

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра електромеханіки та мехатроніки



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему «Дослідження та вдосконалення електроприводу головного руху мостового крану»

Здобувача Малиневського О.П.

2 курсу АЕМм-20 групи

Керівник: к.т.н., доцент Бабіч В.Ф.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 19 грудня 2023 р., протокол № 5.

Завідувач кафедри Е та М _____ Петро Осадчук

Одеса – 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут: *Комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П.М. Платонова*

Факультет: *Автоматизації та робототехніки*

Кафедра: *Електромеханіки та мехатроніки*

Освітньо-кваліфікаційний рівень: *Магістр*

Галузь знань: *14 – Електрична інженерія*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Малиневському Олександрю Петровичу

1. Тема роботи: «Дослідження та вдосконалення електроприводу головного руху мостового крану»

2. Керівник роботи: роботи Бабіч В.Ф. , к.т.н., доцент.

Затверджено наказом ОНТУ № 663-03 від 06.11. 2023 р.

Строк подання студентом роботи: 18.12. 2023 р.

Об'єкт дослідження: Мостовий кран вантажопідйомністю 50 т, проліт 20 м.

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

1. Аналіз літературних джерел.

2. Опис конструкції мостового крану. Загальна характеристика мостових кранів. Механічна частина мостового крану. Конструкція та експлуатація крану. Режим використання електроприводів переміщення мостових кранів. Вимоги до електро-приводів мостових кранів.

Ошибка! Закладка не определена.

3. Вибір потужності двигуна і системи управління. Розрахунок і вибір потужності двигуна. Розрахунок і вибір перетворювачів частоти.

4. Дослідження динаміки електроприводу на математичній моделі. Розрахунок параметрів схеми заїщення і механічних характеристик двигуна. Розробка електронних моделей електроприводу в середовищі Matlab-Simulink та результати досліджень.

5. Економічна частина. Загальні положення. Визначення величин витрат запропонованного варіанту.

Висновки

6. Перелік основного ілюстраційного матеріалу: слайди PowerPoint (20 шт.): 1. Мета і задачі роботи. 2. Загальний вигляд мостового крану КМ-50,0-12,5. 3. Загальне конструктивне виконання крану. 4. Кінематична схема механізму переміщення. 5. Діаграма навантаження мостового крану. 6. Технічні параметри асинхронного двигуна з фазним ротором. 7. Механічні характеристики двигуна. 8. Керування асинхронними двигунами одним перетворювачем. 9. Залежності моментів двигунів від кута непогодження. 10. Перетворювач частоти. 11. Схема з'єднань частотних перетворювачів за схемою «провідний-ведений». 12. Модель синхронізованого електроприводу. 13-16. Перехідні механічні та електричні процеси в синхронізованому приводі. 17. Висновки.

7 Консультанти розділів проекту (роботи)

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

8. Дата видачі завдання: « 09 » вересня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Аналіз літературних джерел	13.09.20	
2	Опис конструкції мостового крана. Загальна характеристика мостових кранів. Механічна частини мостового крану. Конструкція та експлуатація крана. Режим використання електроприводів переміщення мостових кранів. Вимоги до електро-приводів мостових кранів.	11.10.2023	
3	Вибір потужності двигуна і системи управління. Розрахунок і вибір потужності двигуна. Розрахунок і вибір перетворювачів частоти.	31.10.20	
4	Дослідження динаміки електроприводу на математичній моделі. Розрахунок параметрів схеми заїчення і механічних характеристик двигуна. Розробка електронних моделей електроприводу в середовищі Matlab-Simulink та результати досліджень.	22.11.2023	
5	Економічна частина. Загальні положення. Визначення величин витрат запропонованого варіанту.	10.12.2023	
6	Попередній перегляд кваліфікаційної роботи магістра	19.12.2023	
7	Перевірка роботи на плагіат	20.12.2023	
8	Захист кваліфікаційної роботи магістра	26.12.2023	

Здобувач СВО _____ Малиневський О.П.

Керівник _____ Бабіч В.Ф.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого тексту кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення академічної доброчесності.

Здобувач СВО _____ Малиневський О.П.

РЕФЕРАТ

Малиневський О.П. «Дослідження та вдосконалення електроприводу головного руху мостового крану». Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ, 2023. – 69 с. Бібліогр.: 16. Іл.: 14. Табл.: 4.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню електроприводів переміщення мостового крана за системою «провідний-ведений».

Обґрунтована технічна та економічна доцільність заміни релейно-контакторної системи управління реостатами у колі роторів асинхронних двигунів з фазним ротором на систему управління з синхронізованими перетворювачами частоти індивідуальних приводів.

В кваліфікаційній роботі наводиться загальна характеристика мостового крану; наведені розрахунки навантажень і вибір потужностей приводних двигунів; обґрунтований вибір системи електроприводу; описаний принцип дії системи синхронізованого електроприводу в режимі «провідний-ведений»; вибраний перетворювач частоти, що може синхронізувати роботу кількох електроприводів переміщення крану, наведені його технічні характеристики; виконані дослідження системи управління електроприводом на імітаційній моделі в програмному середовищі Matlab-Simulink-SimPowerSysnev.

Ключові слова: мостовий кран, асинхронний двигун з фазним ротором, електропривод переміщення мостового крану; синхронізація електроприводів переміщення, перетворювач частоти, математичне моделювання

ABSTRACT

Malinevsky O.P. "Research and improvement of the electric drive of the main movement of the bridge crane". Master's qualification work. – Odesa: ONTU, 2023. – 69 p. Bibliography: 16. Illustration: 14. Table: 4.

The qualification thesis is dedicated to the study of electric drives for the movement of a bridge crane according to the "driver-driven" system.

The technical and economic feasibility of replacing the relay-contact rheostat control system in the rotor circuit of asynchronous motors with a phase rotor with a control system with synchronized frequency converters of individual drives is well-founded.

The general characteristics of the bridge crane are given in the qualification work; load calculations and selection of power of drive motors are given; justified choice of the electric drive system; the principle of operation of the synchronized electric drive system in the "leading-following" mode is described; the selected frequency converter that can synchronize the operation of several electric drives for moving the crane, its technical characteristics are given; conducted studies of the electric drive control system on a virtual mathematical model in the Matlab-Simulink-SimPowerSysnev software environment.

Key words: bridge crane, asynchronous motor with a phase rotor, electric drive for moving the bridge crane; synchronization of electric displacement drives, frequency converter, mathematical modeling

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ	10
1.1 Перспективні системи електроприводу для керування мостовими кранами	10
1.2 Огляд існуючих систем управління електроприводом механізмів переміщення мостових кранів	15
1.3 Аналіз причин виникнення сил перекосу механізму переміщення мостового крана	18
2 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ МОСТОВОГО КРАНА.....	26
2.1 Загальна характеристика мостових кранів	26
2.2 Механічна частини мостового крану	29
2.3. Конструкція та експлуатація крана.....	30
2.4 Загальні відомості про режим використання електроприводів переміщення мостових кранів.....	34
2.5 Вимоги до електроприводів мостових кранів.....	36
3 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	38
3.1 Розрахунок і вибір потужності двигуна	38
3.2 Розрахунок і вибір перетворювачів частоти	44
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ	48
4.1 Розрахунок параметрів схеми заїщення і механічних характеристик двигуна	48
4.2 Розробка автоматичної системи синхронізації обертів електроприводів переміщення мостового крану.....	55

					<i>KPM.EmM.1.663-03.1.9</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Малиневський О.П.				Літ.	Аркуш	Аркушів
Керівник	Бабіч В.Ф.				6	76	
Зав.кафедри	Осадчук П.І.				ОНТУ, АЕМм-20а		
Дослідження та вдосконалення електроприводу головного руху мостового крану							

4.3 Розробка електронних моделей електроприводу в середовищі Matlab-Simulink та результати досліджень	57
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	61
5.1 Розрахунок витрат при використанні існуючого електроприводу насосу ...	61
5.2 Розрахунок витрат у проектному варіанті (з ПЧ-АД).....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

Вантажні крани складають велику групу обладнання для циклічного підйому та переміщення вантажів. Залежно від призначення, крани бувають різних конструкцій, найпоширенішими є мостові, козлові, баштові, порталні та стрілові крани.

Основними механізмами мостових кранів є механізми підйому, переміщення, повороту та переміщення візка.

Залежно від типу вантажозахоплювального пристрою розрізняють крюкові, магнітні, грейферні та кліщові крани.

Мостові крани призначені для роботи в промислових приміщеннях та на відкритому повітрі. Вони схожі з козловими кранами за компонованням, роботою, формою обслуговуваного поля і називаються мостовими кранами. Мостовий проліт козлового крана обладнаний опорами і рухається по рейках, прокладених по землі, а для переміщення мостового крану рейки прокладані на естакаді.

Механізм переміщення мостового крана працює в повторюваному короткочасному режимі з частими циклами пуску і зупинки. Як правило, навантаження на кран коливається в широких межах від 0,1 до 1,0 номінального значення для механізму підйому і від 0,5 до 1,0 номінального значення для механізму переміщення. Крім того, крани використовуються нерівномірно з плином часу. Тому кожен механізм крана згідно з ГОСТ 25835-83 класифікується за групами режимів роботи. Всього існує шість груп режимів роботи 1М ... 6М.

Часті пуски і перевантаження електроприводів і особливо суворі кліматичні умови (температура, підвищена вологість тощо) вимагають від електрообладнання підвищеної механічної міцності і захисту від впливу навколишнього середовища. Електрообладнання також повинно витримувати високі перевантаження і велику кількість включень на годину.

Для кранових механізмів випускаються спеціальні кранові серії електродвигунів, як постійного, так і змінного струму. На відміну від електродвигунів загального призначення, кранові електродвигуни мають більш високу механічну міцність, а ротор має менший діаметр і подовжену форму для

зменшення моменту інерції, за рахунок посилення колектора і обмотки якоря в двигунах постійного струму, і збільшеного зазору в двигунах змінного струму, що дозволяє забезпечити більш високу перевантажувальну здатність. Завдяки збільшеному зазору асинхронні двигуни мають підвищений струм холостого ходу (до 75% від номінального струму).

Досі велика частина кранів має застарілі контакторні системи керування електроприводами з механічними контролерами керування і реостатами в роторному колі асинхронних електроприводів.

Актуальність теми: Заміна застарілої контакторної системи керування на безконтактну систему керування електроприводами на основі синхронізованих частотних перетворювачів призведе до підвищення надійності роботи мостового крану та значного економічного ефекту,

Мета дослідження: Здійснення узгодженості пересування опор механізмів мостового крана і зниження динамічних навантажень за допомогою дводвигунового електроприводу за системою «провідний-ведений».

Об'єкт дослідження: Синхронізовані електроприводи для переміщення мостового крану за системою «провідний-ведений».

Предмет дослідження: Система підпорядкованого керування електроприводами на основі синхронізованих частотних перетворювачів асинхронних електроприводів переміщення кранів.

Задачі дослідження:

- Огляд проблем управління електроприводами переміщення мостових кранів і порівняння вітчизняних і передових зарубіжних технологій і рішень.
- Розрахунок та вибір електродвигуна, механічних характеристик, ПЧ для електропривода переміщення мостового крану та закону управління двигунами.
- Розробка імітаційних моделей частотно-регульованого синхронізованого асинхронного електроприводу та дослідження динамічних властивостей електропривода переміщення мостового крану на моделях у середовищі MATLAB-Simulink.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

1.1 Перспективні системи електроприводу для керування мостовими кранами

В електроприводі мостових кранів досі використовуються старі релейно-контакторні системи для керування реостатом у роторному колі асинхронних двигунів з фазними роторами, при цьому втрати енергії пропорційні глибині регулювання. Під час гальмування відбувається динамічне гальмування і енергія ротора розсіюється реостатом, що також є неефективним, оскільки вона може бути рекуперована в мережі. Використання асинхронних приводів з реостатно-контакторним керуванням стає особливо складним, коли до плавності регулювання швидкості пред'являються більш жорсткі вимоги. Ця система має ряд суттєвих недоліків, таких як низька якість регулювання, низький ККД через великі втрати в регулюючому реостаті, недостатня надійність системи керування (численні силові контакторні пристрої) та ступінчасте регулювання моменту, що погіршує умови роботи механічних вузлів [3].

Загалом такі системи керування практично вичерпали свій ресурс, морально і технічно застаріли і зараз замінюється більш досконалими системами регульованого електроприводу, які розроблені і випускаються для модернізації та планової заміни асинхронних електроприводів на діючих підйомних установках.

Тому в кваліфікаційній роботі розглянуто кілька типів електроприводів, які є більш досконалими, ніж існуючі приводи на мостових кранах.

Основними показниками для порівняння різних систем повинні бути як економічні, так і технічні параметри [4]:

– Капітальні витрати на електрообладнання: обладнання та витрати на його монтаж, габарити і вага, простота монтажу, займана площа, термін окупності;

- Експлуатаційні дані: коефіцієнт корисної дії, споживання активної та реактивної потужності;
- Експлуатаційні витрати: витрати на електроенергію; експлуатаційна надійність приводу; простота і доступність обслуговування; витрати на обслуговування, ремонт і резервування електрообладнання;
- Керованість приводу: точність підтримання швидкості, діапазон регулювання швидкості.

При аналізі доступності тієї чи іншої приводної системи не розглядаються наступні типи приводів, які явно не відповідають вимогам [5]:

- Приводи з індивідуальним регулюванням швидкості двигуна: зміна активного опору кола ротора, перемикання кількості пар полюсів, каскадне включення двох асинхронних двигунів, системи з використанням допоміжних асинхронних машин;
- Приводи зі спеціально розробленими машинами: системи з електромагнітною проковзуючою муфтою, каскадне з'єднання асинхронного двигуна і машини постійного струму;
- Приводи з малими діапазонами регулювання (менше 10:1): системи з синхронними перетворювачами частоти; системи імпульсного регулювання швидкості для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором;
- Системи параметричного регулювання напруги, що подається на статор асинхронного двигуна; системи імпульсного регулювання швидкості асинхронних двигунів з фазними роторами.

Приводи з використанням двигунів постійного струму або синхронних двигунів далі не розглядаються, оскільки щітково-колекторні механізми для двигунів постійного струму непридатні, оскільки знижують надійність всієї системи. Такі двигуни також поступаються двигунам змінного струму за вартістю та розмірами.

Використання синхронних двигунів у візках мостових кранів є недоцільним через їх значну вартість, габарити та вагу порівняно з асинхронними двигунами. Тому розглядається система електроприводу, яка

може бути застосована до асинхронних двигунів з фазними роторами, які вже встановлені в мостових кранах.

Порівняємо найбільш перспективні системи електроприводу для керування мостовими кранами:

- Асинхронний вентильний каскад (АВК);
- Прямий перетворювач частоти - асинхронний двигун (ППЧ-АД);
- Перетворювач частоти з автономним інвертором напруги - асинхронний двигун (ПЧ з АІН-АД);
- Двигуни подвійного живлення (ДПЖ);

1.1.1 Системи з асинхронними вентильними каскадами (АВК) [7]

Переваги систем з АВК: плавне регулювання струму, моменту та швидкості; потужність перетворювача значно менша за потужність приводу; проста реалізація електроприводу, а також можливість рекуперації енергії в мережу; висока надійність: при виході з ладу перетворювального пристрою привод продовжує працювати без регулювання швидкості; високий ККД, оскільки частина енергії перетворюється; незначні втрати енергії; той факт, що основний потік АД є постійним у сталому режимі, визначає хороше використання двигуна і хороші динамічні характеристики приводу; малі габарити та вартість; відсутність нестабільної роботи через механічні характеристики на місці.

Недоліки систем АВК: обмежений діапазон регулювання швидкості (від 0 до ω_H); низький $\cos\varphi$ через введення протиЕРС в ланцюг ротора; неможливість частого пуску через необхідність використання спеціального обладнання для запуску приводу.

1.1.2 Системи з прямим перетворювачем частоти - асинхронний двигун (ППЧ-АД) [6]

Переваги: прямого перетворення енергії; високий ККД (приблизно 0,97...0,98); вільний обмін реактивною та активною енергією з мережею;

відсутність перемикаючих конденсаторів, що знижує вартість системи; невелика вага та габарити; резервування та взаємозамінність блоків НПЧ легко і швидко; нечутливість до вібрації; постійна часу перетворювача 0,01 с.

Недоліки: відносно велика кількість силових вентилів і складні системи керування знижують надійність системи; низький коефіцієнт потужності; обмежене регулювання вихідної частоти (0...50% від частоти мережі); потужність перетворювача обмежена до 200 кВт; висока вартість перетворювачів; високі гармоніки в мережі, внаслідок чого необхідно встановлювати фільтри та компенсатори;

1.1.3 Системи з перетворювачем частоти з автономним інвертором напруги - асинхронний двигун (ПЧ з АІН-АД) [6]

Переваги: незалежність вихідної напруги від частоти і моменту навантаження спрощує формування необхідного закону регулювання частоти; жорсткі зовнішні характеристики; відсутність щіткозбірного пристрою в АД; простота конструкції; низька вартість; малі габарити і маса; можливість роботи перетворювача з декількома двигунами; коефіцієнт корисної дії близько 0,95...0,96; практично відсутнє споживання реактивної потужності з мережі; постійна часу перетворювача близько 0,001 с.

Недоліки: велика встановлена потужність і габарити; велика вага конденсатора; відновлення неможливе без додаткових інверторів; особливо, якщо потрібно додати додаткові інвертори для рекуперації енергії в мережу; потрібна більша кількість силових діодів і тиристорів.

1.1.4 Система з перетворювачем частоти з автономним інвертором напруги - асинхронний двигун з широтно-імпульсним модулятором (ПЧ з АІН-АД з ШІМ) [6]

Переваги: вихідна напруга чітко залежить від напруги мережі; використання некерованих випрямлячів дозволяє використовувати діоди замість тиристорів, таким чином усуваючи потребу в СІФУ, знижуючи вартість системи

і підвищуючи надійність за рахунок спрощення; $\cos\varphi \approx 1$; низькі спотворення напруги і струму при змінному навантаженні; низькі спотворення напруги і струму при змінному навантаженні; мінімальні спотворення напруги живлення;

Недоліки: велика кількість силових діодів; висока несуча частота може викликати втрати на комутацію в інверторі; регулювання частоти вимагає складного і дорогого обладнання, що знижує загальну надійність системи; регулювання частоти вимагає складного і дорогого обладнання, що знижує надійність системи в цілому.

1.1.5 Системи з перетворювачем частоти з автономним інвертором струму - асинхронний двигун (ПЧ з АІС-АД) [6]

Переваги: зменшення ваги та габаритів завдяки відсутності конденсатора/фільтра на вході; рекуперація можлива без додаткових інверторів; коефіцієнт корисної дії завдяки подвійному перетворенню нижчий, ніж у АВК, близько 0,95...0,96; завдяки меншій кількості діодів, реверсивні частотно-керовані приводи змінного струму можна порівняти з реверсивними приводами постійного струму за вартістю, розмірами та вагою, при цьому динамічні характеристики перших є кращими; перетворювач є джерелом змінного струму для навантаження і в поєднанні з частотним регулюванням струму двигуна дозволяє створити швидко приводну систему з високою якістю перехідних струмів; постійна часу перетворювача становить приблизно 0,01 с; на стороні мережі є неінвертуючий тиристорний перетворювач, який виконує як режими комутації, так і генерації;

Недоліки: м'які механічні характеристики; робота на холостому ході неможлива; втрати потужності двигуна через зовнішні гармоніки значно вищі, ніж у системах ПЧ з використанням АІН-АД; генерація перенапруг при недовантаженні; складна система керування автономними інверторами; «крокування» двигуна на низьких частотах через ступінчасту форму струму; необхідно встановити фільтри та компенсатори; необхідно підключити додаткові

конденсаторні батареї з боку двигуна для запобігання перенапруг на елементах комутатора.

1.1.6 Системи з двигунами подвійного живлення (ДПЖ) [7]

Переваги: оскільки більша частина енергії, що подається, не перетворюється, втрати енергії при перетворенні незначні, що робить систему високоефективною; енергія ковзання, мінус втрати в ланцюзі ротора і перетворювачі, повертається в мережу або передається на вал, забезпечуючи плавне і економічне керування; $\cos\varphi = 1$ при номінальному моменті навантаження; високі динамічні характеристики, зумовлені низькою інерційністю системи керування; висока перевантажувальна здатність; реалізація властивих функцій регулювання значень реактивної потужності має потенціал для компенсації стрибків реактивної потужності та покращення роботи мережі електропостачання;

Недоліки: неможливість пуску двигунів при високих навантаженнях на валу; загальний діапазон регулювання не перевищує 3:1; базова складність схем приводу, що впливає на надійність системи; висока вартість перетворювального обладнання.

Таким чином, найбільш доцільно використовувати системи АВК в якості електроприводів механізмів переміщення мостових кранів.

1.2 Огляд існуючих систем управління електроприводом механізмів переміщення мостових кранів

Для механізму переміщення мостових кранів використовувалася системи управління з релейними контакторами, дросельною і з частотним регулюванням.

В даний час електроприводи на базі асинхронних двигунів з фазними роторами з реостатним управлінням з використанням контролера потужності або простої релейно-контакторної системи вважаються найбільш широко

використовуваним типом електроприводу для мостових кранів. Ця система також включає в себе можливість узгодження з пристроєм управління.

Впровадження релейно-контакторної системи управління виправдано стандартами експлуатації мостових кранів. Система живлення візка, високий вміст струмопровідного пилю, вологість, загазованість, висока температура, висока міцність роботи крана, характеризується великою тривалістю і частотою включень. Однак, незважаючи на його широке застосування (методом електронного узгодження ротора), він вважається неефективним [1].

Це пов'язано з багатьма факторами.

По-перше, якщо ви переключите ступінь пускового опору під час розгону двигуна, крутний момент і стрибок струму різко зміняться в значному діапазоні, і це погіршиться при зменшенні кількості ступенів. Це може привести до появи різких рухів, автоматичних вібрацій і зниження плавності перехідних процесів.

По-друге, при використанні багатодвигунної системи електроприводу для мостового крана з відносно великим прольотом (більше 25 метрів) неодноразове замикання контактів релейно-контакторної системи призведе до різного прискорення приводного двигуна переміщення крана, що викличе додаткову динамічну перевантаження механізму крана і металоконструкції, і в кінцевому підсумку робота крана призводить до зниження продуктивності і передчасного виходу з ладу конструкції його вузлів і механізмів.

Разом з релейно-контакторною системою в крановому механізмі використовується дросельна система керування. Вважається, що вона краще підходить для нерегульованого електроприводу мостового крана. Введення пускового дроселя для обмеження струму ротора асинхронного двигуна в режимах пуску і гальмування забезпечує плавний пуск і гальмування при відсутності системи управління ротором електродвигуна, зберігаючи при цьому миттєве вирівнювання до швидкості 0,5...0,6 від синхронної [2].

Використання такої системи виключає всі енергетичні реакції під час роботи, а схема управління релейним контактором і кабель для підключення пристрою до ланцюга ротора спрощують схему електроприводу пристрою до

мінімуму. Забезпечуючи плавний розгін, особливо плавне гальмування, можливо подовжити термін служби деталей автоматики (коробок передач, муфт, валів, ламп і т.д.). Сила прискорення і гальмування пристрою, обрана при регулюванні, залишається постійною, тому виключається «людський фактор» оператора крана. Однак використання АДФР сьогодні вважається неактуальним, але це пов'язано з неекономічністю [1,2].

Виходячи з вищевикладеного, для зниження динамічного навантаження і стійкості обладнання необхідно модернізувати існуючу систему управління або використовувати досвід новітніх систем, більш досконалих систем управління електроприводом маневрів мостового крана. В результаті стабільність і точність роботи обладнання мостового крана повинні бути підвищені з урахуванням всіх пропонуваніх до нього вимог.

Нині спостерігається стійка тенденція переходу від нерегульованих електроприводів мостових кранів з релейними контакторами, дросельними системами до частотно-регульованих і надійних електроприводів. Це пов'язано з інтенсивним використанням перетворювачів частоти з асинхронними двигунами з короткозамкненими роторами (АКЗ) в кранових механізмах [2].

Частотне регулювання вважається більш ефективним способом регулювання частоти обертання двигуна змінного струму, який дозволяє досягти хороших механічних властивостей асинхронного двигуна.

Основними перевагами цієї регульованої системи електроприводу є::

- Плавне регулювання і висока жорсткість механічних характеристик, яка дозволяє регулювати частоту обертання в широкому діапазоні;
- Ефективність регулювання обумовлена тим, що двигун працює з невеликим значенням ковзання, а втрати двигуна не перевищують номінального значення.

На автоматизованому електроприводі пристрою переміщення мостового крана при регулюванні частоти обертання двигуна з використанням напівпровідникового перетворювача за методом «перетворювач частоти-АДКЗ» (ПЧ-АД) з використанням електроприводу з частотним регулюванням в

мостовому крані математична модель дводвигунового електроприводу не була розроблена, метод частотного регулювання не був протестований.

Особливістю електроприводів горизонтального переміщення крана буде те, що більшість з них реалізовані у вигляді багатодвигунових приводів. В цьому випадку електродвигуни можуть живитися як від одного перетворювача частоти, так і від власного перетворювача, що вважається найбільш економічним варіантом для забезпечення більш гнучкого управління крановим обладнанням [7].

Живлення двигунів від індивідуальних перетворювачів найбільш придатне для приводу рухомих мостових кранів з великим зазором. У цьому випадку, завдяки високій гнучкості системи управління, вирівнюванню перевантаження між двигунами методом «провідний-ведений», синхронізації обертання приводу для усунення перекосу моста крана і т.д. може використовуватися як альтернатива традиційному методу [12].

1.3 Аналіз причин виникнення сил перекосу механізму переміщення мостового крана

У багатьох кранах мостового типу динаміка горизонтального переміщення є схожою, зумовлена наявністю моста у мостових кранів. Однак в мостових кранах, що розміщені на відкритих площадках, крім конструктивних і експлуатаційних навантажень, враховуються також вітрові навантаження, які мають позитивний знак моменту опору в 2 напрямках. Виходячи з цього, в цей розділ включені вітрові пошкодження і вітрове навантаження, вже умовно враховують момент опору.

Металева конструкція звичайного мостового крана являє собою плоску прямокутну раму, що складається з прольоту і торцевої балки, остання виступає за межі прямокутника і переміщує колеса в якості конструктивної моделі, міст крана являє собою статично невизначену систему в горизонтальній площині, двічі зовні і тричі всередині. Механізм в цілому представлений складною

системою, яка включає нерухомі частини, обертові частини і частини, що поступально переміщуються.

Кінематична схема мостового крана наведена на рисунку 1.1. В цілому, згідно з рисунком, механізм переміщення мостового крана може включати в себе 2 (або 4) ідентичних приводів переміщення. Основними елементами є електроприводи, що переміщують кран по рейках 1, коробка передач 2, проміжний вал 3, муфта 4, гальма 5, ходові колеса 6, 7 (у великих кранів кількість кранових коліс з одного боку може досягає шістнадцяти).

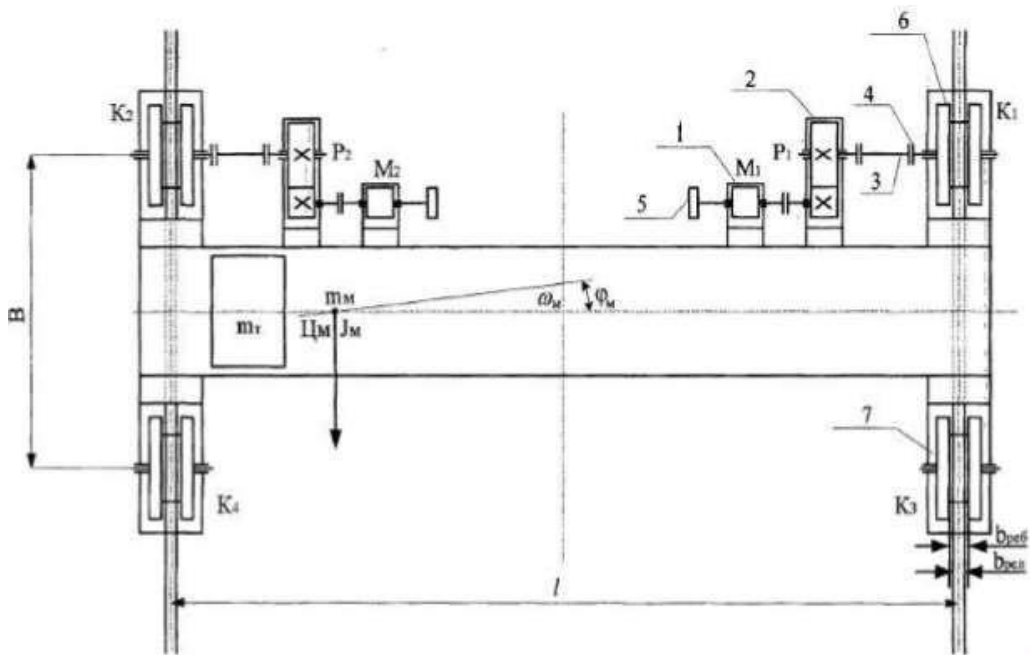


Рисунок 1.1 – Кінематична схема моста з механізмом переміщення крана:

1 – електроприводи M_1, M_2 ; 2 – редуктори P_1, P_2 ; 3 – проміжний вал; 4 – муфта; 5 – гальмо; 6, 7 – ходові колеса $K_1...K_4$

Між ребордами ходових коліс мостового крана і підкрановою рейкою є обов'язкові проектні зазори, порядку 15...40 мм. В результаті рух крана в напрямку підкранового шляху супроводжується двома додатковими переміщеннями: бічним зміщенням крана поперек рейки і обертанням навколо вертикальної осі, що проходить через центр ваги крана.

Перш за все, бічне зміщення спричинене асиметричним розподілом сил, що діють на кран у горизонтальній площині, що призводить до несинхронізованого переміщення його опори та появи пружних деформаційних сил (сил перекосу) у металевій конструкції крана, які прагнуть компенсувати різницю в швидкість переміщення опори. Сила пружної деформації навантажує мостовий кран одночасно з силою його власної ваги і вагою вантажу під час руху і після зупинки.

Відносна величина напруг в елементі крана від таких зусиль може досягати до 30% і навіть до 100% для окремих елементів конструкції.

Величина і характер зміни сили пружної деформації в металевій конструкції крана обумовлені декількома причинами, основними з яких є:

- Різні механічні характеристики двигуна приводу переміщення крана;
- На зміщення вантажу від середини прольоту мостового крана, а також на величину і характер сили перекосу також впливають довжина і характер підвіски вантажу (гнучкість або жорсткість) і початковий стан вантажу (амплітуда і частота вібрації), що призводить до різного опору переміщенню опори крана.;
- Різниця в діаметрі ведучого колеса крана, яка під час роботи крана досягає значення близько 0,5...1,5 мм;
- Установка кранових коліс під кутом до осі візка;
- Порушення зчеплення ведучого колеса з рейкою;
- Зазор передавального елемента;
- Вітрове навантаження;
- Робота механізму поєднання роботи, наприклад, механізму переміщення крана і вібрації вантажу.

З цих причин переміщення опори мостового крана відбувається асинхронно, що призводить до появи перекосних сил в металокопструкції крана. Оскільки сила перекосу негативно впливає на роботу мостового крана, визначення цих сил, оцінка впливу різних факторів на їх величину, а також розробка засобів для зменшення величини сили перекосу стали дуже важливими.

Розглянемо це питання більш детально. Для візків з вантажами допустимо зміщення однієї з опор мостового крана, наприклад, вліво. У свою чергу, опір руху лівої сторони крана збільшується через збільшення вертикального навантаження, тоді як права сторона зменшується. В результаті виникає момент зовнішньої сили, який змушує праву сторону крана рухатися вліво. Це викликає як обертання моста, так і його пружну деформацію, тим самим створюючи силу перекосу ферми моста. Бічний зсув і поворот моста відбуваються досить повільно, тому в першому наближенні для аналізу причин сили перекосу вони не беруться до уваги, припускаючи, що ідеальне бічне з'єднання накладається на точки дотику коліс і рейок, за винятком цих переміщень.

Виходячи з цих умов, коли в період вільного переміщення крана жодне з його ходових коліс не стикається з краями рейок, механізм переміщення мостового крана може бути представлений у вигляді електромеханічної системи (ЕМС) з пружним механічним з'єднанням між двома електродвигунами, які діють як мостова ферма (рисунок 1.2). Оскільки електродвигун підключений паралельно мостовій фермі, таку систему можна вважати паралельною ЕМС.

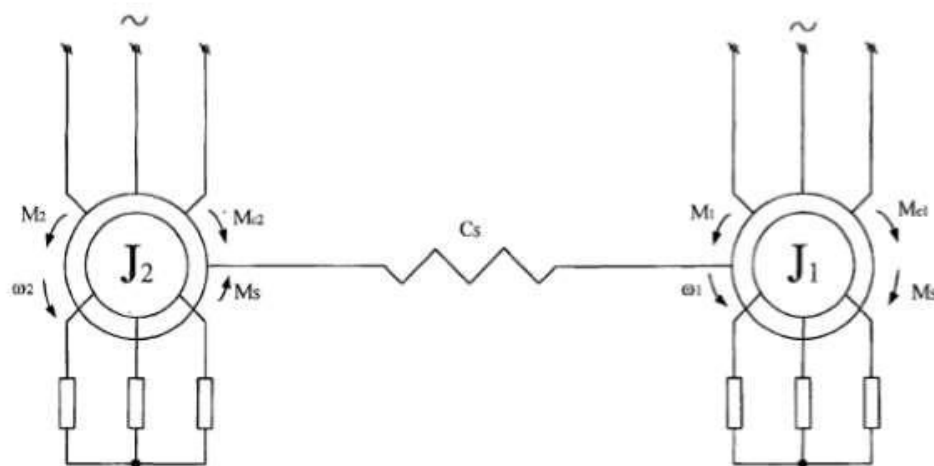


Рисунок 1.2 – Двомасова паралельна ЕМС

Система диференціальних рівнянь, що описує рух мостових кранів з підвішеними вантажами, представлена у вигляді паралельної ЕМС, має наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{D1} - M_s - M_{C1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ M_{D2} + i \cdot M_s - M_{C2} - M_G = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ M_G = J_3 \frac{d\omega_3}{dt}; \\ M_s = C_s \cdot (\varphi_1 - i \cdot \varphi_2); \\ M_G = C_G \cdot (\varphi_2 - i \cdot \varphi_3) \end{array} \right. \quad (1.1)$$

де M_{D1}, M_{D2} – приводні моменти електродвигунів;

M_s – приведений пружний момент від перекосу крана;

M_G – приведений момент, створюваний вантажем;

M_{C1}, M_{C2} – приведений момент опору (з урахуванням абсолютно позитивного вітрового навантаження);

C_G – коефіцієнт пружності троса;

C_s – коефіцієнт пружності ферми моста;

J_1 – сумарний момент інерції першої половини моста і першого двигуна;

J_2 – сумарний момент інерції другої половини моста і другого двигуна;

$\omega_1, \varphi_1, \omega_2, \varphi_2, \omega_3, \varphi_3$ – приведені кутові швидкості і переміщення опор крана і вантажу;

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_1}{D_2} \text{ – коефіцієнти приведення;}$$

D_1, D_2 – діаметри ведучих коліс.

У деяких випадках створення сили перекосу можна дослідити за допомогою паралельної електромагнітної сумісності, описаної в системі рівнянь. Припустимо, що електродвигун механізму переміщення запускає мостовий кран з різними механічними властивостями. Припустимо, що навантаження рівномірно розподілене між опорами і приводних коліс мають рівні діаметри. Для цього в системі рівнянь момент інерції повинен дорівнювати нулю ($J_3 = 0$), а момент пружної взаємодії M_G відсутній.

У цьому стані рух кожної опори крана буде однаковим. Але через те, що електродвигуни мають різні механічні властивості, вони будуть обертатися з різними кутовими швидкостями при однаковому навантаженні. В результаті відстань, що підтримується кожним краном, визначається як:

$$S_i = \int_{t_1}^{t_2} \omega_i \cdot \frac{D_i}{2} dt.$$

Відстані відрізняється ($S_1 \neq S_2$), що призводить до появи сили перекосу на мостовому крані, згідно з рисунком 1.6.2. Тут, далі на рисунку, значення сили перекосу показано у відносних одиницях. При переході до відносних одиниць вимірювання в якості вихідного значення був прийнятий номінальний крутний момент двигуна ($M_6 = M_H$).

Максимальне значення сили перекосу допустимої вантажопідйомності досягається в момент максимального неузгодженості в обертанні двигунів опори мостового крана, показаного на рисунку 1.3, крива 1. При стабільній швидкості переміщення крана зусилля перекосу відносно невелике і залишається практично постійним.

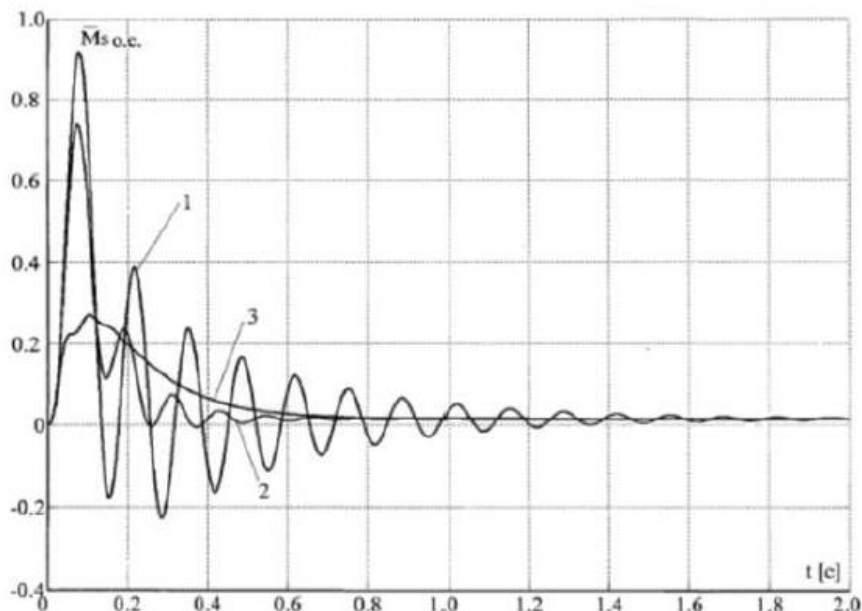


Рисунок 1.3 – Сила перекосу, що діє на металеву конструкцію мостового крана при пуску двигунів

Сила пружності в металевій конструкції крана створює додаткове навантаження на привод для переміщення опори, яка пройшла довший шлях. Через це навантаження частота обертання двигуна зменшується до тих пір, поки не зрівняється з частотою обертання іншого двигуна. З цього моменту опора крана рухається з тією ж швидкістю, але з постійним зусиллям перекосу. Якщо діаметри ведучих коліс однакові, то відстані, на які переміщується кожна опора крана, однакові тільки при збереженні кутових швидкостей приводних двигунів. Якщо в системі електроприводу використовується зворотний зв'язок за різницею в частоті обертання електродвигунів, то можна підтримувати рівність їх кутових швидкостей.

Криві 2 і 3 на рисунку 1.3 показують, що зміна сили перекосу зменшується при впливі зворотного зв'язку на різницю швидкостей. Вводячи зворотний зв'язок в систему управління приводом, можна отримати практично аперіодичні характеристики перехідних процесів.

Однією з основних причин появи сили перекосу також можна вважати різницю в діаметрі приводних коліс мостових кранів, які з'являються в процесі експлуатації через знос і постійних ударних навантажень. Процес запуску крана в цьому випадку показаний на рисунку 1.4.

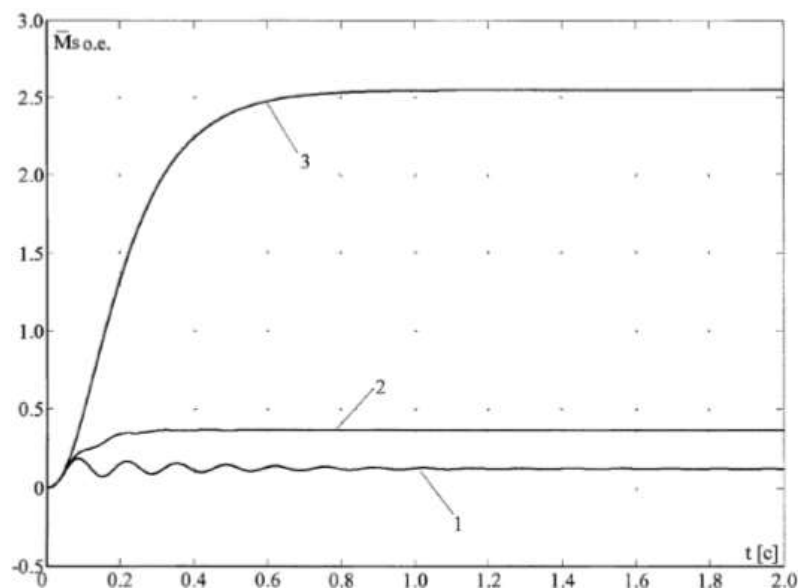


Рисунок 1.4 – Сила перекосу, що діє на металеву конструкцію мостового крана при запуску системи з різними діаметрами приводних коліс і різним ступенем синхронізації

Припустимо, що двигуни переміщення опори крана мають однакові механічні властивості. Очевидно, що при наявності різниці в діаметрі ведучого колеса крана відстані, на які переміщується кожна опора, також буде різними, і в результаті це призведе до появи сили перекосу мостового крана (рисунок 1.4, крива 1). Як показано на рисунку 1.4, криві 2 і 3, введення негативного зворотного зв'язку зменшує варіативність системи, але в той же час сприяє зростанню сили перекосу. Це пояснюється тим фактом, що сила перекосу зростає прямо пропорційно часу переміщення мостового крана до тих пір, поки синхронне обертання електродвигуна не буде перервано. Зрозуміло, що в перший момент перехідного процесу, починаючи рух крана, введення зворотного зв'язку з різниці швидкостей знижує рівень динамічного навантаження, що діє на металеву конструкцію крана.

Величину сили перекосу можна зменшити тільки в тому випадку, якщо зберігається рівність відстаней, які проходять опори крана ($S_1 = S_2$), тобто необхідно контролювати шлях, по якому проходить кожна опора крана, і подавати відповідний сигнал в систему управління електроприводом (ЕР), щоб різниця в відстанях проходження опор крана була якомога менше. Очевидно, що таке рішення може бути реалізовано тільки в тому випадку, якщо є можливість плавно регулювати частоту обертання приводного двигуна, що вимагає використання системи управління з частотним регулюванням.

2 ОПИС КОНСТРУКЦІЇ МОСТОВОГО КРАНА

2.1 Загальна характеристика мостових кранів

Мостові крани є одним з основних засобів механізації вантажних і складських операцій в різних галузях народного господарства. Мостові крани діляться на мостові крани, що відносяться до категорії вантажопідіймальних машин, і транспортні машини з різними короткочасними і повторюваними короткочасними режимами роботи електроприводів.

Прикладом сучасного мостового крану є продукція українського підприємства ТОВ «Київський завод ПТО», який спільно з PodemCrane AD (Болгарія) виробляє мостові двобалкові крани для:

- машинобудівних підприємств;
- підприємств хімічної галузі;
- видобувних і переробних комплексів;
- гірничо-збагачувальних комбінатів;
- металургійних комбінатів і ливарних цехів;
- цехів по виробництву металоконструкцій;
- складів готової продукції.

Залежно від конструкційних особливостей виробляються наступні типи мостових кранів: однобалкові і двобалкові, підвісні і опорні, з електричним або ручним приводом, крюкові, грейферні і спеціальні. Для транспортування вибухонебезпечних вантажів і роботи в потенційно вибухонебезпечних зонах можливо використовувати крани вибухонебезпечного виконання.

Основні технічні характеристики мостових двобалкових кранів: вантажопідйомність мостових кранів – до 100 т; відстань між осями підкранових рейок (проліт) – до 40 м; висота підйому вантажу до 50 м; швидкість руху моста 20...120 м/хв; швидкість руху вантажного візка 10...60 м/хв; швидкість підйому вантажу 1,5... 30 м/хв.

Керування двобалочним мостовим краном може здійснюватися як з кабіни, так і з підлоги через підвісний пульт або за допомогою системи радіоуправління. Експлуатація крана можлива при температурах від $-40...+70$ °С в режимах роботи:

- А1-А3 (1АМ по FEM) – легкий;
- А5 (2т по FEM) – середній;
- А6-А7 (3т по FEM) – важкий;
- А8 (4т по FEM) – дуже важкий.

У комплектацію мостового крана виробництва Київського заводу ПТО входять:

- крановий візок тельферного типу виробництва PodemCrane AD (Болгарія) або розгорнутого виконання із застосуванням мотор-редукторів SEW-Eurodrive (Німеччина);
- кінцеві балки типу G виробництва PodemCrane AD (Болгарія);
- пролітний міст: балки звареної конструкції коробчатого типу, сталь 09Г2С;
- мотор-редуктори переміщення виробництва PodemCrane або SEW-Eurodrive (Німеччина);
- електрообладнання Schneider Electric (Франція);
- токопідвід типу Festoon;
- частотний привод підйому і переміщення Schneider Electric типу Altivar;
- за погодженням: управління краном з підлоги або з кабіни;
- стаціонарна або пересувна кабіна управління, обладнана конвектором і кондиціонером, крісло-пультом з 3-5-позиційними джойстиками управління;
- прилади безпеки: кінцеві вимикачі ходу візка і крана, система сигнального звукового і світлового оповіщення під час роботи, реєстратор параметрів, обмежувач вантажопідйомності.

Мостові крани використовуються для обслуговування критих і відкритих складів і вантажних платформ, монтажу будівельних конструкцій і товарів, обслуговування промислових підприємств, гідротехнічних споруд, а також

розвантаження вантажів на контейнерних платформах залізничних станцій при температурі навколишнього середовища $-40...+70$ °С.

Загальний вигляд мостового крану КМ-50,0-12,5 вантажопідйомністю 50,0 + 12,5 т виробництва підприємства КЗПТО зображений на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд мостового крану КМ-50,0-12,5 вантажопідйомністю 50,0 + 12,5 т

Основні параметри та технічні характеристики мостового крану КМ-50,0-12,5 наведені в таблиці 2.1..

Таблиця 2.1 – Основні параметри та характеристики крану КМ-50,0-12,5 [14]

Назва показника	Значення
Вантажопідйомність номінальна, т	50 + 12,5
Проліт крану (ширина кранового шляху), м	10...40
Найбільша висота підйому вантажу, м	20
Швидкість руху моста, м/хв	20...120
Швидкість підйому вантажу, м/хв	1,5... 30
Вага крану в зборі, т	65...100

Режим роботи кранового механізму є важливим фактором при виборі приводного двигуна, обладнання та потужності системи управління. Від нього залежить і конструкція механізму.

У деяких випадках крани одного типу можуть працювати в різних режимах. Неправильний вибір режиму при проектуванні електроприводу для крана призведе до поганих техніко-економічних показників всього обладнання. Вибір більш легкого режиму викликає більший знос електрообладнання, що призводить до частих поломок і простоїв. Тому важливо підібрати оптимальний режим роботи кранового механізму.

Згідно з правилами побудови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних механізмів, існує чотири номінальних режими роботи: легкий (Л), середній (С), важкий (В) і дуже важкий (ДВ).

Режим роботи кожного механізму крана визначається індивідуально, тоді як загальний режим роботи крана задається головним вантажопідіймальним механізмом.

Відповідно до стандарту СЕС 2077-80, всі крани поділяються на сім класів (від А0 до А6) відповідно до умов експлуатації та навантаження.

2.2 Механічна частини мостового крану

Конструкція крана (рисунок 2.2) складається з моста, по рейках якого рухається візок 2. Керування краном здійснюється з кабіни кранівника 3, яка розташована під робочою платформою моста. Для обслуговування візка живлення крана і силового колектора передбачена кабіна обслуговування візка 4. Електрообладнання 5, розташоване на мосту, на візку і в кабіні кранівника, служить для управління механізмами крана. Живлення електропривода візка здійснюється за допомогою гнучких кабелів 6, підвішених до візків, що рухаються по монорейці.

Мостовий кран складається з двох напівбалок, вага кожної з яких рівномірно розподіляється на чотири ходові колеса. Напівмости з'єднані між

собою перехідними балками, що обертаються. Мости мають окремі приводи. Мости обладнані перехідними майданчиками, сходами та буферними пристроями.

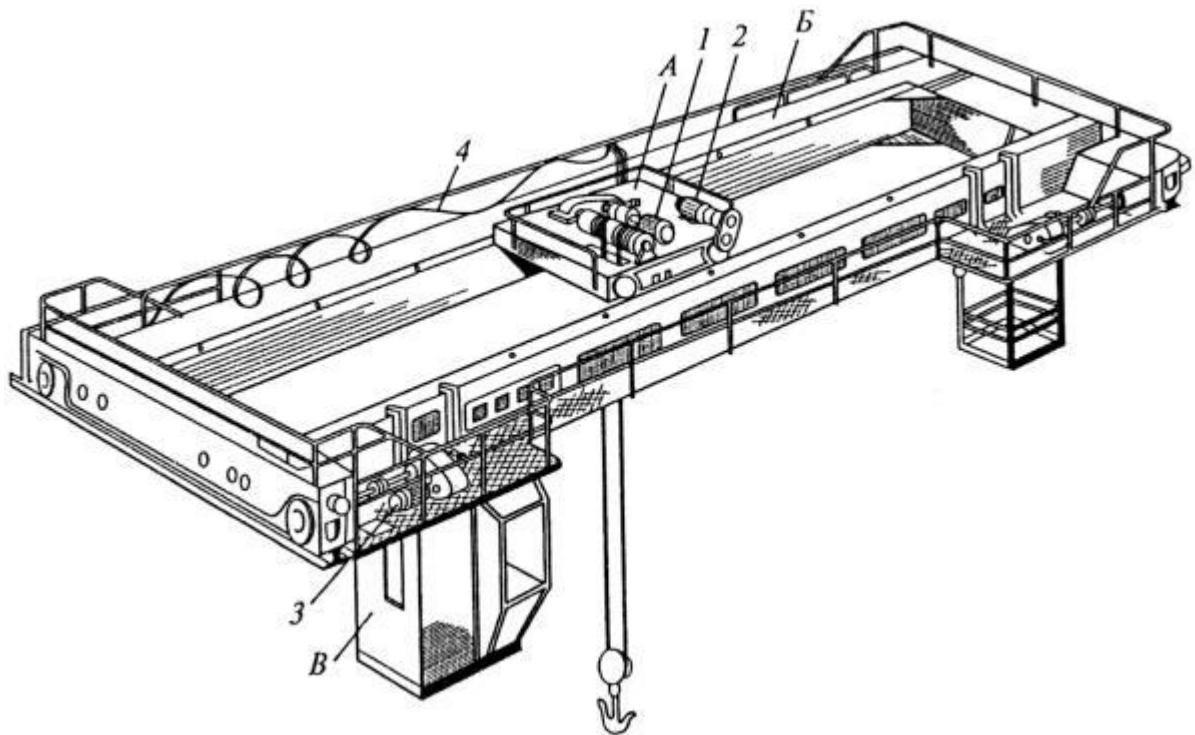


Рисунок 2.2 – Мостовий кран: 1 – двигун підйому; 2 – двигун переміщення візка; 3 – двигун переміщення моста; 4 – гнучкий кабель живлення електроприводів візка та підйому; А – візок; Б – мостова балка; В – кабіна кранівника

2.3. Конструкція та експлуатація крана

Електроприводи більшості вантажопідйомних машин характеризуються високими частотами комутації, широким діапазоном регулювання швидкості і повторюваним короткочасним режимом роботи з великими перевантаженнями, що постійно виникають при розгоні і гальмуванні механізму. Особливі вимоги до застосування електроприводів у вантажопідйомних машинах лягли в основу створення спеціальних серій електродвигунів і кранового обладнання. В даний час кранове електрообладнання включає в себе серії кранових електродвигунів змінного і постійного струму, серії силових і магнітних контролерів, командні

контролери, кнопкові пости, кінцеві вимикачі, гальмівні електромагніти і електрогідравлічні штовхачі, пускові і гальмівні резистори, а також різні кранові електроприводи. А також багато інших пристроїв, що використовуються для оснащення крана.

Мости кранів складаються з двох коробчастих балок, кожна з яких спирається на дві коробчасті кінцеві балки, шарнірно з'єднані між собою з'єднувальними балками, утворюючи жорстку раму.

Кінцеві балки осей крана спираються на вісім двобалкових ходових коліс, чотири з яких є ведучими.

Для виходу з кабіни на майданчик моста є люк.

Рейки візків кріпляться до балок за допомогою притискних планок.

Платформа балки має поручні і призначена для безпечного і зручного обслуговування кабельного живлення візка, а також електрообладнання і механізмів, розташованих зовні кабіни і візка.

На кінці моста підвішена кабіна кранівника для обслуговування основного візка.

Балки в кінці моста при встановленому крані обладнані поручнями, а платформи – поручнями та огороженнями. Перехід між платформами на прогонові балки здійснюється по кінцевих балках за допомогою драбин.

Рух кранового візка обмежується буферними пристроями, встановленими на прогонових балках моста, а крана – буферними пристроями, закріпленими на кінцевих балках.

Перед колесами моста встановлені скребки для запобігання потрапляння сторонніх предметів під колеса. Механізм переміщення крана з ведучими колесами складається з чотирьох незалежних приводів, що включають електродвигун, гальмо, швидкохідний вал з муфтою, редуктор і тихохідний вал з муфтою, з'єднаний з валом ведучого колеса.

Візок складається з рами, двох механізмів підйому з підвішеними вантажами і механізму переміщення візка (рисунок 2.3). У деяких кранах візок оснащений кабельним барабаном для допоміжного електромагнітного підйому

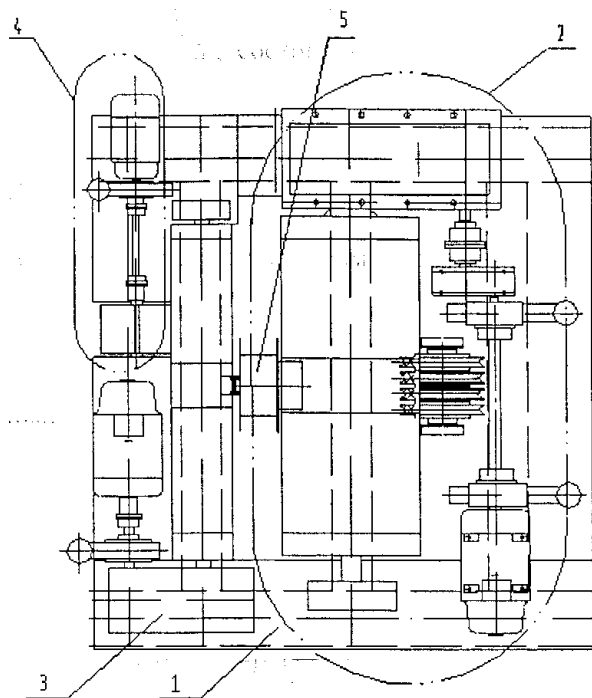


Рисунок 2.3 – Конструкція візка: 1 – рама; 2 – механізм головного під'йому; 3 – механізм допоміжного під'йому; 4 – механізм переміщення візка; 5 – кабельний барабан

Рама візка виконана зі зварної балки і є знімною для транспортування залізницею. Елементи рами з'єднані прокладками та болтами, без використання зварювання. Рама встановлена на чотирьох ходових колесах, два з яких є ведучими. Колеса кріпляться до рами за допомогою кутових букс. Візок пересувається по рейках уздовж балок моста.

Механізм головного підйому складається з електродвигуна, двох муфтових з'єднань з проміжними валами, двох редукторів з зубчастими муфтами між ними, двох колодкових гальм, барабанів, поліспастів і підвіски вантажопідйомністю 50 т.

Основним механізмом підйому є п'ятикратний здвоєний поліспаст.

Барабан механізму підйому приводиться в рух від редуктора за допомогою зубчастої втулки. Барабан спирається, з одного боку, на підшипники у вихідному валу редуктора, а з іншого боку, на підшипники в опорі барабана.

Барабан механізму головного підйому складається зі звареної обичайки, на поверхні якої нарізані гвинтові канавки для направлення і в один шар намотаний вантажний канат. Кінці каната кріпляться до поверхні барабана колодками за

допомогою шпильок з пружинними шайбами і гайками. Задня опора барабана складається з корпусу, який може обертатися навколо шарніра, інший кінець якого спирається на один з елементів обмежувача навантаження - вагову комірку SIWAREX серії RN. Обертання передається від валу маточини до вилки кінцевого вимикача через стакан і гіпсокартон, прикріплений до валу болтами.

Допоміжний підйомний механізм складається з електродвигуна, вала з зубчастою муфтою, редуктора, блочного гальма, барабана, подвійного підйомника і підвіски вантажопідйомністю 20 тонн.

Допоміжний підйомний механізм 12,5 т має подвійний поліспаст.

Візок спирається на чотири колеса з подвійними ребордами, два з яких ведучі. Механізм переміщення візка складається з електродвигуна, колісних гальм, швидкохідного вала з зубчастою муфтою, вертикального редуктора, двох проміжних валів з зубчастими муфтами (муфтовими з'єднаннями) і двох ведучих коліс. Приводні колеса візка складаються з колеса, встановленого на валу за допомогою шпонки. Колісні вали обертаються в підшипниках кочення, встановлених в кутовій буксовій коробці.

Закрита кабіна управління зашклена, ізольована і звукоізольована, обладнана кондиціонером, електричним опаленням і пультом управління.

Кабіна управління призначена для управління всіма механізмами крана. Кабіна управління обертається, обладнана кріслом для кранівника і регулюється по висоті і вертикальній осі.

У конструкцію крана входить:

- Вільний доступ для обслуговування механізмів та електрообладнання;
- Безпека при обслуговуванні, ремонті та монтажі механізму та його складальних одиниць;
- Місце для підвішування кранової установки під час монтажу та ремонту;
- Система драбин і риштувань, необхідних для обслуговування і ремонту механізму та електрообладнання.

Широко застосовуються різні способи електроприводу кранів, в тому числі тиристорне керування і дистанційне керування по радіо або одному дроту.

Номінальне навантаження бруто – це вага номінального вантажу на гаку або вантажозахоплювальному пристрої, що піднімається вантажопідіймальним механізмом.

Швидкість підйому гака вибирається відповідно до вимог технологічного процесу, в якому задіяна вантажопідіймна машина, характеру робіт, типу машини і її продуктивності.

Режим роботи вантажопідіймних машин – циклічний. Цикл складається з переміщення вантажу по заданій траєкторії і повернення у вихідне положення для нового циклу.

2.4 Загальні відомості про режим використання електроприводів переміщення мостових кранів

У промисловості використовуються трифазні кранові електродвигуни змінного струму (асинхронні) і постійного струму (послідовного або паралельного збудження). Як правило, ці електродвигуни експлуатуються в повторно-короткочасному режимі з широким регулюванням швидкості, а їх робота супроводжується великими перевантаженнями, частими пусками, реверсуванням і гальмуванням. Крім того, електродвигуни в кранових механізмах працюють в умовах сильної тряски і вібрації. На багатьох металургійних підприємствах вони також піддаються впливу високих температур (до +60...+70°C), пари і газів.

У зв'язку з цим електродвигуни для кранів відрізняються від загальнопромислових двигунів за техніко-економічними показниками і характеристиками.

Основні особливості кранових двигунів:

- Конструкція корпусу герметична;
- Використовуються ізоляційні матеріали термостійких класів F і H;

– Момент інерції ротора підтримується якомога меншим; номінальна швидкість відносно низька, щоб зменшити втрати енергії під час перехідних процесів;

– Магнітний потік відносно великий, щоб забезпечити велику перевантажувальну здатність по крутному моменту;

– Погодинні короточасні значення перевантаження по моменту для кранових двигунів постійного струму коливаються від 2,15 до 5,0; для двигунів змінного струму - від 2,3 до 3,5;

– Відношення максимально допустимої робочої швидкості до номінальної становить від 3,5 до 4,9 для двигунів постійного струму і 2,5 для двигунів змінного струму;

– Для кранових двигунів змінного струму номінальним режимом є ПВ = 40 %, для двигунів постійного струму разом з цим режимом - 60 хвилин (годин). Трифазні асинхронні електродвигуни з фазними роторами найбільш широко застосовуються для приводу кранових механізмів, забезпечуючи регулювання швидкості і плавний пуск при відносно високих навантаженнях на валу. Ці електродвигуни встановлюються в кранових механізмах для середніх, важких і надважких режимів роботи. Пусковий момент можна регулювати в заданих межах, а частоту обертання - в діапазоні від 1:3 до 1:4.

– Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором рідше використовуються для приводу рухомих механізмів на малонавантажених тихохідних кранах через дещо більший пусковий момент і більший пусковий струм, але вони важать приблизно на 8% менше, ніж асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, і коштують в 1,3 рази менше, ніж асинхронні двигуни тієї ж потужності. Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором іноді використовують в L-режимі і C-режимі (для підйомних механізмів). Низька допустима частота комутації і складність схеми регулювання швидкості обмежують їх застосування в кранових механізмах, що працюють в умовах великих навантажень.

– Перевагами асинхронних двигунів у порівнянні з двигунами постійного струму є їх відносно низька вартість і простота в обслуговуванні та ремонті. Маса асинхронного кранового двигуна із зовнішньою самовентиляцією в 2,2...3 рази перевищує масу кранового двигуна постійного струму з таким же номінальним моментом у 5 разів більше маси мідного двигуна, що приблизно в п'ять разів більше маси мідного двигуна відповідно. Якщо для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором експлуатаційні витрати становлять 1 одиницю, то для двигуна з фазним ротором – 5 одиниць, а для двигуна постійного струму – 10 одиниць. Тому асинхронні двигуни є найбільш часто використовуваним електроприводом для кранів (приблизно 90% всіх електродвигунів

Двигуни постійного струму слід використовувати, коли потрібне широке і плавне регулювання швидкості, коли Привод має велику кількість пусків на годину, коли швидкість повинна бути скоригована в бік збільшення від номінальної швидкості, або при роботі в системі Г-Д.

В останні роки розробка компактних і економічних силових напівпровідникових перетворювачів ще більше розширила сферу застосування двигунів змінного струму. Напівпровідникові перетворювачі в повністю керованих силових ключах, таких як тиристори IGCT і силові транзистори IGCT, ще більше розширюють спектр застосування двигунів змінного струму: напівпровідникові перетворювачі в повністю керованих силових ключах, дозволяє використовувати асинхронні двигуни з короткозамкненими роторами повсюдно в кранових установках.

2.5 Вимоги до електроприводів мостових кранів

Електроприводи мостових кранів повинні задовольняти наступним вимогам:

– Електродвигун повинен бути захищений від перевантажень і коротких замикань у силовому та керуючому колах. У разі переривання електроживлення

приводного електродвигуна ланцюг керування повинен автоматично відключатися і не мати можливості самозапуску після відновлення живлення;

– Головний привод підйому повинен бути обладнаний нормально замкнутими контактами, а гальмо повинно автоматично розмикатися при вмиканні двигуна. Якщо частина електричного пристрою гальмівного приводу, що перебуває під напругою, замкнена на головний блок, цей Привод не повинен спрацьовувати мимовільно. Для двигунів змінного струму з керованим перетворювачем механічне гальмо відпускається пропорційно силі струму двигуна, що забезпечує крутний момент, необхідний для утримання кабіни;

– Привод повинен бути реверсивним;

– клас ізоляційного матеріалу обраного типу приводу – F або H;

– Робота приводу в повторно-короткочасному режимі з ПВ = 40 %;

– Прискорення для підйому навантаженого гака не повинно перевищувати $a_{\max} = 0,3 \text{ м/с}^2$;

– Швидкість підйому не повинна перевищувати $V_{\max} = 1,4 \text{ м/с}$;

– Діапазон регулювання приводу підйому $D = 4:1$;

3 ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

3.1 Розрахунок і вибір потужності двигуна

Мостовий кран КМ-50-12,5 призначений для роботи в закритих приміщеннях та на відкритому повітрі, тому вибір потужності двигуна заснований на розрахунку зусиль, створюваних механізмом [5,8,9].

Навантажувальна діаграма, яку повинен виконувати механізм переміщення мостового рану для виконання технічного циклу зображений на рисунку 3.1. Цикл переміщення такий: спочатку приводний двигун переміщення крана переміщує масу кранової конструкції (65 т) без вантажу з вихідного положення протягом часу t_{01} , потім двигун зупиняється на час t_{02} , поки не відбудеться опускання вантажозачіплюючого механізму, причеплення до нього вантажу і підйом механізму з вантажем. Потім протягом часу t_{03} електропривод переміщує кранову конструкцію разом з транспортованим вантажем (65 + 50 т) і переміщається до місця розвантаження, де кран зупиняється на час t_{04} для позиціонування переміщуваного вантажу, його опускання та від'єднання від вантажозачіплюючого механізму. Після цього робочий цикл повторюється.

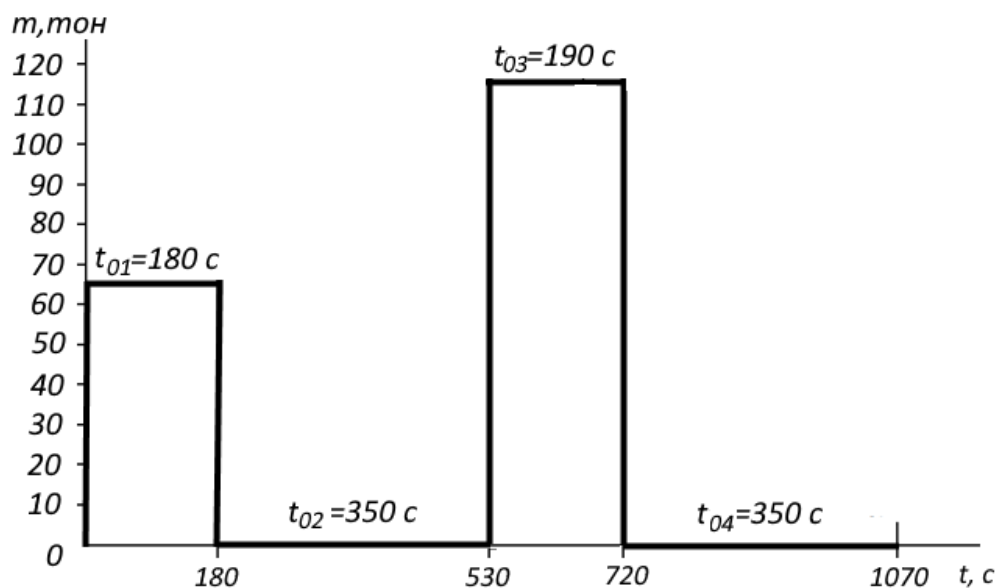


Рисунок 3.1 – Діаграма навантаження мостового крану

На основі діаграми навантаження і відомих довідкових даних розраховуємо потужність електроприводу переміщення крану з використанням програми Mathcad 15:

Вага конструкції крану без вантажу $G_0 := 650000 \text{ Н}$

Діаметр ходового колеса $D := 0.6 \text{ м}$

Вага переміщуваного вантажу $G := 500000 \text{ Н}$

Діаметр цапфи ходового колеса $d := 0.15 \text{ м}$

Коефіцієнт тертя у підшипниках кочення $\mu := 0.01$

ККД передач механізму $\eta_M := 0.88$

Коефіцієнт тертя ковзання $f := 0.0021$

Радіус цапфи ходового колеса $r := \frac{d}{2} = \frac{0.15}{2} = 0.075 \text{ м}$

Коефіцієнт тертя реборд з рейками $K_p := 1.5$

Передатне число редуктора $i_p := 12.5$

Швидкість пересування крану $V := 0.85 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

Радіус ходового колеса $R := \frac{D}{2} = \frac{0.6}{2} = 0.3 \text{ м}$

Передатне число відкритої зубчастої пари $i_{\Pi} := 2.8$

Загальне передатне число механізму $i_M := i_p \cdot i_{\Pi} = 12.5 \cdot 2.8 = 35.0$

Момент статичного навантаження, приведений до валу двигуна при переміщенні вантажу

$$M_{c1} := \frac{K_p \cdot (G_0 + G) \cdot (\mu \cdot r + f)}{i_M \cdot \eta_M} = \frac{1.5 \cdot (650000 + 500000) \cdot (0.01 \cdot 0.075 + 0.0021)}{35 \cdot 0.88} = 159.62 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент статичного навантаження, приведений до валу двигуна без вантажу

$$M_{c2} := \frac{K_p \cdot G_0 \cdot (\mu \cdot r + f)}{i_M \cdot \eta_M} = \frac{1.5 \cdot 650000 \cdot (0.01 \cdot 0.075 + 0.0021)}{35 \cdot 0.88} = 90.22 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахункова кутова швидкість обертання ротора двигуна

$$\omega_p := \frac{i_M \cdot V}{R} = \frac{35 \cdot 0.85}{0.3} = 99.17 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Розрахункова частота обертання ротора двигуна

$$n_p := \frac{60 \cdot \omega_p}{2 \cdot \pi} = \frac{60 \cdot 99.166666666666671}{2 \cdot \pi} = 946.97 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Потужність двигуна при переміщенні крану з вантажем

$$P_1 := M_{c1} \cdot \omega_p \cdot 0.001 = 159.61850649350649 \cdot 99.166666666666671 \cdot 0.001 = 15.83 \text{ кВт}$$

Потужність двигуна при переміщенні крану без вантажа

$$P_2 := M_{c2} \cdot \omega_p \cdot 0.001 = 90.219155844155836 \cdot 99.166666666666671 \cdot 0.001 = 8.95 \text{ кВт}$$

Час руху незавантаженого крану $t_{01} := 180 \text{ с}$

Час стоянки крану при завантаженні $t_{02} := 350 \text{ с}$

Час руху завантаженого крану $t_{03} := 190 \text{ с}$

Час стоянки крану при розвантаженні $t_{04} := 350 \text{ с}$

Тривалість робочого циклу

$$t_{\text{ц}} := t_{01} + t_{02} + t_{03} + t_{04} = 180 + 350 + 190 + 350 = 1070 \text{ с}$$

Тривалість включення двигуна

$$t_p := t_{01} + t_{03} = 180 + 190 = 370 \text{ с}$$

Відносний час включення двигуна

$$\text{ПВ} := \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 = \frac{370}{1070} \cdot 100 = 35 \%$$

Еквівалентна потужність двигуна

$$P_e := \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_{03} + P_2^2 \cdot t_{01}}{t_p}} = 12.95 \text{ кВт}$$

Стандартне значення ПВ: $PВ_{ст} := 40\%$

Розрахункова еквівалентна потужність двигуна

$$P_{ep} := P_e \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} = 12.9461264356709 \cdot \sqrt{\frac{34.579439252336449}{40}} = 12.04 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт запасу за потужністю $K_{зап} := 2$

Необхідна потужність двигуна

$$P_{треб} := K_{зап} \cdot P_{ep} = 24.1 \text{ кВт}$$

Цей кран оснащений двома приводними двигунами, і для спрощення розрахунку, ми вирішили розрахувати момент навантаження, що передається на вал двигуна, якби у крана був тільки один приводний двигун. Таким чином, потужність обраних двигунів визначається як половина від розрахованої вище потужності.

$$P_{дв} = \frac{P_{потр}}{2} = \frac{24,1}{2} = 12,05 \text{ кВт.}$$

За довідниковими джерелами обираємо спеціальний крановий двигун з фазним ротором серії МТФ-312-6У1 з номінальною потужністю 15 кВт при режимі завантаження 25%. Технічні дані двигуна наведені в таблиці 3.1, зовнішній вигляд на рисунку 3.2.

Таблиця 3.1 – Технічні дані асинхронного двигуна з фазним ротором МТФ-312-6У1 [13]

Параметр	Значення
Тип двигуна	МТФ-312-6У1
P_n , кВт	15,0
n_n , об/хв	950
I_c , А	34,7
I_p , А	46
U_c , В	380
U_p , В	210
η_n , %	82
$\cos\varphi_n$	0,78
$J_{ДВ}$, кг·м ²	0,374
M_n , Н·м	156
M_{\max}/M_n	3,0
$M_{\text{пуск}}/M_n$	3,0
$K_{iДВ} = I_{\text{пуск}}/I_n$	4,5
S_n , %	0,05



Рисунок 3.2 – Крановий електродвигун МТФ 312-6

Кранові електродвигуни серії МТФ з фазним ротором призначені для приводу кранових та інших механізмів загального призначення, робота яких характеризується короткочасним і повторно-короткочасним режимами, а також великими кратностями перевантажень.

Електродвигуни серії МТФ характеризуються високою перевантажувальною здатністю, великими пусковими моментами при порівняно невеликих пускових струмах, а також малим часом розгону. Кратність пускових і максимальних моментів по відношенню до номінального становить 2,3...3,5.

Кранові електродвигуни серії МТФ з фазним ротором призначені для приводу кранових та інших механізмів загального призначення, робота яких характеризується короткочасним і повторно-короткочасним режимами, а також великими кратностями перевантажень.

Електродвигуни серії МТФ характеризуються високою перевантажувальною здатністю, великими пусковими моментами при порівняно невеликих пускових струмах, а також малим часом розгону. Кратність пускових і максимальних моментів по відношенню до номінального становить 2,3...3,5.

Структура умовного позначення МТФ Х1Х-Х:

МТФ – кранові двигуни з класом нагрівостійкості ізоляції F (з фазним ротором);

Х – умовна величина зовнішнього діаметра пакета статора (3; 4);

1 – порядковий номер серії;

Х – умовна довжина пакета статора (1; 2);

Х – число полюсів (6; 8; 6/16; 4/24).

Номінальний режим роботи повторно-короткочасний з відносною тривалістю включення, що дорівнює 40%. При роботі електродвигунів в повторно-короткочасному режимі тривалість робочого циклу 10 хв (тривалість включення + пауза) по ГОСТ 18374.

Кранові та металургійні електродвигуни мають однакову конструкцію і відрізняються ізоляцією, обмотувальними даними і лакофарбовими покриттями.

3.2 Розрахунок і вибір перетворювачів частоти

Ми вирішили використовувати перетворювачі частоти для регулювання швидкості обертання двигунів індивідуальних електроприводів крану.

Перетворювач частоти повинен забезпечувати як частоту вихідної напруги, так і можливість регулювання його амплітуди, оскільки напруга між кільцями роторами становить 210 В на відміну від напруги в промисловій мережі. Отже, перетворювач частоти повинен бути оснащений керованим випрямлячем. Також необхідно враховувати тип навантаження електроприводу, який представляє собою постійний момент навантаження, тому для підтримки постійної швидкості необхідно вибрати перетворювач частоти з векторним типом регулювання.

Потужність перетворювача частоти для живлення двигуна може бути визначена за формулою $P_{ПЧ} = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p = \sqrt{3} \cdot 210 \cdot 46 = 16,73 \text{ кВт}$, використовуючи технічні дані двигуна, в роторне коло якого буде вмикатися перетворювач:

Обираємо перетворювач частоти фірми Delta Electronics. Inc. з модельного ряду, який найбільше відповідає потрібній потужності: ПЧ серії C2000 модель VDF022C43A потужністю 22 кВт.

Технічні дані даної моделі перетворювача наведені у таблиці 3.2, загальні характеристики перетворювача частоти Delta Electronics VDF150C30A – в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Технічні дані перетворювача частоти VDF150C30A [14]

Модель		VDF150C30A	
Потужність двигуна, кВт		15	
Вихідні характеристики	Важкий режим	Номінальна вихідна потужність, кВА	24
		Номінальний вихідний струм, А	30
		Несуча частота, кГц	2...6
	Нормальний режим	Номінальна вихідна потужність, кВА	25
		Номінальний вихідний струм, А	32
		Несуча частота, кГц	2...15
Вхідні характ-ки	Вхідний струм для важкого режиму, А	33	
	Вхідний струм для нормального режиму, А	35	

	Номинальна напруга/частота	380/460 В, 3 ф., 50/60 Гц
	Діапазон напруг живлення, В	323...528
	Діапазон частоти живлення, Гц	47...63
	Метод охолодження	Вентилятор
	Гальмівний резистор	Вбудований
	Дросель постійного струму	Опція
	Фільтр ЕМЗ	Вбудований

Таблиця 3.3 – Загальні характеристики перетворювача частоти VDF2000C43A

Характеристики управління	Режими управління	1: V/F, 2: SVC, 3: VF+PG, 4: FOC+PG, 5: TQC+PG
	Пусковий момент	До 150% або вище на 0,5 Гц. В режимі FOC+PG: до 150% на 0 Гц на протязі хвилини.
	Характеристика V/F	Завдання 4-х точок характеристики V/F та квадратична крива
	Полоса пропускання	5 Гц (при векторному управленні до 40 Гц)
	Обмеження моменту	Макс. 200%
	Точність по моменту	±5%
	Макс. вихідна частота, Гц	Нормальний режим: 0,01...600,0 Гц; Важкий режим: 00... 300,0 Гц
	Точність вихідної частоти	Цифрове завдання: ±0,01% при -10°C...+40°C, аналогове завдання: ±0,1% при 25±10 °C
	Розрзнення вих. частоти	Цифрове завдання: 0,01 Гц, аналогове завдання: 0,03 x макс. вих. частота/60 Гц (±11 біт)
	Перевантажувальна здатність	Нормальний режим: 120% номінального струму на протязі 60 секунд Важкий режим: 150% номінального струму на протязі 60 с
	Сигнали завдання частоти	+10...-10 В, 0...+10 В, 4...20 мА, 0...20 мА, імпульсний вхід
	Час розгону/ гальмування	0...600/0...6000 с
	Основні функції управління	Управління моментом, управління натягом, перемикання режимів управління моментом/швидкістю, управління прямою подачею, сервофункція виходу в нуль, підхоплення навантаження, що обертається, і пошук швидкості, обмеження моменту, макс. 17 встановлених швидкостей, перемикач рамп розгону/уповільнення, S-крива розгону/ уповільнення, 3-провідне керування,

		автотестування двигуна (статичне, динамічне), плавний розгін/гальмування, пауза в роботі, компенсація ковзання, компенсація моменту, JOG частота, пропуск частот, гальмування постійним струмом, функція гальмування з високим ковзанням, ПД-регулятор (зі сплячим режимом), функція енергозбереження, MODBUS (RS-485 RJ-45, макс. 115.2 кб/с), автоматичне повторне включення, копіювання параметрів, запис робочих параметрів при відмові
	Управління вбудованим вентилятором охолодження	Моделі 230В VFD150C23A (вкл.) та вище: ШИМ управління; до VFD150C23A (не вкл.): вкл./викл. Моделі 460В VFD150C23A (вкл.) та вище: ШИМ управління; до VFD150C23A (не вкл.): вкл./викл.
Характеристики захисту	Захист двигуна	Електронне теплове реле
	Захист по струму	Миттєве навантаження по струму до 220% від номінального перевантаження по струму Нормальний режим: 170...175%; Важкий режим: 180...185%
	Захист по напрузі	230: привод буде зупинений при напрузі на шині DC вище 410 В 460: привод буде зупинений при напрузі на шині DC вище 820 В
	Захист по температурі	Вбудований датчик температури
	Попередження зупинки	Струмообмеження при розгоні, гальмуванні в режимі, що встановився
	Автоматичний перезапуск після зникнення живлення	Час визначається в параметрах, до 20 сек.
	Захиста від замикання на землю	Рівень струму витоку: 50% від номінального струму ПЧ

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ

4.1 Розрахунок параметрів схеми заїщення і механічних характеристик двигуна

На основі паспортних даних двигунів розраховуємо параметри схеми заміщення двигуна та розраховуємо його природні і штучні механічні характеристики, що будуть використані при моделюванні.

4.1.1 Вихідні дані двигуна МТФ 312-6 15 кВт:

Потужність двигуна $P_{\text{дв.н}} := 15000 \text{ Вт}$

Номинальна напруга $U_{1\text{лн}} := 380 \text{ В}$

Момент інерції двигуна $J_{\text{дв}} := 0.374 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$

Частота напруги живлення $f_{1\text{н}} := 50 \text{ Гц}$

Синхронна частота обертання $n_0 := 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$

Номинальні оберти двигуна $n_{\text{ном}} := 950 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$

Відносний пусковий момент $m_{\text{п}} := 3.$

Відносний критичний момент $m_{\text{к}} := 3.1$

Відносний пусковий струм $k_{\text{і}} := 3.0$

Коефіцієнт корисної дії $\eta := 0.82$

$\cos\varphi := 0.78 \quad \sin\varphi := 0.6258$

Номинальний струм двигуна $I_{\text{ном}} := 46 \text{ А}$

Часткове навантаження $p' := 0.75$

$\cos\varphi_{p'} := 0.695 \quad \eta_{p'} := 0.719$

4.1.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення двигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega_0 := \frac{\pi \cdot n_0}{30} \rightarrow \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104.72 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальна кутова частота обертання

$$\omega_H := \frac{\pi \cdot n_{\text{НОМ}}}{30} \rightarrow \frac{\pi \cdot 950}{30} = 99.48 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Номінальне ковзання

$$s_H := 1 - \frac{n_{\text{НОМ}}}{n_0} \rightarrow 1 - \frac{950}{1000} = 0.05$$

Номінальний момент двигуна

$$M_H := \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_H} \rightarrow \frac{15000}{99.48376736367679} = 150.78 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Номінальні фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} := \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} \rightarrow \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.39 \text{ В}$$

Струм фази статора при частковому завантаженні

$$I_{1\text{фн}} := \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} \rightarrow \frac{15000}{3 \cdot 219.39310229205779 \cdot 0.78 \cdot 0.82} = 35.63 \text{ А}$$

Критичне ковзання

$$S_k := S_i \cdot \frac{\left[m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot S_i \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]} \right]}{1 - 2 \cdot S_i \cdot \beta \cdot (m_k)} = 0.44$$

Струм холостого ходу

$$I_0 := \sqrt{\frac{\left[I_1 p' \right]^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\phi H} \right]^2}{1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2}} = 32.39 \quad \text{A}$$

де чисельник $I_1 p' \right]^2 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \cdot I_{1\phi H} \right]^2 \rightarrow 474.27149827247220907 = 474.2715$

знаменник $1 - \left[\frac{p' \cdot (1 - S_H)}{1 - p' \cdot S_H} \right]^2 \rightarrow 0.45201551695058189883 = 0.45$

Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора

$$C_1 := 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} \right) \rightarrow 1 + \frac{32.39193119342162}{2 \cdot 3.0 \cdot 35.631867112028843} = 1.152$$

$$R'_2 := \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot m_k \cdot P_{дв.н} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{S_k} \right)} \rightarrow 0.33982413000811289514 = 0.3398 \quad \text{Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 := R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0.3913 \quad \text{Ом}$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$\gamma := \sqrt{\left(\frac{1}{S_k} \right)^2 - \beta^2} \rightarrow \sqrt{\left(\frac{1}{0.43984409282489184} \right)^2 - 1^2} = 2.04$$

$$X_{кн} := R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0.799$$

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі

$$X_{1\sigma} := 0.42 \cdot X_{\text{кн}} \rightarrow 0.42 \cdot 0.79898037140282419 = 0.3356 \text{ Ом}$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L_{1\sigma} := \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} \rightarrow \frac{0.33557175598918615}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.0011 \text{ Гн}$$

Приведений до обмотки статора індуктивний опір розсіяння обмотки ротора в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} := 0.58 \cdot \left(\frac{X_{\text{кн}}}{C_1} \right) \rightarrow 0.58 \cdot \frac{0.79898037140282419}{1.1515119929564703} = 0.4024 \text{ Ом}$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння в номінальному режимі

$$L'_{2\sigma} := \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} \rightarrow \frac{0.40243490145843047}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.00128 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір контура намагнічування

$$E_1 := \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos\varphi - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin\varphi - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2} = 201.04 \text{ В}$$

$$X_{\mu} := \frac{E_1}{I_0} = 6.2064 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність

$$L_m := \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} \rightarrow \frac{6.2064425915514549}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.0198 \text{ Гн}$$

Результуюче потокозчеплення

$$\psi_{2H} := \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m \rightarrow \sqrt{2} \cdot 32.39193119342162 \cdot 0.019755720349229743 = 0.905$$

Індуктивність обмотки статора

$$L_1 := L_{1\sigma} + L_m \rightarrow 0.0010681580745541262 + 0.019755720349229743 = 0.0208 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора

$$L'_2 := L'_{2\sigma} + L_m \rightarrow 0.0012809900767961802 + 0.019755720349229743 = 0.021 \text{ Гн}$$

$$\sigma := 1 - \frac{L_m^2}{L_1 + L'_2} \rightarrow 1 - \frac{0.019755720349229743^2}{0.02082387842378387 + 0.021036710426025923} = 0.9907$$

Результати розрахунків схеми заміщення наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри схеми заміщення двигуна

$R_1 = 0.3913$ Ом	$X_{1\sigma} = 0.3356$ Ом	$L_{1\sigma} = 0.0011$ Гн	$X_{кн} = 0.799$ Ом	$L_m = 0.0198$ Гн
$R'_2 = 0.3398$ Ом	$X'_{2\sigma} = 0.4024$ Ом	$L'_{2\sigma} = 0.0013$ Гн	$X_\mu = 6.2064$ М	$\eta = 0.82$

4.1.3 Побудова сімейства електромеханічних характеристик двигуна

Електромагнітний момент на валу двигуна

$$M'' := \left(\frac{3}{2}\right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_{2\sigma}}\right) \cdot \psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\phi H}^2 - I_0^2} = 107.06 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M' := \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_H \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = 178.56 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M'' := \left(\frac{3}{2}\right) \cdot 4 \cdot \left(\frac{L_m}{L_m + L'_2 \sigma}\right) \cdot \psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\Phi H}^2 - I_0^2} = 107.06 \quad \text{Н}\cdot\text{м}$$

Задаємо діапазон та крок зміни ковзання

$$s := 0.00001, 0.01 .. 1$$

$$n(s) := n_0 \cdot (1 - s)$$

Залежність моменту від швидкості для постійного типу навантаження

$$M(n) := M_H$$

Задаємо діапазон та крок зміни швидкості

$$n := 0, 100 .. 1200$$

Залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання

$$n_1(s, f_1) := n_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot (1 - s)$$

Механічний електромагнітний момент двигуна

$$M_{эм}(s, f_1) := \frac{3 \cdot \left(U_{1\Phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right) \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1}\right)^2 \right]}$$

Графіки штучних механічних характеристик та характеристики навантаження від мостового крану наведені на рисунку 4.1.

Аналізуючи отримані механічні характеристики двигуна, можна зробити висновок, що двигун має достатній пусковий момент при запуску з місця, що

перевищує момент навантаження, який подається на вал на всіх частотах регулювання. Таким чином, можна зробити висновок, що двигуном можна керувати в діапазоні частот 0...50 Гц.

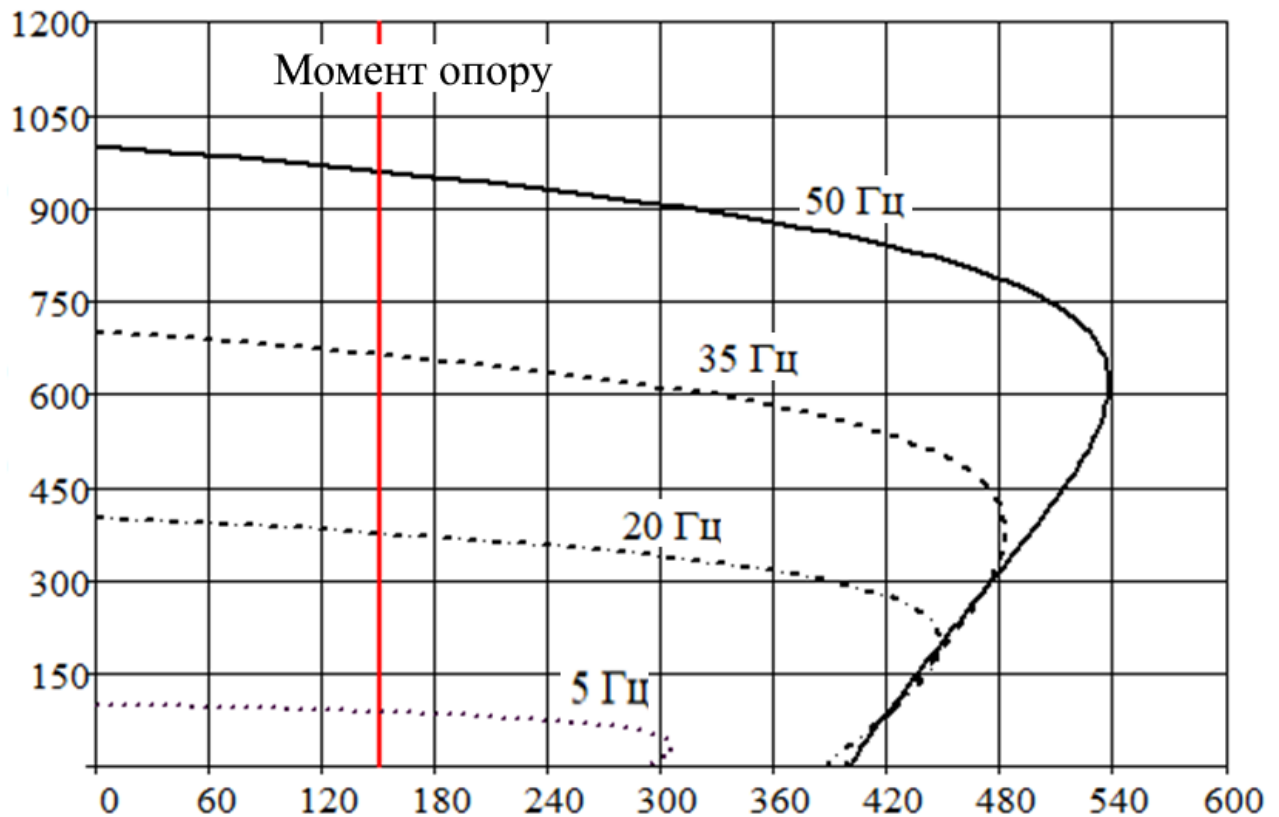


Рисунок 4.1 – Природна та штучні механічні характеристики електродвигуна МТФ 312-6 15 кВт

Також для обраного двигуна, який працює синхронно з двигуном другого такого ж механізму переміщення мостового крану, можна побудувати залежності, наведені в загальному вигляді в розділі 3.

$$M_1(\theta) = \frac{M_{\max}}{\left(\frac{s}{s_k}\right) + \left(\frac{s_k}{s}\right)} \cdot (1 - \cos(\theta))$$

$$M_2(\theta, s) = \frac{M_{\max}}{\left(\frac{s}{s_k}\right) + \left(\frac{s_k}{s}\right)} \cdot \left(1 - \cos(\theta) + \frac{s}{s_k} \cdot \sin(\theta)\right).$$

Як видно з наведених на рисунку залежностей, криві врівноважувачих моментів двигунів знаходяться в протилежних фазах і, отже, вони будуть допомагати один одному в разі нерівномірності навантаження.

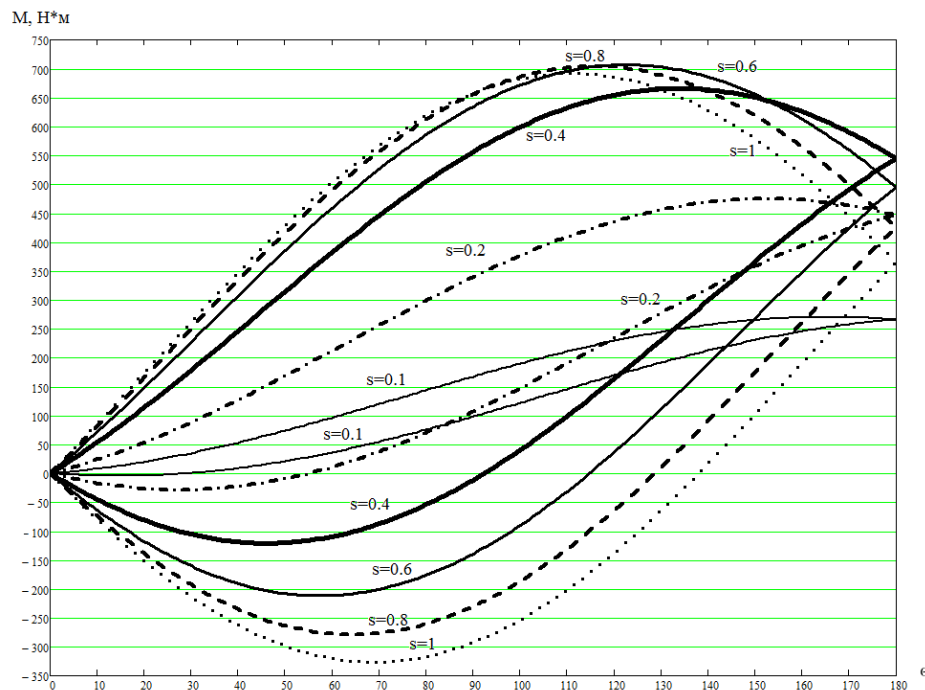


Рисунок 4.2 – Залежності моментів двигунів від кута непогодження θ при ковзаннях s від 0 до 1

Чим більше значення моменту, тим більше кут неузгодженості, який викликає цей момент і врівноважувачий струм. Крім того, більш високі значення крутного моменту відповідають більш високим значенням ковзання, що означає, що на більш низьких швидкостях система може балансуватись при більш високих значеннях нерівностей моментів навантаження і більших кутах непогодження.

4.2 Розробка автоматичної системи синхронізації обертів електроприводів переміщення мостового крану

Як показано в розділі 3, при деяких відмінностях в параметрах однотипних двигунів механізму переміщення мостового крану, або різних моментів опору візків механізму переміщення при переміщенні вантажу до краю моста, або при

наявності різниці в діаметрах приводних коліс тощо спостерігається неоднакові швидкості правого і лівого візка механізму переміщення. При значних відмінностях швидкостей збільшується кут перекосу моста, що може призвести до аварійної ситуації. Одним з варіантів модернізації системи управління приводами механізму переміщення є використання загального перетворювача частоти для живлення двох електродвигунів (рисунок 4.3). Це дозволяє відмовитись від контакторної системи керування двигунами, але не усуває її недоліки.

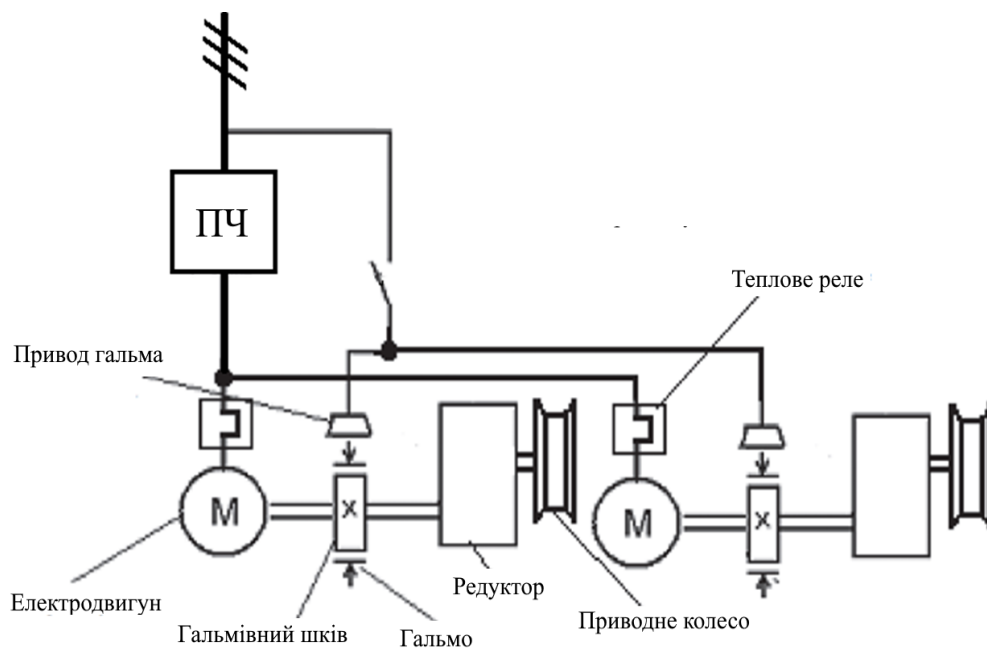


Рисунок 4.3 – Схема керування асинхронними двигунами одним частотним перетворювачем

Розглянемо систему управління з синхронізованими за швидкістю електроприводами (рисунок 4.4). В такій підпорядкованій системі керування кожний електродвигун повинен бути обладнаний датчиком швидкості обертання двигуна з імпульсним виходом – енкодером. Крім того, перетворювачі частоти в своєму складі повинні мати відповідні плати розширення для прийому і передачі імпульсних сигналів за швидкістю двигунів. При відхиленні обертів веденого двигуна його перетворювач частоти змінює частоту і амплітуду напруги живлення

до відновлення однаковості обертів обох двигунів. Неоднаковість в діаметрах приводних коліс може враховуватися в налаштуваннях перетворювача.

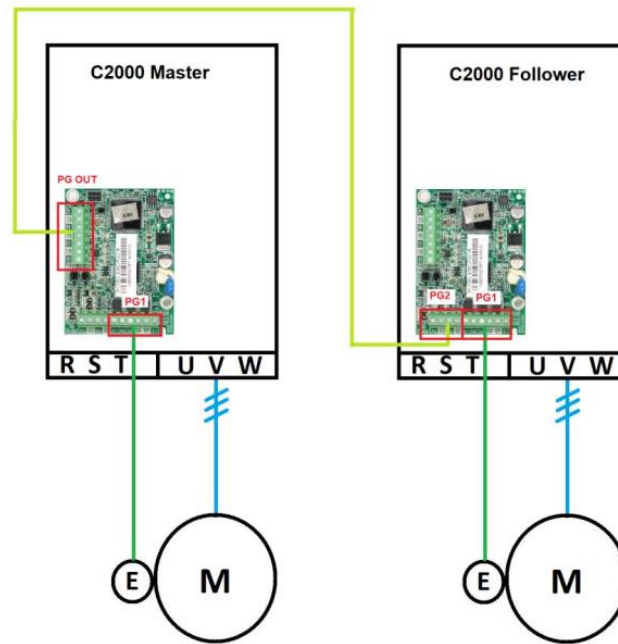


Рисунок 4.4 – Схема з'єднання перетворювачів частоти в режимі «провідний-ведений»

4.3 Розробка електронних моделей електроприводу в середовищі Matlab-Simulink та результати досліджень

Для дослідження перехідних процесів в механізмі переміщення мостового крану в Simulink-моделі використовуються два однакових блоків моделей асинхронних двигуна з фазним ротором *Asynchronous Machine SI Units 1* та *2*. В цілому досліджувана Simulink-модель складається з блоку трифазного джерела живлення *Three-Phase Source*, що генерує трифазну напругу живлення, двох двигунів з фазними роторами *Asynchronous Machine SI Units 1* та *2*, блоків моделювання перетворювачів частоти, один з яких є провідним, другий – веденим, блоку вимірювання параметрів двигунів та осцилографів *Scope1* та *Scope2* для візуалізації перехідних процесів. Досліджувана модель синхронізованого електроприводу подана на рисунку 4.5.

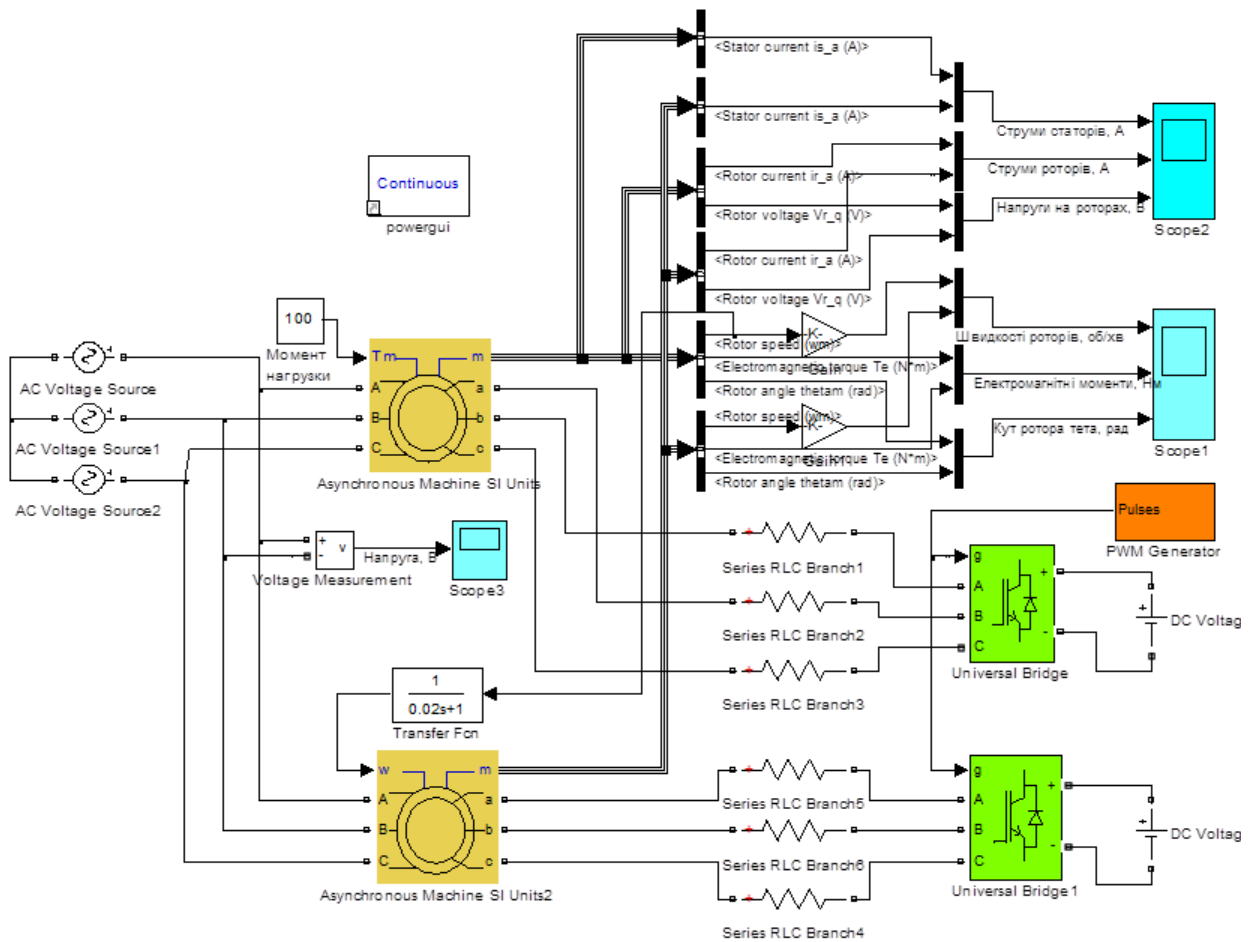


Рисунок 4.5 – Модель синхронізованого електроприводу в *Matlab-Simulink*

Сигнал за швидкістю провідного двигуна з виходу блоку *Asynchronous Machine SI Units 1* надходить на вхід ω підпорядкованого двигуна *Asynchronous Machine SI Units 2*, імітуючи поточне завдання перетворювачу частоти. Сигнал від датчика швидкості проходить через інерційну ланку, параметри якої відповідають деякому запізненню проходження сигналу через ведений перетворювач.

Для моделювання ми встановили умову, що перший двигун працює з номінальним навантаженням (100 Н·м), а другий недовантажений (60 Н·м).

При значній інерційності зворотного зв'язку спостерігається деяка відмінність кривих розгону двигунів, але після закінчення перехідних процесів швидкості стають однаковими і кут розбіжності положень приводних коліс θ стабілізується (рисунок 4.6).

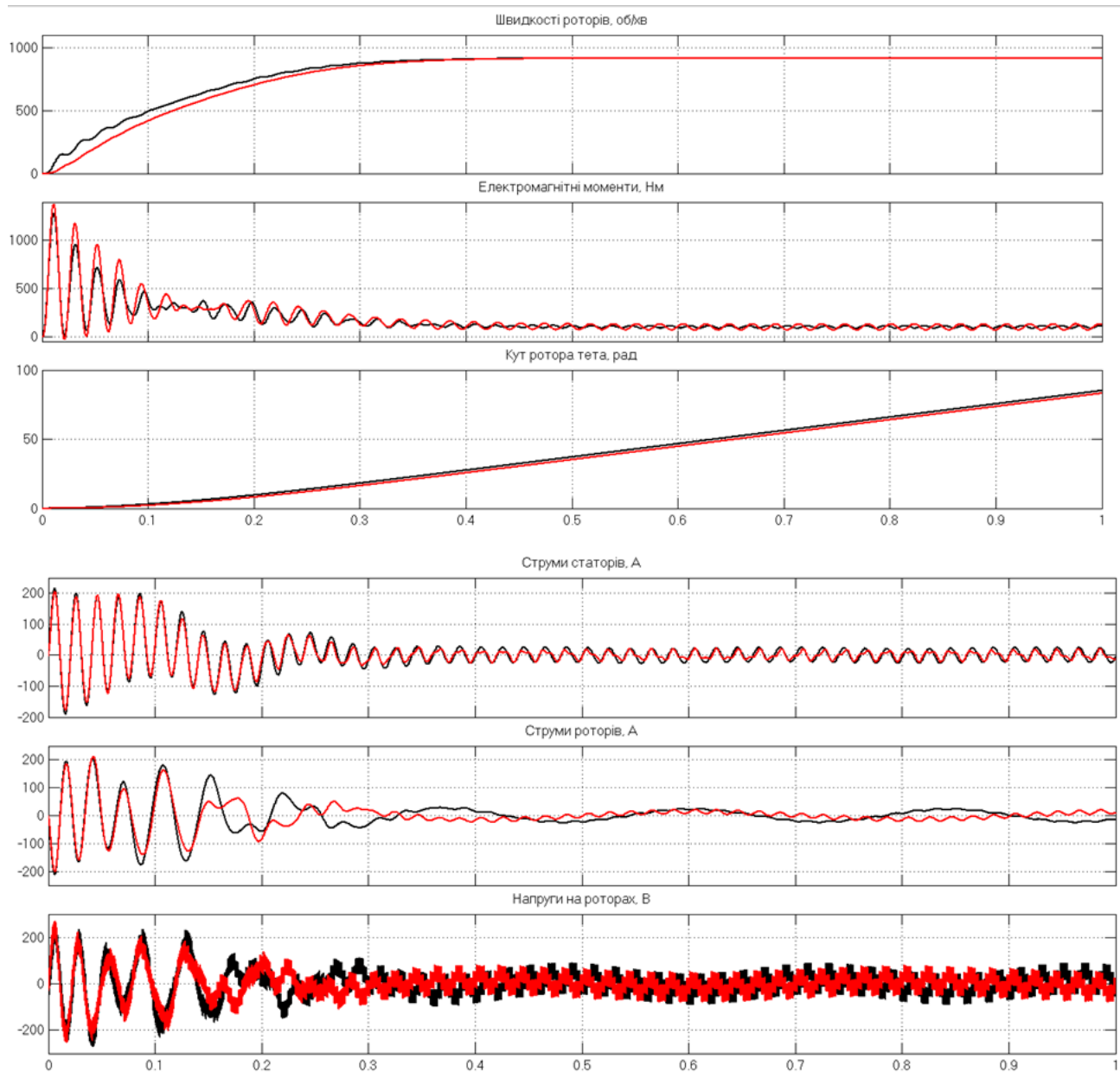


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси при нерівномірному завантаженні електроприводів 100 Н·м і 60 Н·м та ідентичних двигунах

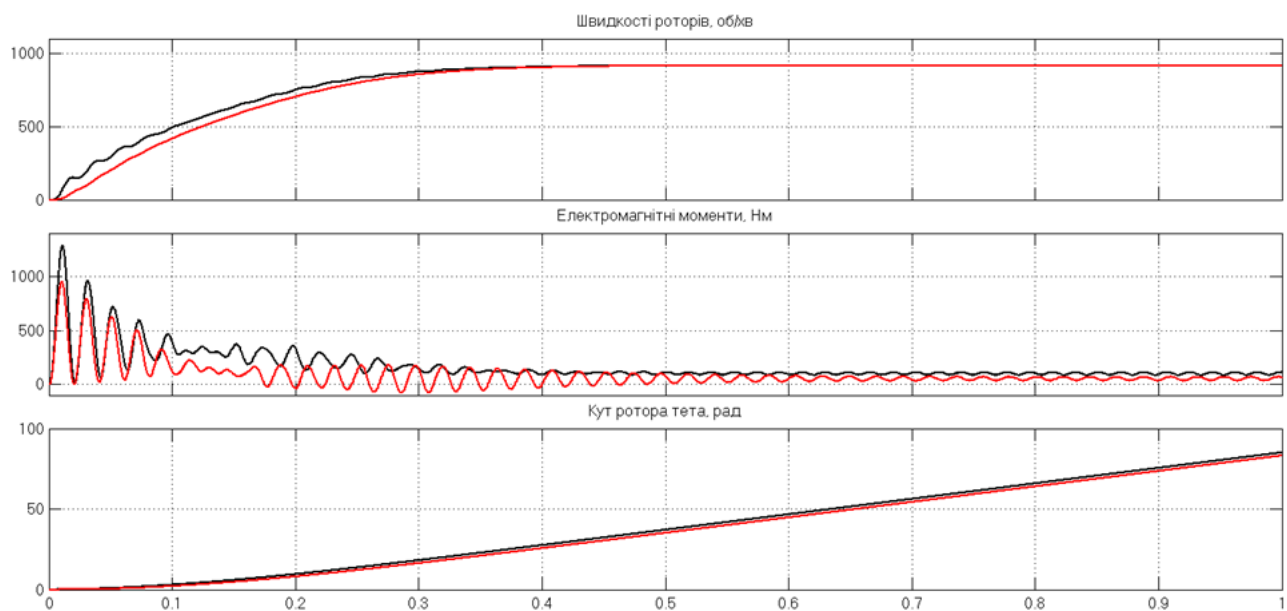


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси при нерівномірному завантаженні електроприводів 100 Н·м і 60 Н·м та різних параметрах електродвигунів

Як видно з графіків перехідних процесів, спочатку існують деякі відмінності між частотою обертання двигуна, кожна з яких викликає обертання ротора двигуна під різними кутами через нерівномірне навантаження також відбувається зміщення ЕРС ротора.

Як видно з графіків зміни швидкостей, вони вирівнюються в кінці кривої розгону і відповідають швидкості провідного приводу.

Таким чином, синхронізовані перетворювачі частоти дають можливість з високою точністю вирівнювати швидкості двигунів правого і лівого візків механізму переміщення крану, не тільки збільшити надійність та безпеку його роботи, але і знизити споживання електроенергії на 20...30 %.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розрахунок витрат при використанні існуючого електроприводу насосу

Велика частина діючих мостових кранів мають застарілу контакторну систему управління електроприводами механізмів переміщення крана, переміщення вантажного візка і підйомного механізму і потребують їх модернізації.

Необхідність модернізації електроприводу механізму переміщення мостового крану полягає в заміні асинхронного приводу прямого пуску на енергозберігаючий частотно-регульований.

Така заміна може вирішити ряд проблем:

- 1) Зменшення споживання електроенергії;
- 2) Зменшення об'ємів ремонтних та налагоджувальних робіт;
- 3) Зниження експлуатаційних витрат;
- 4) Збільшення надійності і продуктивності крана.

Модернізація електроприводу механізму переміщення мостового крану полягає у використанні сучасних частотних перетворювачів, які дозволяють плавно регулювати швидкість електроприводу, покращуючи таким чином продуктивність та економічність роботи мостового крану..

Річне споживання електроенергії Q_{E1} , кВт-год при роботі електроприводів переміщення крану з нерегульованим електроприводом:

$$Q_{E1} = F_{до} \cdot k_3 \cdot P_{CP1}, \quad (5.1)$$

де k_3 – коефіцієнт завантаження устаткування за часом, $k_3 = 0,75$;

P_{CP1} – середня потужність, споживана двома електроприводами переміщення крану, приймається $P_{CP1} = 24$ кВт;

$F_{до}$ – дійсний час роботи обладнання, год.

Дійсний час роботи обладнання $F_{до}$, год:

$$F_{до} = F_H \cdot (1 - (a_p + a_R)), \quad (5.2)$$

де a_p – коефіцієнт, що не враховує втрати часу;

a_H – коефіцієнт, що враховує втрати часу на налагодження та регулювання обладнання протягом робочої зміни; $a_H = 0,07$;

F_H – номінальний час роботи h електроприводу.

Номінальний час роботи електроприводу F_H , год

$$F_H = \Phi_{см} \cdot F_{см} \cdot F_{р.д}, \quad (5.3)$$

де $\Phi_{см}$ – тривалість зміни, $\Phi_{см} = 12$ год;

$F_{см}$ – число змін у добі, $F_{см} = 2$;

$F_{р.д.}$ – робочих днів у році, приймається, з урахуванням простою на ремонт $F_{р.д.} = 335$ днів.

$$F_H = 12 \cdot 335 = 8040 \text{ год},$$

$$F_{до} = 8040 \cdot (1 - (0 + 0,07)) = 7477 \text{ год},$$

$$Q_{E1} = 7477 \cdot 0,75 \cdot 24 = 134589 \text{ кВт/год}.$$

Річні витрати на електроенергію C_{E1} , грн/год

$$C_{E1} = Q_{E1} \cdot Ц, \quad (5.4)$$

де $Ц$ – ціна 1 кВт електроенергії, приймаємо $Ц = 2,74$ грн.

$$C_{E1} = 134589 \cdot 2,74 = 368775 \text{ грн/рік}.$$

Витрати на електроенергію для роботи механізму переміщення крану з некерованим електроприводом становлять 368775 грн/рік.

5.2 Розрахунок витрат у проектному варіанті (з ПЧ-АД)

Річне споживання електроенергії після модернізації Q_{E2} , кВт-год:

$$Q_{E2} = F_{ДО} \cdot k_3 \cdot P_{CP2}, \quad (5.5)$$

де P_{cp2} – середня потужність, споживана електродвигуном механізма, приймаємо $P_{cp2} = 20,5$ кВт.

$$Q_{E2} = 7477 \cdot 0,75 \cdot 20,5 = 114962 \text{ кВт/ч}$$

Річні витрати на електроенергію після модернізації C_{E2} , грн/рік

$$C_{E2} = Q_{E2} \cdot Ц, \quad (5.6)$$

$$C_{E2} = 114962 \cdot 2,74 = 314995 \text{ грн/рік.}$$

Розрахуємо інвестиції у виробниче обладнання, якщо будуть встановлені приводи з регульованою швидкістю.

Вартість основних фондів K_{TC} розраховується за формулою

$$K_{TC} = \sum_{i=1}^m N_i \cdot Ц_i + C_{mp}, \quad (5.7)$$

де m – число типів технічних засобів; $m = 3$;

$N_1 = N_2 = N_3 = 2$ частотних перетворювачів та 2 електродвигунів;

$Ц_1$ – ціна частотного перетворювача, грн., $Ц_1 = 19830$ грн;

$Ц_3$ – ціна електродвигуна, грн., $Ц_3 = 34560$ грн;

C_{mp} – транспортні витрати, грн., 10 % від вартості технічних засобів.

Транспортні витрати C_{mp} , грн.

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (N_1 \cdot Ц_1 + N_2 \cdot Ц_2), \quad (5.8)$$

$$C_{mc} = 0,1 \cdot (2 \cdot 19830 + 2 \cdot 34560) = 10878 \text{ грн.}$$

$$K_{TC} = 2 \cdot 19830 + 2 \cdot 34560 + 10878 = 119658 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжне обладнання K_{bc} , грн:

$$K_{bc} = 0,1 \cdot K_{TC}, \quad (5.9)$$

$$K_{bc} = 0,1 \cdot 119658 = 11965,8 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж і налагодження технічних засобів K_{mh} , грн:

$$K_{mh} = \frac{K_{mc} \cdot 50}{100}, \quad (5.10)$$

$$K_{mh} = \frac{119658 \cdot 50}{100} = 59829 \text{ грн.} \quad (5.11)$$

Капітальні вкладення K , грн:

$$K = K_{TC} + K_{bc} + K_{mh}, \quad (5.12)$$

$$K = 119658 + 11965 + 59829 = 191452 \text{ грн}$$

Витрати на електроенергію при роботі механізму переміщення крану з регульованим електроприводом $C_{E2} = 209997$ грн/рік.

Економічний ефект:

Наведені витрати Z_i , грн

$$Z_i = C_i + E_i \cdot \Sigma K_i, \quad (5.13)$$

де C_i – річні витрати на підготовку виробництва, грн;

E_i – коефіцієнт економічної ефективності, $E_i = 0,15$;

K_i – капітальні вкладення на підготовку виробництва, грн.

Для існуючих електроприводів механізму переміщення крану без частотних перетворювачів:

$$Z_1 = 368775 + 0,15 \cdot (191452 - 34560) = 392309 \text{ грн.}$$

Для проектного варіанту:

$$Z_2 = 314995 + 0,15 \cdot 191453 = 343713 \text{ грн}$$

Економічний ефект, грн:

$$E = Z_1 - Z_2, \quad (5.14)$$

$$E = 392309 - 343713 = 48595 \text{ грн.}$$

Термін окупності $T_{ок}$, років

$$T_{ок} = \frac{\Sigma K}{E}, \quad (5.15)$$

де ΣK – капітальні вкладення, грн.

$$T_{ок} = \frac{191453}{48595} = 3,9 \text{ рік}$$

Дані економічних розрахунків наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Зведені дані економічних розрахунків

Показники	Одиниця виміру	Діюча схема	Проектна схема
Капітальні вкладення	Грн.	–	191453
Витрати на електричну енергію	Грн/рік	368775	314995
Наведені витрати	Грн/рік	393309	343713
Економічний ефект	Грн/рік	48596	
Термін окупності	Рік	3,9	

Висновок: Економічний ефект від модернізації електроприводу переміщення мостового крану становить 48596 грн на рік, а термін окупності проекту – 3,9 роки, що відповідає нормативам. Згідно з планом проекту, витрати на електроенергію скоротяться на 25%, а вищевказані витрати – на 26%.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ ЗА ПРИЙНЯТИМИ В РОБОТІ РІШЕННЯМИ

В даній кваліфікаційній роботі був досліджений модернізований електропривод механізму переміщення мостового крану. Розрахована загальна потужність, споживана двигунами механізму, склала $P_{\text{вент}} = 24,1$ кВт. Відповідно до розрахунку вибрані два асинхронні двигуни з фазним ротором марки МТФ-312-6У1 кожний потужністю по 15 кВт.

Для здійснення частотного способу підпорядкованого (синхронізованого) регулювання обертів двигунів візків переміщення крану були обрані частотний перетворювач фірми Delta Industrial Automation EMEA – VFD C2000, розрахований на потужність двигуна 15 кВт.

Розраховані параметри схеми заміщення двигунів, розроблені математична модель автоматизованого електроприводу. Моделювання в пакеті Matlab-Simulink показало, що в підпорядкованій системі оберти двох двигунів привода підтримуються однаковими з високою точністю.

Економічний ефект від модернізації електроприводу переміщення мостового крану становить 48596 грн на рік, а термін окупності проекту – 3,9 роки, що відповідає нормативам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Н. Лой, П.А. Протас, Г.И. Завойских. Лесоскладское грузоподъемное оборудование. – Минск, БГТУ, 2005. с. 8-14.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов – 2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
3. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов.- 6-е изд, доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPoweSystems и Simulink. – М.: ДКМ Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
6. Сандлер А.С. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. – М. : Энергия. 1966. – 320 с.
7. Усманходжаев И.М. Система согласованного вращения асинхронных двигателей./ И.М. Усманходжаев, П.И.Сагитов // Электротехника, 1976. №2. – С. 46-51.
8. Унгру С. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей./ С. Унгру, Г. Иордан // Д.: Энергия, 1971. – 182 с.
9. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с., ил.
10. С.В. Гаврилова, А.В. Доманов, В.И. Доманов. Системы согласованного вращения асинхронных двигателей. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 17, №2(4), 2015.
11. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістрів спеціальності 141 / Укладачі: Бабіч В.Ф., Осадчук П.І., Галіулін А.А., Штепа Є.П. – Одеса: ОНАХТ, 2021 р. – 56 с.
12. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

13. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

14. <https://prom.ua/p7229115-elektrodivigatel-kranovyj-mtf.html>

15. https://chastotnik.ua/preobrasovateli/Delta_Electronics

16. <https://kzpto.com.ua/uk/mostovi-krani/>