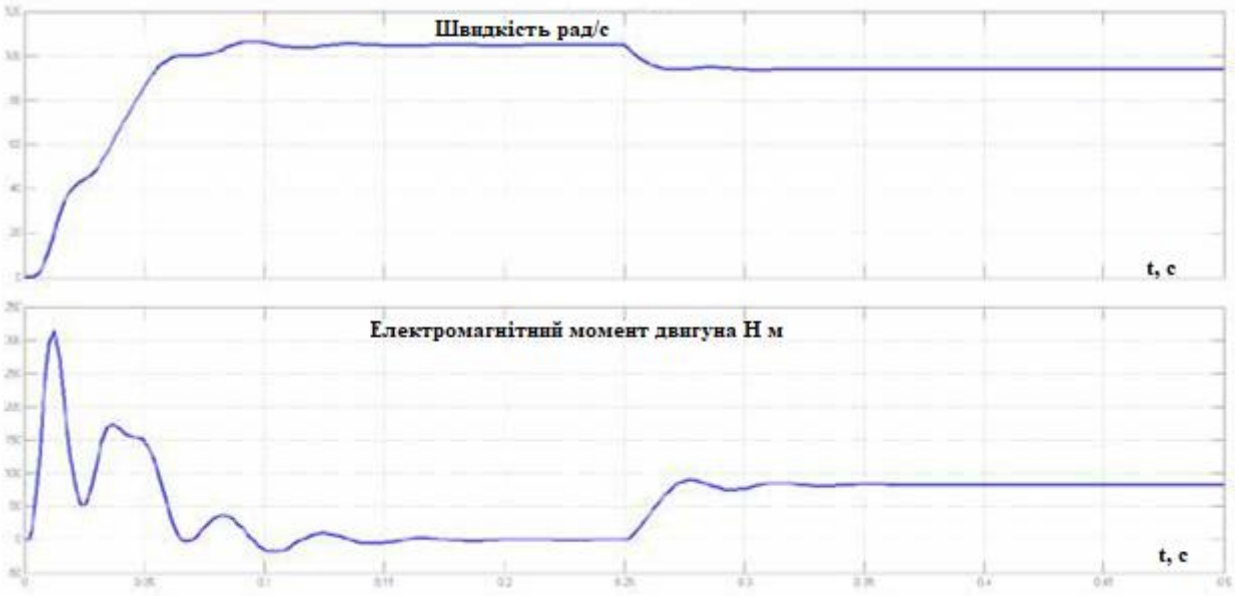


Рисунок 22 — Графіки залежностей $\omega(t)$ та $M(t)$ отримані за допомогою бібліотечної моделі двигуна.

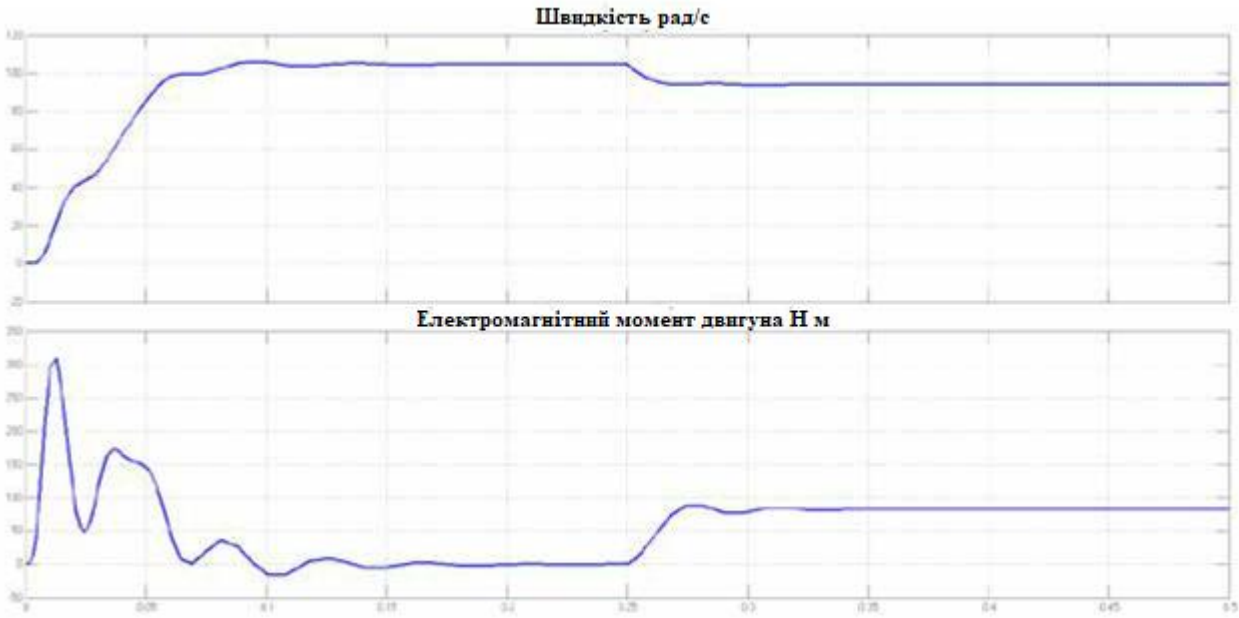


Рисунок 23 - Графіки залежностей $\omega(t)$ та $M(t)$, отримані за допомогою математичної моделі двигуна в системі координат d, q.

Аналіз двох розрахунків — з моделлю та з розробленою за математичним описом — показує їх повне сходження, що дозволяє стверджувати про можливість використання розробленої моделі в дослідженнях електроприводу змінного струму.

3.4.6 Дослідження способів керування для електроприводу системи "перетворювач частоти - асинхронний двигун"

На основі режимів роботи та варіантів частотного керування асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором проведено аналіз оптимальних підходів до їх керування для механізмів переміщення. У системах частотно-регульованого електроприводу використовують кілька широко відомих методів управління: скалярне управління (регулювання *U/f*), векторне управління зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна, а також із зворотним зв'язком за швидкістю кожного окремого асинхронного двигуна.

Під час виробництва електродвигунів неминуче виникають відхилення параметрів обмоток, а процесі експлуатації механізмів переміщення один з двигунів може відчувати велике навантаження, ніж інші. Це призводить до відмінностей у жорсткості механічних характеристик двигунів. Для

моделювання такої ситуації, один з асинхронних двигунів (АД КЗ) буде додатково підданий штучному навантаженню.

3.4.6.1 Скалярне керування

Модель дворухового електроприводу з використанням скалярного керування, що включає формувач напруги, електромеханічні перетворювачі (асинхронні двигуни короткозамкнутого типу: АД КЗ 1 та АД КЗ 2), а також механічну частину, показана наРисунок 24.

Динамічні характеристики дворухового електроприводу при скалярному керуванні наведені на рисунку 25

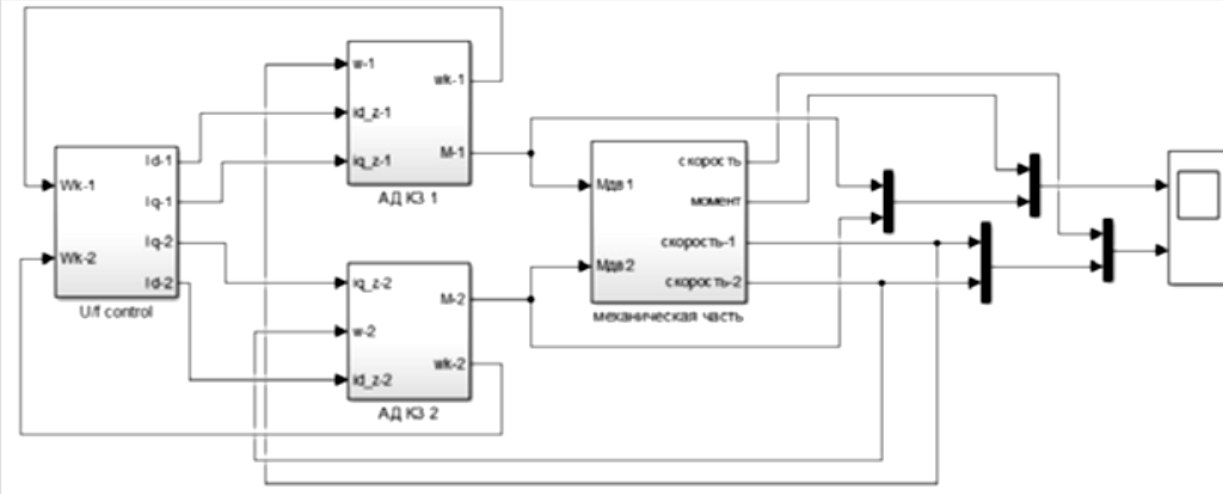


Рисунок 24 - Імітаційна модель дворухового електроприводу при скалярному керуванні

Визначимо відносну величину нерівномірності синхронізації швидкостей двигунів:

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{0,5}{18,3} \cdot 100\% = 2,73\%.$$

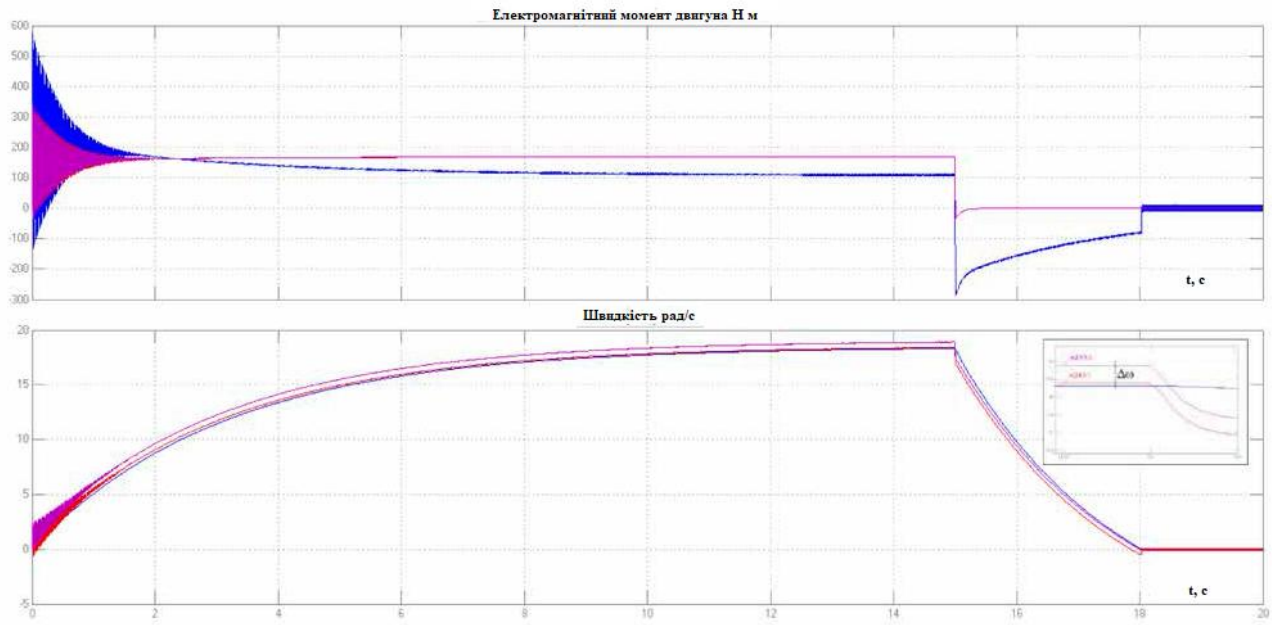


Рисунок 25 - Динамічні характеристики ω(t) та M(t)) дворухового електроприводу при скалярному керуванні

За отриманим перехідним процесом визначємо відстані на яке одна опора випереджає іншу за 1 секунду.

Для цього знайдемо відстань, яку проходить кожна опора за 1 секунду за формулою

$$S_i = \frac{v_i \cdot 1}{60}. \tag{3.27}$$

Поставляючи чисельні значення формулу (3.30) отримаємо

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{v_{\partial 61} \cdot 1}{60} = \frac{18,4 \cdot 1}{60} = 0,3067\,\text{м}; \\ S_2 &= \frac{v_{\partial 62} \cdot 1}{60} = \frac{18,9 \cdot 1}{60} = 0,3150\,\text{м}; \end{aligned} \tag{3.28}$$

Знайдемо різницю відстані між опорами

$$S = S_1 - S_2$$

$$S = 0,3067 - 0,3150 = 0,0083\,\text{м}.$$

При цьому способі управління спостерігається постійне неузгодженість швидкостей на ділянці роботи, а також не відповідність вимоги до режиму роботи.

3.4.6.2 Векторне керування зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна

Модель дворухового електроприводу при векторному управлінні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна, що складається з задатчика швидкості, загального контуру швидкості, контурів струму і потокозчеплення (для кожного двигуна), електромеханічних перетворювачів (АД КЗ 1 і КЗ АД 2) і механічної частини представлена на Рисунок 26.

Динамічні характеристики дворухового електропривода при векторному управлінні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна наведено на Рисунок 27.

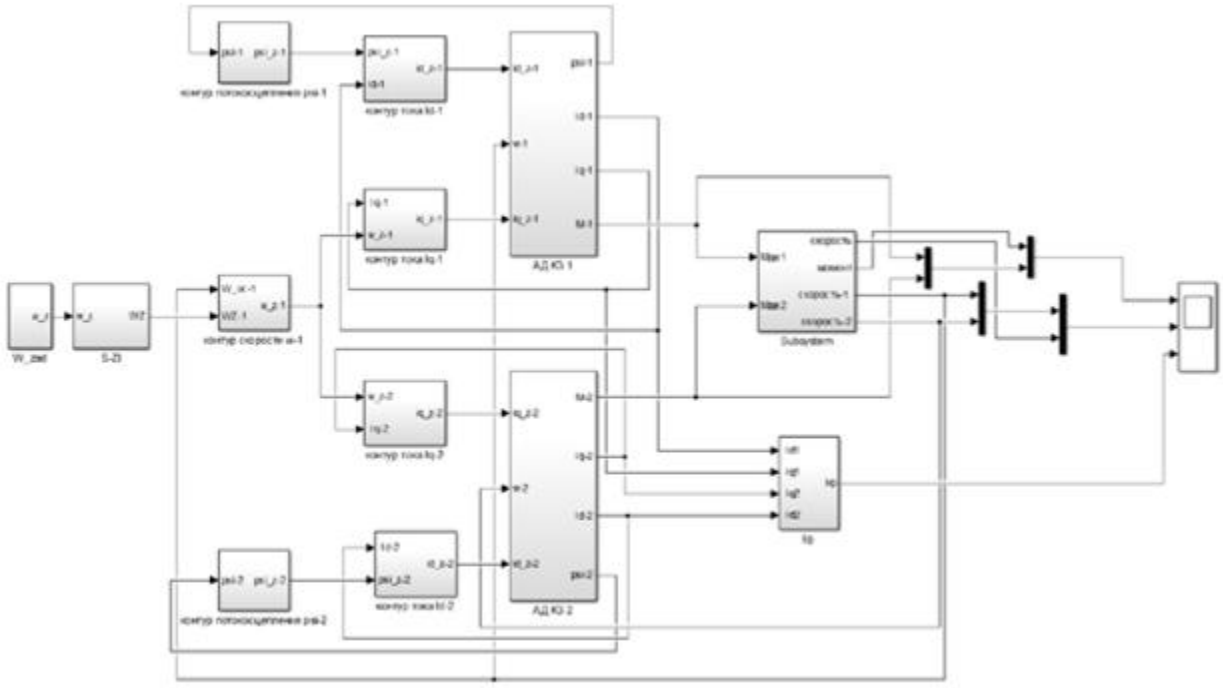


Рисунок 26 - Імітаційна модель дворухового електроприводу при векторному керуванні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна

Визначимо відносну величину синхронізації швидкостей двигунів:

При розгоні

$$\Delta_{\omega_{sy}} = \frac{\Delta\omega_1}{\omega_{sy}} \cdot 100\% = \frac{9,3}{36,4} \cdot 100\% = 25,55\%.$$

При рівномірному русі

$$\Delta_{c_{\omega}} = \frac{\Delta\omega_2}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{0,95}{66,5} \cdot 100\% = 1,43\%.$$

При гальмуванні

$$\Delta_{c_{cy}} = \frac{\Delta\omega_3}{\omega_{cy}} \cdot 100\% = \frac{10,3}{44,2} \cdot 100\% = 23,30\%.$$

По отриманому перехідному процесу визнаємо відстань, яка одна опора випереджає іншу за 1 секунду.

Для цього знайдемо відстань, яка проходить кожна опора за 1 секунду за формулою і відстань між опорами за виразом.

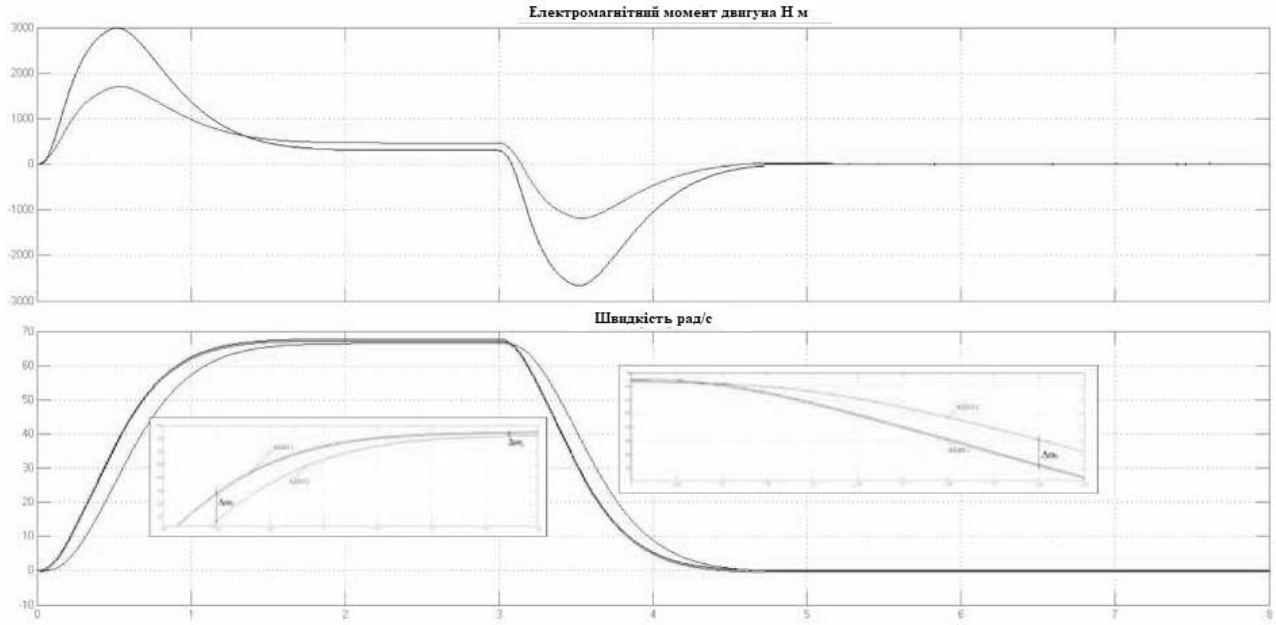


Рисунок 27 Динамічні характеристики *M = f(t)* та *ω = f(t)* дворухового електроприводу при векторному управлінні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна

При розгоні

$$S_1 = \frac{v_{дв1} \cdot 1}{60} = \frac{43,8 \cdot 1}{60} = 0,73\,\text{м};$$

$$S_2 = \frac{v_{дв2} \cdot 1}{60} = \frac{33,5 \cdot 1}{60} = 0,56\,\text{м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,73 - 0,56 = 0,17\,\text{м}.$$

При рівномірному русі

$$S_1 = \frac{v_{дв1} \cdot 1}{60} = \frac{67,05 \cdot 1}{60} = 1,1175 \text{м};$$

$$S_2 = \frac{v_{дв2} \cdot 1}{60} = \frac{66,1 \cdot 1}{60} = 1,1017 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 1,1175 - 1,1017 = 0,0158 \text{ м}.$$

При гальмуванні

$$S_1 = \frac{v_{дв1} \cdot 1}{60} = \frac{36,1 \cdot 1}{60} = 0,6017 \text{ м};$$

$$S_2 = \frac{v_{дв2} \cdot 1}{60} = \frac{45,4 \cdot 1}{60} = 0,7567 \text{ м};$$

$$S = S_1 - S_2 = 0,6017 - 0,7567 = 0,155 \text{ м}.$$

Для даного способу управління характерне суттєве неузгодження швидкостей обертання двигунів, а значить, рух опор, при розгоні та гальмуванні. Режим роботи при векторному керуванні зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна відповідає навантажувальній діаграмі (Рисунок 6).

3.4.6.3 Векторне керування зі зворотним зв'язком за швидкістю кожного асинхронного двигуна

Модель дворухового електроприводу при векторному управлінні зі зворотним зв'язком для кожного двигуна, що складається з S - задатчика швидкості, контурів швидкості, струму і потокозчеплення (для кожного двигуна), електромеханічних перетворювачів (АД КЗ 1 і КЗ АД 2) і механічної частини представлена на Рисунок 28.

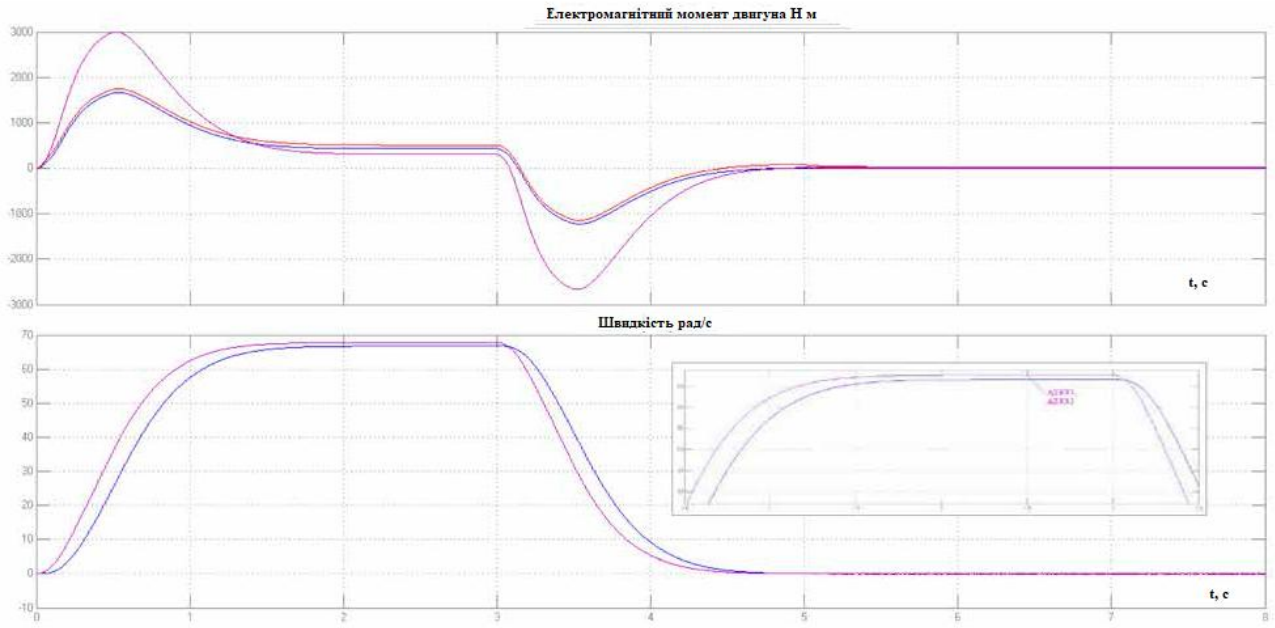


Рисунок 28 - Динамічні характеристики M = f(t) та ω = f(t) дворухового електроприводу при векторному управлінні із зворотним зв'язком для кожного двигуна

Висновки по розділу:

1. Розроблено на основі системи математичних рівнянь структурна модель асинхронного двигуна в системі координат d, q, що обертається.

2. Здійснено дослідження отриманих у програмі MATLAB перехідних процесів моменту та швидкості асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт згідно структурної бібліотечної моделі. В результаті спостерігається стійкість у режимі пуску та накидання завантаження через 0,25 секунд до номінальної швидкості.

3. Здійснено дослідження отриманих у програмі MATLAB перехідних процесів моменту та швидкості асинхронного двигуна потужністю 7,5 кВт, згідно з структурною моделлю у обертальній системі координат q, d. В результаті спостерігається стійкість у режимі пуску та накидання навантаження через 0,25 секунд до номінальної швидкості.

4. Проведено порівняльний аналіз трьох систем керування дворуховим електроприводом: скалярне (*U/f* регулювання), векторне зі зворотним зв'язком за швидкістю одного двигуна та зі зворотним зв'язком за швидкістю кожного

асинхронного двигуна. Слід зазначити, що при векторному управлінні режим роботи дводвигунового електроприводу механізму переміщення козлового крана буде відповідатиРисунок 6, а при скалярному управлінні – ні.

5. Заданим вимогам - синхронізація швидкості обертання двигунів з метою унеможливлення пошкоджень конструкції крана - відповідає модель приводу векторного управління зі зворотним зв'язком за швидкістю кожного асинхронного двигуна.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні питання

Безпека життєдіяльності є науковою дисципліною, яка охоплює теоретичні та практичні аспекти захисту людини від небезпечних та шкідливих факторів навколишнього середовища. Вона охоплює всі сфери людської діяльності, включаючи виробничі процеси.

З соціального погляду безпеку життєдіяльності можна як суспільну безпеку. Це передбачає відповідальність перед людьми та виконання даних ним зобов'язань, коли організація враховує інтереси колективу та суспільства загалом. При цьому вона бере на себе відповідальність за наслідки своєї діяльності для замовників, постачальників, співробітників та акціонерів.

Рівень безпеки життєдіяльності людини безпосередньо пов'язаний з умовами праці, організацією робочого процесу, плануванням робочого місця, а також присутністю чи відсутністю небезпечних та шкідливих факторів у навколишньому середовищі.

В рамках цього розділу розглядаються можливі небезпеки при експлуатації електроприводу, встановленого на механізмах переміщення вантажопідйомних машин ЛТ-62.

4.2 Аналіз виявлених шкідливих факторів проектованого виробничого середовища

Шкідливі фактори, що виникають при експлуатації електроприводів вантажопідйомних машин, пов'язані переважно зі збільшенням рівня шуму, вібрації, електромагнітних випромінювань, а також з відхиленнями параметрів клімату на відкритому повітрі.

У представленій кваліфікаційній роботі аналізується електропривод механізму переміщення козлового крана ЛТ-62, встановлений на відкритій території. У робочій зоні здійснюється природна вентиляція, проте ключовим недоліком є відсутність попереднього очищення та нагрівання повітря.

Кліматичні умови мають значний вплив на стан здоров'я людини, причому сприйняття температури багато в чому залежить від швидкості руху та вологості повітря. Тривале перебування в умовах високої температури призводить до підвищення температури тіла, зміни частоти серцевих скорочень, коливань артеріального тиску, порушення обмінних процесів (особливо водно-сольового балансу) та погіршення функціонального стану органів шлунково-кишкового тракту. Крім того, суттєво знижується розумова та фізична працездатність.

Вплив низьких температур, особливо тривале чи різке короткочасне зниження, також негативно б'є по функціональному стані організму. Фізична активність за низьких температур може погіршити еластичність м'язів і зв'язок, що збільшує ризик травм опорно-рухового апарату.

Для комфортного самопочуття людини оптимальна вологість повітря має бути в діапазоні 40–60%. При зниженні цього показника нижче 40% можуть виявлятися сонливість, подразнення слизових оболонок та відчуття сухості шкіри навіть у здорових людей.

Одними з найпоширеніших шкідливих факторів на виробництві є шум та вібрація. Виділяються два основні типи джерел шуму:

- Механічний шум, що виникає в результаті вібрації поверхонь обладнання, а також ударів у деталях або конструкціях.

- Електромагнітний шум, зумовлений коливаннями електричних пристроїв (наприклад, ротора та статора), що знаходяться під впливом змінних магнітних полів.

Шум і вібрація негативно впливають на здоров'я, викликаючи біль голови, стомлюваність, безсоння або, навпаки, сонливість. Також погіршується увага, пам'ять та реакція. Відповідно до нормативів, рівень звуку робочому місці ні перевищувати 80 дБА, а допустимий рівень вібрацій становить 88 дБ.

Електромагнітні випромінювання генеруються системами виробництва, передачі, розподілу та споживання постійного та змінного електричного струму (в діапазоні 0–3 кГц). Основні джерела: силові кабелі, електропроводка,

випрямлячі та перетворювачі. Відповідно до нормативів, напруженість електромагнітного поля за електричною складовою повинна бути не вищою за 25 В/м для діапазону 5 Гц – 2 кГц. Щільність магнітного потоку має свої межі в аналогічному діапазоні, а рівень поверхневого електростатичного потенціалу не повинен перевищувати 500 В.

4.3 Заходи захисту від шкідливих факторів виробництва

1. Захист від вібрацій: мінімізація контакту працівника з вібрацією.

2. Захист від шуму: використання індивідуальних засобів захисту, таких як беруші або навушники.

3. Захист від зовнішнього опромінення: організація регламентованих перерв та мінімізація впливу факторів випромінювання.

4. Небезпеки під час експлуатації вантажопідйомних машин переважно пов'язані з такими факторами:

- ризик ураження електричним струмом;

- можливий контакт людини з рухомими або рухомими частинами обладнання;

- удари предметами, що падають при обриві вантажозахоплювального механізму;

- висипання вантажу через порушення техніки безпеки;

- ризик перекидання вантажопідйомних машин;

- наїзди чи зіткнення з пересувним обладнанням;

До небезпечних факторів відноситься також наявність великої кількості електроустаткування, що працює від напруги 220 В і з частотою 50 Гц. Робочі місця з підвищеною небезпекою, де є можливість одночасного торкання людиною заземлених металевих частин будівель та обладнання, становлять особливий ризик.

Навіть при нормальному режимі роботи обладнання ризик ураження електричним струмом зберігається, особливо у випадку аварійних ситуацій,

коли можливе ненавмисне з'єднання струмопровідних частин із заземленими конструкціями.

Можливі випадки ураження електричним струмом:

- контакт з оголеними проводами, струмовідними частинами або несправним електроустаткуванням;

- дотик до металевих частин конструкцій чи обладнання, які через пошкодження ізоляції могли опинитися під напругою;

- знаходження поряд із обірваними проводами електромережі;

- Помилкові дії співробітників, такі як подача напруги на обладнання, що знаходиться в ремонті, або недбале ставлення до перевірки відсутності напруги.

Основні заходи щодо забезпечення електробезпеки:

- встановлення ізолюючих або огороджувальних конструкцій для захисту від випадкового контакту з струмопровідними частинами;

- Організація захисного заземлення обладнання та ділянок.

- Основа електричної безпеки – загальний рубильник для вимкнення електропотужності в аварійній ситуації.

- періодичний контроль стану техніки, а також перевірка цілісності ізоляційних матеріалів.

Механічні небезпеки та заходи їх запобігання.

Частини машин і механізмів, що рухаються, становлять високий рівень ризику травмування на виробництві. Серед механічних небезпек виділяються:

- притискання або роздавлювання;

- порізи та механічні пошкодження шкірного покриву;

- защемлення, намотування кінцівок;

- попадання під удар елементів обладнання;

- Укуси про тертя або часткове зняття шкіри.

Засоби захисту від механічних небезпек:

1. Повне обмеження доступу до небезпечних зон обладнання;

2. Використання спеціальних захисних пристроїв:

- огороджувальні конструкції (кожухи, екрани, щити);

- блокувальні пристрої (механічні, електронні та пневматичні системи);

- гальмівне обладнання (робоче, стоянкове та для екстреного гальмування);

- сигнальні пристрої (світлові індикатори, акустична сигналізація).

Основні небезпеки під час експлуатації вантажопідйомних машин.

1. Перекидання крана: Ризик виникнення такої ситуації підвищується при порушенні рівноваги крана, що може призвести до людських жертв та пошкодження інфраструктури. Факторами ризику служать нестабільні робочі майданчики та порушення вимог регламенту під час підйому тяжкості. Для мінімізації таких випадків важливо суворо дотримуватись встановлених норм проведення вантажно-розвантажувальних операцій.

2. Падіння вантажу: Це найчастіша небезпека при роботі з вантажопідйомними машинами, що виникає через помилки стропування.

4.4 Охорона навколишнього середовища

Заходи захисту від шкідливих факторів виробничого середовища та аналіз небезпечних умов експлуатації: Робочий механізм включає безліч компонентів, що містять шкідливі речовини, які становлять небезпеку як здоров'ю людини, так навколишнього середовища.

Серед таких речовин можна виділити:

• свинець, здатний накопичуватися в організмі, ушкоджуючи нирки та нервову систему;

• нікель та цинк, які можуть провокувати розвиток дерматиту;

• луги, що викликають опіки слизових оболонок та шкіри.

У зв'язку з цим утилізація електродвигунів потребує застосування спеціальних комплексних методів. Ці методи включають:

• поділ металевих та неметалічних компонентів;

• переплавлення металевих частин для використання у подальшому виробництві;

• спеціалізовану переробку неметалевих деталей.

На сьогоднішній день у різних галузевих сферах активно розробляються та впроваджуються безвідходні технології. Однак повне застосування подібних технологій на всіх ключових етапах промислового виробництва пов'язане з необхідністю розв'язання широкого спектру складних технологічних, конструкторських та організаційних завдань.

4.5 Розрахунок пристрою захисного заземлення

Усі електрифіковані пересувні вантажопідіймальні крани мають бути обов'язково заземлені. Основна мета заземлення полягає у запобіганні ураженню людей електричним струмом при випадковому контакті з металевими елементами крана, які, хоч і не є частиною електричного обладнання, можуть опинитися під напругою через пошкодження ізоляції електричних кіл.

Заземлення є технічною системою, що забезпечує з'єднання металевих частин крана із землею за допомогою спеціально встановлених заземлювальних пристроїв. Обов'язкове заземлення піддаються металоконструкції крана, корпусу електроапаратів, металеві оболонки електроустановок, захисні труби електропроводки та кабелі. Схеми заземлення вибираються виходячи з рівня напруги та особливостей системи енергопостачання мереж живлення.

Для заземлення корпусів кранового електроустаткування та двигунів застосовується герметичне електричне підключення до металоконструкції крана, що забезпечується зачищенням та залишенням незафарбованих ділянок на контактних поверхнях. У свою чергу, металоконструкції крана заземлюються через рейкові шляхи, де стики рейок надійно зв'язуються за допомогою зварювання, приварювання сполучних перемичок або приварювання рейок до сталевих балок підкранових. Таке з'єднання забезпечує цілісний електричний ланцюг. Для кранових шляхів, розміщених на відкритих майданчиках, заземлення здійснюється шляхом підключення до спеціально передбачених заземлювальних пристроїв. Згідно з нормами, величина опору

ланцюга розтікання струму не повинна перевищувати 4 Ом; перевірка вимірюється із використанням сертифікованих приладів.

Контроль стану заземлювального ланцюга здійснюється одночасно з ремонтними роботами на електрообладнанні крана, але не рідше одного разу на рік. Для розрахунку захисного заземлення використовуються такі вихідні дані: напруга живлення електродвигуна становить 380; вертикальні заземлюючі електроди виготовляються із сталевих труб діаметром 6 см із товщиною стінки не менше 3,5 мм, довжиною 3 м; відстань між електродами у груповому пристрої становить 3 м; горизонтальна сполучна смуга виконана із сталі шириною 4 см; ґрунт у місці встановлення захисного заземлення - глина. Враховуючи кліматичні особливості району експлуатації козлового крана (лісосклад розташований у III кліматичній зоні) та відсутність природних заземлювачів, розрахунки та установки повинні враховувати дані параметри для забезпечення необхідного ступеня безпеки.

Визначаємо опір стрижневого електрода [24]

$$R_e = \frac{\rho \cdot K_в}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l_e}{d_e} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot h_e + l_e}{4 \cdot h_e - l_e} \right) = \frac{60 \cdot 1{,}5}{2 \cdot \pi \cdot 3} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0{,}06} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 23{,}87 \text{ Ом}$$

де l_a – довжина електрода;

d_e – діаметр електрода;

h_e – глибина закладення електрода;

ρ – питомий опір ґрунту;

$K_в$ – коефіцієнт сезонності.

Визначаємо заздалегідь кількість електродів

$$n' = R_e / R_{доп} = 23{,}87/4 = 5{,}968$$

Знаючи розташування електродів (у ряд), відношення відстані між електродами до їхньої довжини

$$a / l_e = 3/3 = 1$$

та попередня кількість електродів, визначаємо коефіцієнт використання електродів [21] η_e=0,72.

Визначаємо остаточно потрібну кількість електродів

$n=R_e / (R_{доп} \cdot \eta_e) = 23,879 / (4 \cdot 0,63) = 9,472$ шт.

Приймаємо 10 електродів.

Довжина сполучної смуги, при розташуванні електродів у ряд, визначається за формулою;

$$l_п = a \cdot (n-1) = 3 \cdot (10-1) = 27 \text{ м.}$$

Визначаємо опір сполучної лінії:

$$R_п = \frac{\rho \cdot K_в}{2 \cdot \pi \cdot l_п} \cdot \ln \frac{2 \cdot l_п^2}{h_п \cdot b} = \frac{60 \cdot 1,5}{2 \cdot \pi \cdot 21} \cdot \ln \frac{2 \cdot 27^2}{0,5 \cdot 0,04} = 53,461 \text{ Ом.}$$

Визначаємо загальний опір контуру захисного заземлення

$$R_\Sigma = \frac{R_э \cdot R_п}{R_э \cdot \eta_п + R_п \cdot \eta_э \cdot n} = \frac{23,87 \cdot 53,461}{23,87 \cdot 0,72 + 53,461 \cdot 0,63 \cdot 10} = 3,605 \text{ Ом.}$$

Проводимо перевірку виконання умови

$$R_\Sigma \leq Ri$$

$$3,605 \leq 4$$

Так як опір заземлювального пристрою менший за допустиме значення, то цю конструкцію пристрою заземлення приймаємо до установки.

4.6 Захист у надзвичайних ситуаціях

Робочий механізм, що розглядається в даній роботі, оснащений електропроводкою на 220 В і призначений для живлення електродвигуна. У разі некоректної експлуатації обладнання або виникнення короткого замикання електричного кола існує ризик займання, що може призвести до знищення техніки, документів та іншого майна.

Дане робоче місце відноситься до категорії ДН. Ця класифікація застосовується, якщо в установці переважно перебувають (зберігаються, переробляються, транспортуються) негорючі речовини та/або матеріали в холодному стані, а також якщо за сукупністю ознак вона не підпадає під категорії АН, БН, ВН чи ДН.

Для запобігання пожежам необхідно виконувати наступні профілактичні заходи:

- Організаційні заходи, спрямовані на забезпечення пожежної безпеки на об'єкті та пов'язані з технологічним процесом.

- Експлуатаційні заходи, які передбачають безпечне використання обладнання.

- Технічні та конструктивні заходи щодо правильного розташування та встановлення електрообладнання та опалювальних приладів.

Організаційні заходи включають такі дії:

1. Проведення протипожежного інструктажу для обслуговуючого персоналу.

2. Навчання працівників правил техніки безпеки.

3. Розробка та розміщення інструкцій, плакатів та планів евакуації.

Експлуатаційні заходи повинні враховувати:

1. Дотримання норм експлуатації устаткування.

2. Забезпечення вільного доступу до обладнання.

3. Зміст ізоляції струмопровідних провідників у справному стані.

До технічних заходів відноситься виконання протипожежних вимог при монтажі електропроводки, а також встановлення обладнання, систем опалення, вентиляції та освітлення.

У разі займання всередині електроустановки для його ліквідації рекомендується використовувати вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-2 або порошкові вогнегасники типу ВП-5. Крім гасіння вогнища, необхідно негайно організувати евакуацію людей.

Законодавче регулювання проектних рішень у сфері забезпечення безпеки на робочому місці ґрунтується на низці правових та організаційних норм. Для реалізації завдань із забезпечення безпеки життєдіяльності потрібно суворе дотримання чинних нормативів, правил виконання робіт та умов трудової діяльності.

ВИСНОВКИ

У цій випускній кваліфікаційній роботі розроблено частотно-регульований асинхронний дводвигуновий електропривод для механізму пересування козлового крана, що забезпечує синхронізацію швидкості руху його опор.

У ході проектування було проведено аналіз призначення крана, його технічних характеристик та кінематичної схеми, а також вивчено особливості конструкції козлового крана ЛТ-62. На основі зібраних даних розраховано навантаження, обраний асинхронний двигун AMTKF132M6 потужністю 7,5 кВт та частотний перетворювач Schneider Electric Altivar 71. Крім того, розраховано параметри схеми заміщення двигуна та визначено його статичні характеристики.

З використанням програми Matlab розроблено імітаційну модель частотно-регульованого дворухового електроприводу, засновану на двофазній математичній моделі в нерухомій системі координат d, q. До складу моделі входять S-подібний задатчик інтенсивності, контури струму, швидкості та потокозчеплення, механічна частина, а також два двигуни.

За підсумками цієї моделі проведено всебічні дослідження роботи двухдвигательного електропривода. Результати показали, що синхронізація швидкості обертання двох двигунів забезпечується завдяки векторному управлінню зі зворотними зв'язками швидкості для кожного з них.

У розділі, присвяченому охороні праці, проведено аналіз потенційно шкідливих та небезпечних факторів, пов'язаних з навколишнім середовищем та експлуатацією приводу козлового крана. Розглянуто ризики негативного впливу на екологію та аварійні ситуації під час роботи обладнання.

ПЕРЕЛІК ЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1 Вантажопідйомні машини: навчальний посібник / Н. М. Слободян, І. О. Пономарчук. - Вінниця: ВНТУ, 2020. - 87 с.

2 Полянський С. К. Будівельнодорожні та вантажопіднімальні машини / Полянський С. К. – К. : Техніка, 2001. – 624 с.

3Назаренко І. І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник / Назаренко І. І. - К.: КНУБА, 1999. - 488 с

4Електропривод: підручник/Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченка, п.і. Савченко, О.Ю. Синівський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лиселя; за ред. Ю.М. Лавріненка. Видавництво «ЛІРА-К». – К., 2009. – 504 с.

5Марущак Я.Ю .синтез електромеханічних систем із послідовним та паралельним корегуванням: навчальний посібник. – львів, видавництво ну „львівська політехніка”, 2004. – 312 с.

6Моделювання електромеханічних систем: підручник/[Чорний О.П., Луговий О.В., Родькін д.й., Сісук Г.Ю., Садовий О.В]. – Кременчук, 2001. – 410 с.

7Півняк Г.Г. сучасні частотно – регульовані асинхронні електроприводи з широтно – імпульсною модуляцією: монографія / м.р. півняк,о.в. вовків.- дніпропетровськ: національний гірничий університет, 2006. – 470 с.

8Гандзюк м. П., желібо є. П., халімовський м. О. Г. Основи охорони праці: підруч для студ вищих навч закладів за ред. М. П. Гандзюка - до каравела, 2004 - 408 з

9Сєріков Я.О., Коженевські, Л.Ф., Хворост, М.В. Безпека життєдіяльності та охорона праці: підручник : Ч.1: Безпека життєдіяльності. Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, краків: ISBN 978-966-695-529-9