

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики

(інститут)

Електротехнічний факультет

(факультет)

Кафедра електропривода

(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магіста

(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Білоконь Андрій Олександрович

(ПІБ)

академічної групи 141М-21-4

(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації¹ _____

за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(офіційна назва)

на тему Електропривод механізму підйому мостового підйомного крана науково виробничого об'єднання «Дніпрофмаш».

(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Садовой О.В.			
розділів:				
Технологічна частина	Садовой О.В.			
Автоматизований електропривод	Садовой О.В.			
Дослідження динаміки електропривода	Садовой О.В.			
Автоматизація технологічного процесу	Садовой О.В.			
Техніко-економічне обґрунтування	Тимошенко Л.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Садовой О.В.			

Дніпро
20 22

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри
електропривода
_____ (повна назва)

_____ Худолій С.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу**

ступеня магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студенту Білоконь А.О. **академічної групи** 141М-21-4
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації _____
за освітньо-професійною програмою Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(офіційна назва)

на тему Електропривод механізму підйому мостового підйомного крана науково виробничого об'єднання «Дніпрофмаш».

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 13.09.2022 № 918-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Технологічна частина	Коротка технічна характеристика мостового крана	1 місяць
Автоматизований електропривод	Формулювання вимог до автоматизованого електроприводу і системи автоматизації	1 місяць
Дослідження динаміки електропривода	Математична модель Графіки отриманих перехідних процесів після моделювання в Matlab	1 місяць
Автоматизація технологічного процесу	Спостерігач потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронної машини	1 місяць
Техніко-економічне обґрунтування	Визначення та аналіз показників економічної ефективності	1 місяць

Завдання видано _____ Садовой О.В.
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі 15 жовтня 2022

Дата подання до екзаменаційної комісії 13.12.2022

Прийнято до виконання _____ Білоконь А.О.
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Технологічна частина	
1.1 Коротка технічна характеристика мостового крана	7
1.2 Кінематична схема механізму підйому мостового крана	10
2 Автоматизований електропривод	
2.1 Умови роботи і вимоги, що пред'являються до електроприводу мостового крана	12
2.2 Сучасні кранові електроприводи, обґрунтування і вибір	13
2.3 Формулювання вимог до автоматизованого електроприводу і системи автоматизації	18
2.4 Вихідні дані і постановка задачі	19
2.5 Вибір електродвигуна і визначення параметрів схеми	
Заміщення	20
2.6 Перетворення рівнянь асинхронної машини	25
3 Дослідження динаміки електропривода	
3.3 Математична модель	34
3.4 Графіки отриманих перехідних процесів після моделювання в Matlab	36
4 Автоматизація технологічного процесу	
4.1 Спостерігач потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронної машини	40
5 Техніко-економічне обґрунтування	
Вступ	44
5.1 Розрахунок капітальних витрат	45
5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат	46
5.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань	47
5.4 Розрахунок річного фонду заробітної плати	47
5.5 Визначення річних витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт	47

5.6 Розрахунок вартості спожитої електроенергії	49
5.7 Визначення інших витрат	49
5.8 Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення	49
5.9 Визначення та аналіз показників економічної ефективності	49
5.10 Висновки з техніко економічного обґрунтування	52
Висновки	53
Перелік джерел посилання	54

РЕФЕРАТ

Дана кваліфікаційна робота складається з 55 сторінок, 13 рисунків, 9 таблиць та 15 джерел.

Завдання полягає в тому, щоб замінити старе обладнання на нове і дослідити систему векторного керування асинхронного двигуна.

Мостові крани являються механізмами циклічної дії, також повинні відповідати певним критеріям надійності, тому електропривод в даній роботі розглядається як електропривод мостового крану. Через, що до нього є певні вимоги щодо роботи та надійності, бо на промисловості він працюватиме досить інтенсивно через своє призначення.

Заміна застарілого обладнання, доцільно через економічні цілі, бо через плавне керування є можливість досягти економії електроенергії та на капітальних витратах.

ВСТУП

У даній кваліфікаційній роботі замінюється застаріле обладнання релейно – контакторного керування з пусковими реостатами на частотний перетворювач з векторною системою керування.

Завдання полягає у тому, щоб розробити систему векторного керування, при якій електропривод мостового крану буде правильно відпрацьовувати роботу з переміщенням вантажу.

Також дізнатися кількість зекономлених коштів на використанні електроенергії і на капітальному ремонті.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Коротка технічна характеристика мостового крана

На промисловості крани розглядаються як вантажопідйомні механізми, які працюють циклічно, призначені для вертикального і горизонтального переміщення вантажів на великі відстані. За конструкцією, крани діляться на порталні, мостові, баштові, козлові і ін. На підприємствах в цехах електромашинобудування максимальне поширення отримали мостові крани, які здійснюють опускання і підйом важких заготовок, вузлів машин і деталей, а також їх переміщення вздовж і поперек цеху. Тип мостового крана визначається в основному специфікою цеху і його технологічним процесом, однак багато механізмів кранового обладнання, наприклад механізми пересування і підйому, для різних різновидів кранів виконуються однотипними [2].

Універсальні вантажопідйомні машини виготовляються з урахуванням різних умов використання по навантаженню і часу роботи, інтенсивності проведення операцій, ступеня відповідальності операцій і в зв'язку з цим можуть бути додатково віднесені до декількох усереднених категорій використання [3].

Механізми для виконання певних технологічних операцій, а також механізми для епізодичній роботі мають цілком певні умови використання відповідно до їх призначення. З метою систематизації усього розмаїття режимів роботи вантажопідйомних машин Держтехнагляд встановив наступні категорії режимів роботи механізмів з машинним приводом: легкий - Л; середній - С; важкий - В; вельми важкий - ВВ.

Ряд кранів, призначених для технологічних комплексів, останнім часом проектується для використання при більш складних режимах роботи електроприводу в порівнянні з режимом ВВ, визначеним чинною класифікацією Держгіртехнагляду. Цей режим характеризується тривалістю включення до $TB = 100\%$ при числі включень в годину 600 і вище. Для цих випадків вводиться нова категорія режиму: особливо важкий - ОВ. В даний час

існує стандарт, який передбачає п'ять категорій режимів, включаючи режим ОВ [2].

На кранах використовують електродвигуни, регульовальні і пускові опори, контролери, гальмові електромагніти, захисну, пускорегулюючу, блокувальну, сигнальну і освітлювальну апаратуру, кінцеві вимикачі, струмозйомники і т.д. Електроживлення на кран подається через тролейні провідники, які нерухомо закріплені на будівельних конструкціях, і струмозйомники, закріплені на крані, або використовують гнучкий кабель шлангового типу. Монтаж всього електротехнічного обладнання, електродвигунів, апаратів і електропроводку кранів проводять у виконанні, що відповідає умовам і параметрам навколишнього середовища [1][2].

Під певний вид вантажів, які транспортуються на мостових кранах, використовують різні вантажозахоплювальні пристрої: магніти, гаки, кліщі, грейфери і т.п. Широке розповсюдження отримали крани з системою підвіски крюка або з підйомним електромагнітом, що використовується для транспортування сталевих листів, стружки та інших феромагнітних матеріалів [2][3].

Мостові крани залежно від призначення і характеру виконуваної роботи забезпечені різними вантажозахоплювальними механізмами: гаками, грейферами, спеціальними захопленнями і т.д. Мостовий кран досить комфортний для застосування, тому що завдяки руху по крановим коліям, що розташовані в найвищій частині цеху, він не займає значної площі [3].

Електропривод основної частини вантажопідіймальних механізмів характеризується повторно – короткочасним режимом роботи при великій частоті вмикання, широким спектром регулювання швидкості і значними перевантаженнями при розгоні і гальмуванні пристроїв. Особливі умови застосування електроприводу в вантажопідійомних машинах стали основою для виробництва особливих серій електричних машин і агрегатів кранової реалізації.

В даний час кранове електричне обладнання має в своєму складі серії кранових електродвигунів змінного і постійного струму, серії силових і магнітних контролерів, командоконтролерів, кнопкових постів, кінцевих вимикачів, гальмових електромагнітів і електрогідравлічних штовхачів, пускогальмівних резисторів і ряд інших агрегатів, пристроїв різних кранових електроприводів [1].

В даний час вантажопідйомні машинки випускаються великою кількістю заводів. Дані машини використовуються в багатьох секторах економіки, господарства в металургії, будівництві, при видобутку корисних копалин, машинобудуванні, транспорті, і в інших секторах економіки. Розвиток машинобудування, яке спеціалізується на створенні вантажопідйомних автомашин, вважається принциповим напрямком становлення народного господарства країни [2].

Мостові крани складаються з несучих частин, що спираються на крановий шлях, і моста, що переміщається по укладеним в стіні або в зовнішніх естакадах рейках (рисунок 1.1). Шляхи укладаються на підкранові балки, які спираються на виступи верхньої частини колони цеху.

Механізм переміщення крана встановлений на мосту крана. Керування всіма механізмами здійснюється з кабіни, закріпленої на мосту крана. Живлення електродвигунів виконується по цеховим троліям. Для підведення електроенергії використовують струмозйомники ковзного типу, прикріплені до металоконструкції крана. У сучасних системах мостових кранів струмопровід виконується за допомогою еластичного кабелю [2].

Привод ходових коліс здійснюється від електродвигуна через редуктор і трансмісійний вал [3].

Вантажопідйомні механізми випускають для різних критеріїв застосування: по ступені завантаження, часу роботи, інтенсивності ведення операцій, ступеня відповідальності вантажопідйомних операцій і погодних факторів експлуатації.

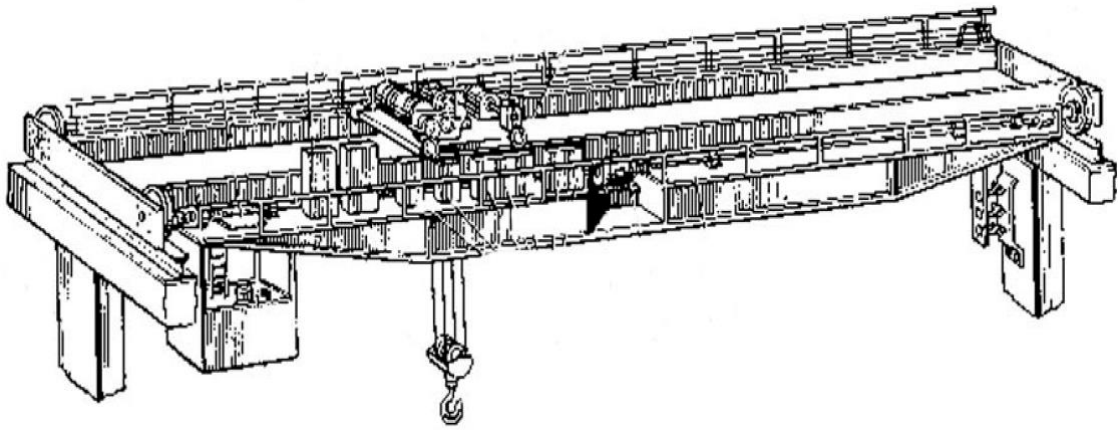


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд мостового крана

1.2 Кінематична схема механізму підйому мостового крана

Роботу головних пристроїв крана оцінюють по кінематичним схемам. Оскільки двигуни зазвичай мають куту швидкість, значно більшу швидкості підйомного барабана або ходових коліс моста, або візка, то механічна енергія до робочих органів крана передається через редуктори [2].

Для пристроїв підйому широке застосування мають схеми з поліспастом П (рисунок 1.2), за допомогою якого переміщення від барабана Б передається гаку .

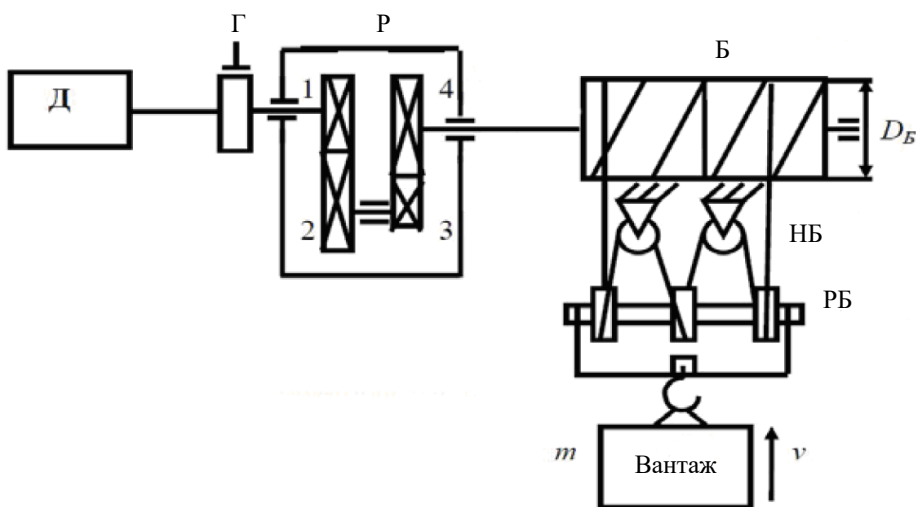


Рисунок 1.2 - Кінематична схема механізму підйому

Двигун Д через редуктор Р приводить в обертання барабан лебідки, на який намотується канат при підйомі і змотується при опусканні вантажу m . Вантажозахватний механізм підвішується на рухомих блоках РБ, які утворюють з нерухомими блоками лебідки НБ поліспаст [3].

Двигун включається в роботу після стропування вантажу, потім вибирається слабина каната. Далі проводиться розгін з прискоренням не вище дозволеного до робочої швидкості і підтримується підйом вантажу. При досягненні цієї висоти двигун гальмується, на вал двигуна накладається гальмо Г. Утримання вантажу в підвішеному стані виконується гальмом [2]. При спуску вантажу підтримується прискорення не вище можливого, Двигун працює в гальмівному режимі. При підході вантажу до майданчика вивантаження швидкість спуску знижується, вантаж плавно опускається на майданчик, гак відкріплюється і цикл роботи повторюється [3].

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

2.1 Умови роботи і вимоги, що пред'являються до електроприводу мостового крана

Підвищена небезпека роботи при переміщенні піднятих вантажів вимагає при розрахунку і експлуатації дотримання неухильних правил при застосуванні експлуатації підйомно-транспортних механізмів. На механізмах підйому і переміщення правилами по застосуванню та експлуатації врахована установка обмежувачів ходу, які працюють на електронну схему керування [1][13].

Кінцеві вимикачі механізму підйому обмежують хід вантажозахоплювального механізму вгору, а вимикачі механізмів переміщення моста і візка обмежують хід пристроїв в дві сторони.

Враховується крім іншого установка остаточних вимикачів, що запобігають наїзду механізмів в разі роботи 2-ох і більше кранів на одному мосту. Виняток становлять установки зі швидкістю переміщення до 30 м/хв. Кранові механізми повинні бути забезпечені гальмівною системою замкнутого типу, що діють при знятті напруги [1][4].

На кранових пристроях дозволяється використовувати робочу напругу до 500 В, тому кранові механізми постачають електричним обладнанням на напруги 220, 380, 500 В змінного струму і 220, 440 В постійного струму. У схемі керування передбачають максимальний захист, який відключає двигун при перевантаженні і короткому замиканні[12]. Нульовий захист ліквідує самозапуск двигунів при подачі напруги в результаті перерви в електропостачанні [4][14].

Для безпечної профілактики електричного обладнання, розташованого на фермі мосту, встановлюють блокувальні контакти на люку і двері кабіни[12]. При відкриванні люка або дверей напруга з електрообладнання знімається. Для якісного здійснення підйому, опускання і руху вантажів

електропривод кранових механізмів повинен відповідати таким основним вимогам:

- регулювання кутової швидкості двигуна у відносно широких межах при переміщенні вантажів зі зниженою швидкістю, а порожній гак або ненавантажений візок - з підвищеною швидкістю для підвищення продуктивності крана. Знижені швидкості потрібні крім іншого для здійснення точної зупинки вантажів, що транспортуються з метою обмеження ударів при їх вивантаженні і спрощують роботу оператора;
- обмеження прискорень до допустимих меж при малій тривалості проміжних операцій.

1-ша умова пов'язана з ослабленням ударів в механічних передачах в момент вибірки зазорів, з попередженням пробуксовки ходових коліс візків і мостів, з обмеженням розгойдування підвішеного на канатах вантажу при розгоні і раптовому гальмуванні механізму переміщення; 2-га умова потрібна для забезпечення підвищеної продуктивності крана [1][5][14].

2.2 Сучасні кранові електроприводи, обґрунтування і вибір

Основне призначення електропривода – регулювання швидкості механізмів підйому і пересування в деякому діапазоні. В першу чергу тип електроприводу залежить від фізичних принципів регулювання швидкості конкретних видів двигунів [1][4][15].

На практиці частіше застосовуються наступні двигуни:

- електродвигуни постійного струму;
- асинхронні двигуни з фазним ротором;
- асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

В таблиці 2.1 наведені переваги і недоліки електродвигунів, що використовуються на кранах.

Таблиця 2.1 - Порівняння двигунів, використовуваних на кранах

	Переваги	Недоліки
Двигуни постійного струму	<ul style="list-style-type: none"> - простота конструкції і принципів керування; - практично лінійні механічні і регулювальні характеристики; - значний пусковий момент. 	<ul style="list-style-type: none"> - дорожня виготовлення; - знос і необхідність профілактичного обслуговування колекторно-щіткових вузлів; - необхідність додатково встановлювати в цеху випрямлячі трифазної напруги.
Асинхронні електродвигуни з фазним ротором	<ul style="list-style-type: none"> - великий початковий крутний момент; - постійна швидкість при різних перевантаженнях; - менший пусковий струм порівняно з електродвигунами з короткозамкненим ротором. 	<ul style="list-style-type: none"> - великі габарити; - дорожня виготовлення; - знос і необхідність профілактичного обслуговування колекторно-щіткових вузлів.
Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором	<ul style="list-style-type: none"> - відносна дешевизна; - відсутність колекторно-щіткових вузлів; - легкість конструкції і простота виготовлення; - високий ККД і $\cos\phi$ порівняно з двигунами з фазним ротором. 	<ul style="list-style-type: none"> - великий пусковий струм (до 5-7 I_n); - складне технічне обладнання для регулювання швидкості обертання.

Двигуни постійного струму набули широкого поширення на важких металургійних виробництвах, в т.ч. на ливарних кранах. В даний час, нові крани з двигунами постійного струму практично не виготовляються [4].

Асинхронні електродвигуни з фазним ротором набули найбільшого поширення на кранах за радянських часів і популярні в наші дні[15]. Двигуни даного типу застосовуються як для реконструкції, так і для нових вантажопідіймальних кранів. Існує безліч різновидів систем керування для двигунів з фазним ротором[12][14]. Зміна швидкості і моменту таких двигунів досягається шляхом включення в коло ротора додаткових електричних пристроїв [1][5]. Залежно від вимог до діапазону регулювання швидкості можуть застосовуватися:

- реостатні системи;
- дросельні системи без регулювання швидкості;
- дросельні системи з тиристорними регуляторами.

В якості комутаційного обладнання в колах статора і ротора можуть застосовуватися:

- силові контактори, пускачі, реверсори (і інші механічні пристрої комутації);
- тиристори (тиристорні ключі);
- IGBT-транзистори;
- гібридні системи.

На сьогоднішній день така система керування морально застаріла і на тлі сучасних мікропроцесорних систем керування мостовими кранами зарубіжних виробників з частотним регулюванням відрізняється підвищеним енергоспоживанням. Явним недоліком такої системи є таке явище, як «надлишковий динамічний момент», який виникає в момент пуску електродвигуна[12]. Це явище породжує ударні навантаження, призводить до передчасного зносу елементів, появи люфтів в трансмісії приводів, зниження

точності позиціювання, підвищеної стомлюваності операторів і, як наслідок, погіршення якості виконуваних вантажопідйомним механізмом робіт [1].

Поточні та капітальні ремонти дадуть ефект лише на кілька місяців, а далі знову «розбиті» елементи трансмісії. Це явище обумовлено специфікою підбору першого ступеня резисторів[13]. У релейно-контакторних системах керування із ступінчастим регулюванням швидкості «надлишкового динамічного моменту» ніяк не уникнути - це технологічна особливість такого приводу, вона полягає в тому, що перша пускова щабель резисторів підбирається таким чином, щоб пусковий момент асинхронного двигуна з фазним ротором дорівнював критичному моменту для стійкості від «перекидання» [14]. Тобто при пуску двигун практично миттєво розвиває максимально-можливий момент, що породжує ударні навантаження, іменовані «динамічним моментом». При проектуванні і виготовленні вантажопідйомного обладнання потужність електродвигунів в 2-3 рази перевищувала фактичні вимоги механізму [4].

Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором мало застосовувалися на кранах за радянських часів в силу технологічної складності регулювання швидкості. Використання обмежувалося легкими тельферними підйомниками, кран-балками та іншими одно-, двошвидкісними тихоходними механізмами [12]. В інших випадках замінити двигуни постійного струму або двигуни з фазним ротором в той час вони не могли [5]. Ситуація змінилася лише з широким розповсюдженням і здешевленням перетворювачів частоти.

Зниження цін на напівпровідникові прилади в кінці 90-их років підштовхнуло кранобудівників до переходу до сучасних систем керування. Починаючи з 2000 року в Україні на нових кранах стали все частіше застосовуватися системи на базі перетворювачів частоти [12]. Перетворювачі частоти дозволяють плавно змінювати величину напруги і частоту на клеммах двигуна, завдяки чому стає можливим керувати швидкістю обертання двигуна, зберігаючи номінальний момент у всьому діапазоні регулювання [1].

Використання асинхронного двигуна на базі перетворювача частоти забезпечить:

- абсолютний контроль і безударне регулювання швидкості, прискорення і моменту при будь-якій масі вантажу (в межах допустимої);
- плавний розгін і гальмування всіх механізмів крана з заданим прискоренням, що забезпечує плавне наростання моментів і зусиль у всіх вузлах і механізмах крана;
- регулювання швидкості АД за допомогою перетворювачів частоти дає економію електроенергії до 20%, електроприводи працюють з $\cos\phi$, близьким до 1;
- програмований логічний контролер, використаний у системах кранового електроприводу, і має зв'язок через мережу з ПЧ, дозволяє вирішити завдання діагностики, статистичного збору та обробки всіх сигналів і навантажень;
- гальмівні колодки не вимагають частої заміни, а гальма - постійного регулювання, оскільки кероване гальмування здійснюють ПЧ, а гальма служать лише для утримання після повної зупинки механізму;
- обмеження моментів як статичних, так і динамічних;
- усунення перекосів і розгойдування вантажів;
- захист електродвигунів (максимально-струмовий, часо-струмовий, тепловий та ін.);
- поліпшення умов роботи оператора крана за рахунок застосування сучасної апаратури керування;
- скорочення кількості релейно-контакторної апаратури дозволяє підвищити надійність роботи електрообладнання та зменшити трудо- витрати на профілактичне обслуговування;
- зменшення динамічних навантажень на механізми крана і збільшення термінів служби обладнання [1].

2.3 Формулювання вимог до автоматизованого електроприводу і системи автоматизації

При виборі структури електроприводу слід враховувати особливості технологічного процесу, вимоги надійності, гнучкості в керуванні, зручності налашки [15]. До електроприводів механізмів підйому мостових кранів, які в більшості випадків керуються оператором, висувуються жорсткі вимоги до простоти їх експлуатації і надійності при забезпеченні необхідного діапазону регулювання швидкості [4]. Діапазон регулювання при підйомі і опусканні номінального вантажу визначається мінімальною швидкістю при посадці вантажів [14]. Величина цього діапазону залежить від технологічного процесу і номінальної вантажопідйомності крана [5]. Так, для кранів вантажопідйомністю понад 20 тон середнього режиму роботи діапазон регулювання $D \geq 20:1$, при цьому при підйомі і опусканні порожнього гака швидкість повинна бути в 1,5-2 рази більше, ніж швидкість при підйомі номінального вантажу [15]. Важливою вимогою для електроприводів зазначеного класу є плавну зміну швидкості в перехідному процесі, що різко знижує ривок і, отже, зменшує амплітуду розгойдування вантажу [4][5].

Для виконання зазначених вимог система керування електроприводом повинна бути напів- або повністю автоматичною, особливо при роботі в перехідних режимах.

Основні вимоги до системи електроприводу мостового крана можна сформулювати так:

1. На перших положеннях контролера підйому двигун повинен розвивати такий пусковий момент, щоб виключалася можливість спуску номінального вантажу при напрузі живильної мережі 90% номінальної і в той же час бажана мінімальна швидкість становила б при найменшому навантаженні не більше 30% номінального значення.

2. При переміщенні рукоятки командоконтролера в напрямку зниження швидкості остання не повинна підвищуватися навіть короткочасно. Це в

першу чергу відноситься до перемикання з першого положення в нульове, коли запізнювання механічного гальмування не повинно призводити до підвищення малій швидкості спуску.

3. Система електричного гальмування повинна мати необхідний запас, що забезпечує надійне уповільнення вантажу, рівне 125% номінального, при напрузі живильної мережі 90% номінальної.

4. Рух вантажу повинен відбуватися тільки в напрямку, що встановлюється командоапаратом, так само при несправності в схемі. В останньому випадку вантаж може залишатися нерухомим.

Істотною вимогою до електроприводу механізму підйому є забезпечення надійного гальмування при дії активного моменту навантаження[13]. При цьому, з метою енергозбереження, доцільно застосовувати рекуперативного гальмування, особливо при потужностях двигунів понад 30 кВт [4][5].

2.4 Вихідні дані і постановка задачі

Вихідними даними проектування є фізичні і геометричні параметри механізму підйому мостового крана. Вихідні дані приведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Вихідні дані проектування

Найменування параметра	Значення параметра
1	2
Тип крана	Кран мостовий опорний
Конструкція кранового моста	Двобалочний мост, балки коробчасті
Вантажопідйомність крана, т	10
Кратність поліспасти, α	3
Номінальна швидкість підйому, м/с	0,1
Номінальна швидкість руху візка, м/с	0,63

Продовження таблиці 2.2

1	2
Діаметр барабана лебідки, м	$90 \cdot 10^{-3}$
Напруга в канаті, тс/см ³	2
Модуль пружності каната, тс/см ²	1500
Тривалість вмикання крана, %	25
Висота пролітної балки, м	2,5

2.5 Вибір електродвигуна і визначення параметрів схеми заміщення

Розрахунок потужності двигуна здійснюється за формулою:

$$P \geq \frac{P_c}{k_T}, \quad (2.1)$$

де P – потужність двигуна, Вт;

P_c – статична потужність електродвигуна, Вт;

$k_T=1$ – коефіцієнт, що ураховує режим роботи механізму, вид керуючого пристрою і електропривода[4].

Статична потужність двигуна розраховується по формулі:

$$P_c = \frac{F_B \cdot V}{\eta_m}, \quad (2.2)$$

де F_B – вантажопідйомна сила, Н;

η_m – ККД підйомного механізму.

Вантажопідйомна сила розраховується по формулі:

$$F_B = m_B \cdot g, \quad (2.3)$$

де $g=9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння,

m_B – номінальна маса вантажу, кг.

$$F_B = 10000 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Статична потужність електродвигуна

$$P_c = \frac{9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{0,9} = 10,9 \text{ кВт.}$$

$$P \geq \frac{10,9 \cdot 10^3}{1} = 10,9 \cdot 10^3 \text{ кВт.}$$

Із довідника обираємо з урахуванням ТВ=25% і потужності $P > 10,9 \text{ кВт}$ електродвигун серії 5А [1]. Технічні дані електродвигуна наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри електродвигуна.

Типо- розмір	$P_{\text{дв.н}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	η , %	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$M_{\text{п}}/$ $M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/$ $I_{\text{ном}}$	$s_{\text{н}}$, %	$J_{\text{дв}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$
5А160S6	11	970	87	0,82	1,9	6,5	3	0,11

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{\text{лн}}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.} \quad (2.4)$$

Номінальна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,03) \cdot 104,7 \text{ рад/с} = 101,6 \text{ рад/с} \quad (2.5)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{101,6} = 108,3 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.6)$$

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний і лінійний струм (діюче значення) статора при схемі з'єднань обмоток зірка:

$$U_{\text{фн}} = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}, \text{ В;} \quad (2.7)$$

$$I_{\text{фн}} = I_{\text{лн}} = I_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{двн}}}{3 \cdot U_{\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,87} = 23,36 \text{ А.} \quad (2.8)$$

Максимальний споживаний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{\text{імакс}} = k_{\text{ідв}} \cdot I_{\text{лн}} = 6,5 \cdot 23,36 = 151,84 \text{ А.} \quad (2.9)$$

Критичний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_k = m_k \cdot M_{двн} = 2,5 \cdot 108,3 = 270,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску:

$$M_{дв пуск} = m_{п} \cdot M_{двн} = 1,9 \cdot 108,3 = 205,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.11)$$

Струм холостого хода двигуна

$$I_0 = I_{лн} \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{лр^*}}{I_{лн}}\right)^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{1 - p^* \cdot s_n}\right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{1 - p^* \cdot s_n}\right]^2}}, \text{ А} \quad (2.12)$$

де

$$I_{лр^*} = \frac{p^* \cdot P_{двн}}{3 \cdot U_{лфн} \cdot (\cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})} = \frac{0,75 \cdot 11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot (0,77 \cdot 0,87)} = 18,66 \text{ А} - \text{ струм фази}$$

статора при частковому завантаженні;

$p^* = 0,75$ - ступінь завантаження;

$\eta_{p^*} = \eta_n = 0,87$ - ККД при частковому завантаженні;

$\cos \varphi_{p^*} = 0,77$ - коефіцієнт потужності в режимі часткового

завантаження.

$$I_0 = 23,362 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{18,66}{23,362}\right)^2 - \left[\frac{0,75(1-0,03)}{1-0,75 \cdot 0,03}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75(1-0,03)}{1-0,75 \cdot 0,03}\right]^2}} = 10,139 \text{ А}.$$

Приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора в номінальному режимі:

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{лф}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot m_k \cdot P_{двн} \cdot C_1^2 \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)}, \text{ Ом} \quad (2.13)$$

де $C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\text{фн}}} = 1 + \frac{10,139}{2 \cdot 6,5 \cdot 23,3} = 1,033$ коефіцієнт, який

характеризує співвідношення $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$;

$$R'_2 = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,03)}{2 \cdot 2,5 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 1,033^2 \left(1 + \frac{1}{0,03}\right)}$$

Критичне ковзання:

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,03 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,159, \quad (2.14)$$

де $\beta=1$ - коефіцієнт, який характеризує співвідношення активних опорів статора і ротора.

Активний опір обмотки статора в номінальному режимі:

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,328 \cdot 1 \cdot 1,033 = 0,339 \text{ Ом.} \quad (2.15)$$

Індуктивний опір короткого замикання в номінальному режимі

$$X_{\text{кн}} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,328 \cdot 6,225 \cdot 1,033 = 3,212 \text{ Ом,} \quad (2.16)$$

де $\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,03}\right)^2 - 1^2} = 6,225$ коефіцієнт, що характеризує

співвідношення індуктивного опору короткого замикання і приведенного активного опору ротора [13].

Індуктивний опір розсіяння обмотки статора в номінальному режимі:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 2,112 = 0,887 \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіяння, в номінальному режимі:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{н}}} = \frac{0,887}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,823 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.18)$$

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

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \frac{2,112}{1,033} = 1,185 \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

Приведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоком розсіяння, в номінальному режимі:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{1,185}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,773 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.20)$$

ЕРС кола намагнічування E_m , наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{фн}} \cdot X_{1\sigma})^2} = \quad (2.21)$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 23,36 \cdot 0,339)^2 + (220 \cdot 0,572 - 23,36 \cdot 0,887)^2} = 202,026 \text{ В.}$$

Тоді індуктивний опір контуру намагнічування

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202,026}{10,139} = 19,92 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Результуюча індуктивність, що обумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{19,925}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,063 \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

Параметри схеми заміщення приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, мГн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, мГн	$X_{\text{кн}}$, Ом
0,229	0,887	2,823	19,925	0,063	0,328	1,185	3,773	2,112

За знайденими параметрами розраховуються значення номінального електромагнітного моменту двигуна

$$M_{\text{ем.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{\text{лфн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{ем.н}}^{**} = \frac{3}{2} Z_{\text{п}} \cdot \frac{L_{\text{м}}}{(L_{\text{м}} + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{лн}}^2 - I_0^2} = 114,975 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.25)$$

де

$$\Psi_{2\text{н}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\text{м}} = \sqrt{2} \cdot 10,139 \cdot 0,063 = 0,909 \text{ ВБ}. \quad (2.26)$$

Виконуються умови:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{ем.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}}$$

$$108,3 < 115,146 \leq 1,1 \cdot 114,975 = 119,12; \text{ --}$$

$$M_{\text{ем.н}}^{**} = 114,975 \approx M_{\text{ем.н}}^* = 115,146.$$

Відповідно попередньо прийняті значення $(\cos \varphi_{\text{п}^*} \cdot \eta_{\text{п}^*})$ і β обрані вірно.

2.6 Перетворення рівнянь асинхронної машини

Істотною перевагою системи координат, орієнтованої по якомусь вектору, є спрощення визначення моменту двигуна змінного струму. Електромагнітний момент електричної машини визначається векторним добутком двох узагальнених векторів електромагнітних величин [14]. Для машини змінного струму зручно використовувати одне із шести сполучень формули визначення моменту [4][5]

$$M = \frac{3}{2} N [\vec{\Psi}_s \times \vec{I}_s], \quad M = -\frac{3}{2} N \frac{L_{\text{м}}}{L_s} [\vec{\Psi}_s \times \vec{I}_r], \quad M = \frac{3}{2} N \frac{L_{\text{м}}}{L_r} [\vec{\Psi}_r \times \vec{I}_s],$$

$$M = -\frac{3}{2} N \frac{L_{\text{м}}}{L_s L_r - L_{\text{м}}^2} [\vec{\Psi}_s \times \vec{\Psi}_r], \quad M = -\frac{3}{2} N [\vec{\Psi}_r \times \vec{I}_r]. \quad (2.27)$$

У несталих процесах вектори $\vec{\Psi}_s$, $\vec{\Psi}_r$, \vec{I}_s , \vec{I}_r змінюються як за модулем, так і за своїм просторовим положенням. Тому для визначення моменту

двигуна як векторного добутку векторів необхідні знання чотирьох параметрів, тобто проєкцій двох векторів на обидві осі [5].

Якщо два вектори, які визначають електромагнітний момент, змінюються за своїм просторовим положенням, у тому числі і відносно один одного, то задача визначення взаємодії цих векторних величин може бути спрощена, якщо зв'язати дійсну вісь координат u з одним з векторів, що бере участь у взаємодії [1][5].

Якщо застосувати зазначений принцип до рівнянь (2.27) і направити дійсну вісь u за одним з векторів $\vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r, \vec{I}_s, \vec{I}_r$, то замість рівнянь (2.27) одержимо ряд нових виразів для моменту, що мають більш простий вигляд – складаються з двох доданків

$$M = \pm k y_u x_v,$$

де $y_u = |\vec{y}|$ – модуль опорного вектора; x_v – проєкція другого вектора, взаємодіючого з першим, на вісь v , перпендикулярну дійсній осі u , та спрямовану у бік випередження.

Тоді одержимо

$$M = \frac{3}{2} N \Psi_{su} I_{sv}, \quad M = -\frac{3}{2} N \frac{L_m}{L_s} \Psi_{su} I_{rv}, \quad M = \frac{3}{2} N \frac{L_m}{L_r} \Psi_{ru} I_{sv},$$

$$M = \frac{3}{2} N \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \Psi_{ru} \Psi_{sv}, \quad M = -\frac{3}{2} N \Psi_{ru} I_{rv}, \quad M = -\frac{3}{2} N L_m I_{su} I_{rv}, \quad (2.28)$$

де N - число пар полюсів.

У результаті застосування системи рухливих координат отримане істотно більш просте визначення моменту двигуна. Електромагнітний момент дорівнює добутку модуля опорного вектора на перпендикулярну йому проєкцію другого взаємодіючого вектора на вісь v . Це має велике значення для синтезу систем автоматичного регулювання ЕП змінного струму [4][5].

Одержимо рівняння АМ в осях, орієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\vec{\Psi}_r$. Перетворення будемо здійснювати над системою

диференціальних рівнянь, записаною у векторній формі, а потім перейдемо до проєкцій.

Вихідні рівняння АМ в осях u, v представлені нижче

$$\begin{aligned}\bar{U}_s &= R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_s; \\ \bar{U}_r &= R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r; \\ \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r; \\ \bar{\Psi}_r &= L_m \bar{I}_s + L_r \bar{I}_r.\end{aligned}\quad (2.29)$$

1) Виразимо струм \bar{I}_r через потокозчеплення $\bar{\Psi}_r$ і підставимо в рівняння для $\bar{\Psi}_s$

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - L_m \bar{I}_s}{L_r}; \quad \bar{\Psi}_s = L_s \bar{I}_s + \frac{L_m (\bar{\Psi}_r - L_m \bar{I}_s)}{L_r} = k_r \bar{\Psi}_r + L'_s \bar{I}_s, \quad (2.30)$$

де $k_r = L_m / L_r$, $L'_s = L_s - L_m^2 / L_r = k_r L_{r\sigma} + L_{s\sigma}$.

2) Підставляємо отриманий вираз в перше рівняння напруг системи (2.29).

$$\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + p(k_r \bar{\Psi}_r + L'_s \bar{I}_s) + j\omega_k (k_r \bar{\Psi}_r + L'_s \bar{I}_s). \quad (2.31)$$

Тим самим виключаємо з першого рівняння напруг потокозчеплення статора.

$$\bar{U}_s = \bar{I}_s [R_s + (p + j\omega_k) L'_s] + k_r \bar{\Psi}_r (p + j\omega_k). \quad (2.32)$$

3) З рівняння для $\bar{\Psi}_r$ виділимо струм \bar{I}_r і одержимо

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - L_m \bar{I}_s}{L_r} = k_r (\bar{\Psi}_r / L_m - \bar{I}_s). \quad (2.33)$$

4) Підставляємо вираз для струму \bar{I}_r в друге рівняння напруг системи (2.29)

$$\bar{U}_r = R_r k_r (\bar{\Psi}_r / L_m - \bar{I}_s) + p \bar{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r = \bar{\Psi}_r [k_r R_r / L_m + p + j(\omega_k - \omega)] - k_r R_r \bar{I}_s \quad (2.34)$$

5) Відніmemo з рівняння для \vec{U}_s рівняння для \vec{U}_r , попередньо помноживши його на k_r :

$$\vec{U}_s - k_r \vec{U}_r = \vec{I}_s [\mathbf{R}_s + (\mathbf{p} + j\omega_k) \mathbf{L}'_s] + k_r \vec{\Psi}_r (\mathbf{p} + j\omega_k) - \vec{\Psi}_r [k_r^2 \mathbf{R}_r / L_m + k_r \mathbf{p} + j(\omega_k - \omega) k_r] + k_r^2 \mathbf{R}_r \vec{I}_s = \vec{\Psi}_r [-k_r^2 \mathbf{R}_r / L_m + j k_r \omega] + \vec{I}_s [\mathbf{R}_s + (\mathbf{p} + j\omega_k) \mathbf{L}'_s + k_r^2 \mathbf{R}_r].$$

$$\vec{U}_s - k_r \vec{U}_r = \vec{I}_s [\mathbf{R}' + (\mathbf{p} + j\omega_k) \mathbf{L}'_s] + \vec{\Psi}_r [j k_r \omega - k_r^2 \mathbf{R}_r / L_m], \quad (2.35)$$

де $\mathbf{R}' = \mathbf{R}_s + k_r^2 \mathbf{R}_r$.

6) Розкладемо отриману векторну рівність на дійсну і уявну частини

$$\begin{aligned} U_{su} - k_r U_{ru} &= \mathbf{R}' (T_1' \mathbf{p} + 1) I_{su} - \omega_k L'_s I_{sv} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_r; \\ U_{sv} - k_r U_{rv} &= \mathbf{R}' (T_1' \mathbf{p} + 1) I_{sv} + \omega_k L'_s I_{su} + k_r \omega \Psi_r, \end{aligned} \quad (2.36)$$

де $T_1' = L'_s / \mathbf{R}'$.

7) Розкладемо вираз для \vec{U}_r на дійсну і уявну частини

$$U_{ru} = \frac{\mathbf{R}_r k_r \Psi_r}{L_m} - \mathbf{R}_r k_r I_{su} + \mathbf{p} \Psi_r; \quad U_{rv} = (\omega_k - \omega) \Psi_r - \mathbf{R}_r k_r I_{sv}. \quad (2.37)$$

8) Знайдемо з цих рівнянь Ψ_r і ω_k :

$$\begin{aligned} \Psi_r &= \frac{U_{ru} + \mathbf{R}_r k_r I_{su}}{\mathbf{p} + \mathbf{R}_r k_r / L_m} = \frac{U_{ru} + \mathbf{R}_r k_r I_{su}}{\mathbf{p} + 1/T_r} = \frac{T_r U_{ru} + L_m I_{su}}{T_r \mathbf{p} + 1}. \\ \omega_k &= \frac{U_{rv} + \mathbf{R}_r k_r I_{sv}}{\Psi_r} + \omega, \end{aligned} \quad (2.38)$$

де $T_r = L_r / \mathbf{R}_r$.

Поєднуємо в систему рівняння пунктів 32, 34, третє рівняння електромагнітного моменту (2.28) і рівняння руху. Після цього одержуємо наступну математичну модель АМ в осях, орієнтованих за вектором $\vec{\Psi}_r$:

$$\begin{aligned} U_{su} - k_r U_{ru} &= \mathbf{R}' (T_1' \mathbf{p} + 1) I_{su} - \omega_k L'_s I_{sv} - \frac{k_r}{T_r} \Psi_r; \\ U_{sv} - k_r U_{rv} &= \mathbf{R}' (T_1' \mathbf{p} + 1) I_{sv} + \omega_k L'_s I_{su} + k_r \omega \Psi_r; \\ \Psi_r &= \frac{T_r U_{ru} + L_m I_{su}}{T_r \mathbf{p} + 1}; \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\omega_k = \frac{U_{rv} + R_r k_r I_{sv}}{\Psi_r} + \omega;$$

$$M = \frac{3}{2} N k_r \Psi_r I_{sv};$$

$$\frac{J}{N} p \omega = M - M_c,$$

де $k_r = L_m / L_r$.

На рисунку 2.1 представлена структурна схема математичної моделі АМ, складена за рівняннями (2.13). Як видно зі структурного представлення асинхронної машини, вона є багатозв'язною системою, оскільки характеризується нелінійними зв'язками між каналами керування і нелінійними залежностями між регульованими змінними. Багатозв'язними називаються такі системи автоматичного керування, у яких здійснюється одночасне керування декількох взаємозалежних координат [5]. Структурну схему БСАК можна представити як декілька каналів керування з перехресними зв'язками між ними. Канал передачі впливу, що бере початок в одній сепаратній системі і прикладений в іншій, називається перехресним зв'язком. БСАК – це сукупність сепаратних систем з перехресними зв'язками між ними [1][4].

Кожній регульованій величині можна поставити у відповідність свій регулювальний орган і тим самим визначити в об'єкті прямі канали передачі впливів. По цільовому призначенню кожний з каналів керування (сепаратних систем), які входять до БСАК, може бути віднесений до систем автоматичної стабілізації, слідкуючих систем і систем програмного керування [1][5].

Перехресні зв'язки, які діють між сепаратними системами керування, можна розбити на дві групи. До першої групи перехресних зв'язків відносяться такі, які властиві системі унаслідок фізичних її особливостей. Такі зв'язки називаються природними. Друга група перехресних зв'язків утвориться при введенні штучних впливів між сепаратними системами керування для додання системі в цілому визначених бажаних властивостей. Такі перехресні зв'язки називають коригувальними. Коригувальні перехресні зв'язки служать засобом

поліпшення показників якості керування [4]. Можливість поліпшення властивостей систем за рахунок коригувальних перехресних зв'язків є особливістю БСАК, тому цьому приділяється багато уваги.

У випадку багатомірних нелінійних об'єктів, які характеризуються як сукупність лінійних підоб'єктів, зв'язаних через нелінійні функціональні залежності, можлива реалізація регуляторів у вигляді активних лінійних фільтрів, виходячи з оптимальної передатної функції замкнутих контурів керування [5].

Порядок синтезу САК можна звести до декількох основних етапів.

1. Вибір системи координат, яка забезпечує представлення машини змінного струму як найпростішого стаціонарного об'єкта.

2. Вибір регульованих змінних і законів керування ними. Раціональний вибір керованих змінних дозволяє зневажати деякими перехресними зв'язками через їхню слабкість.

3. Виконання задачі першого і другого етапів зводиться до пошуку раціональних структур, які характеризуються простим виразом електромагнітного моменту з мінімальним числом найважливіших змінних, підлягаючих керуванню, мінімальним числом внутрішніх перехресних зв'язків, зручністю виміру змінних стану об'єкта, які підлягають керуванню.

Таблиця 2.5 Параметри необхідні для побудови моделі системи векторного керування асинхронної машини

R'	T_r	R_r	M_c	T_1'	L_m	N	I_n	K_r	L_s'	J	L_r
1,06	0,12	0,35	90	0,0024	0,063	3	23,36	1,5	0,0025	0,11	0,042

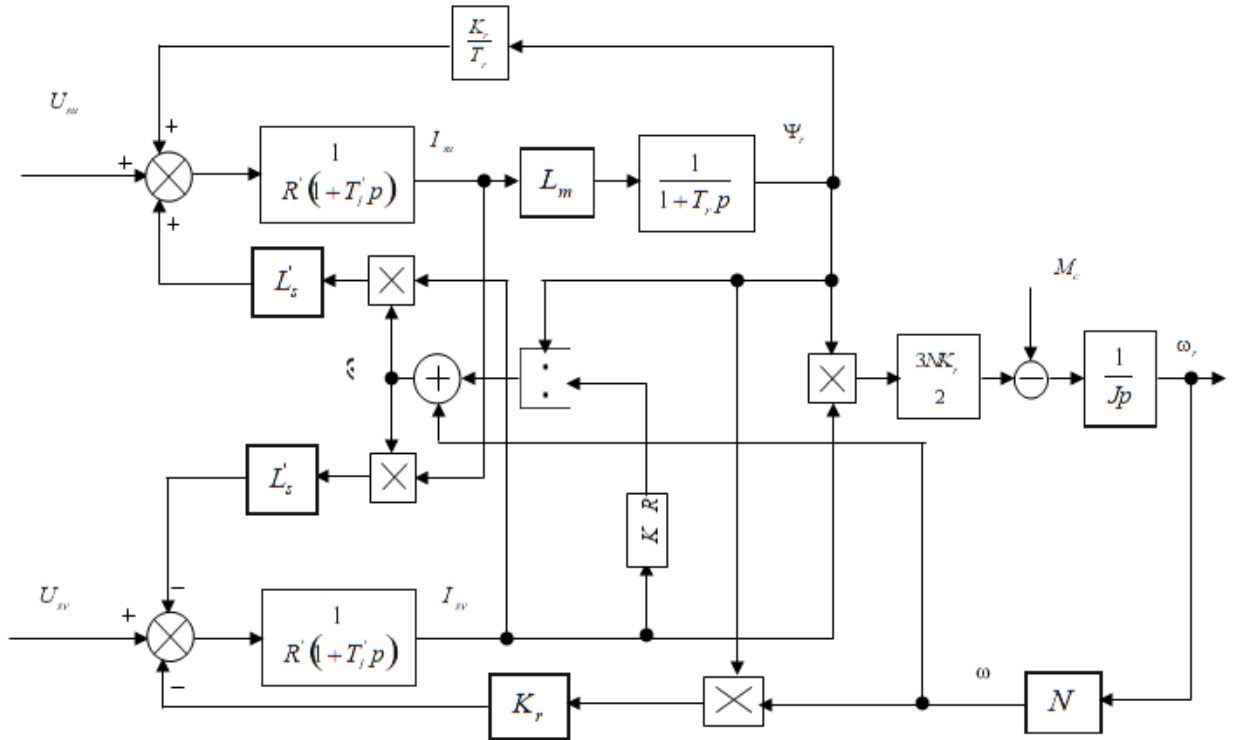


Рисунок 2.1 Структурна схема асинхронної машини

Для керування електроприводом можна використати частотний перетворювач.

Через конструкцію пристрою керування, оператор може керувати електроприводом плавно, це означає, що на електродвигун не буде здійснюватися суттєве ударне навантаження.

Для побудови автоматизованого електропривода використовую частотний перетворювач для керування електроприводом:



Рисунок 2.2 Вигляд перетворювача частоти 11 кВт , ACS580, 380В (ACS580-01-026A-4)

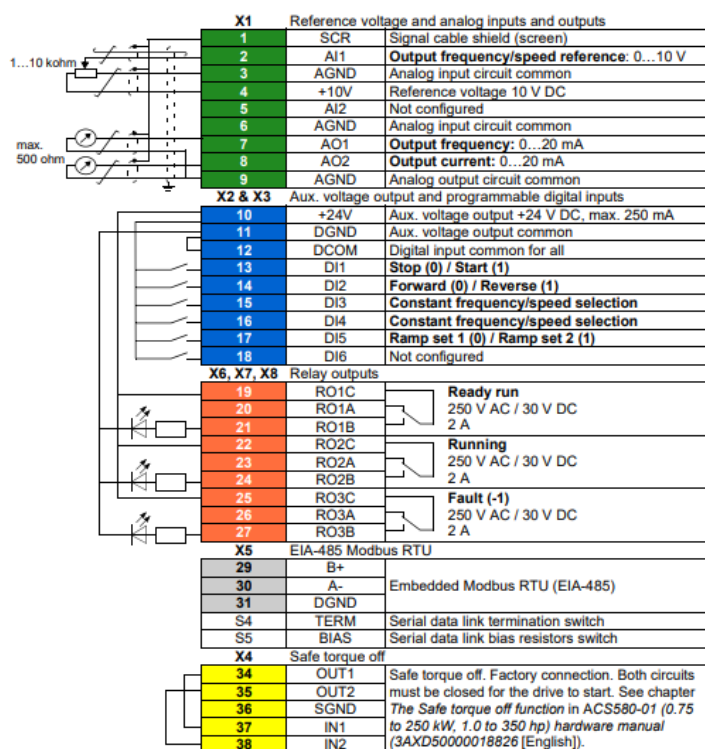
- Напруга живлення, В: 380
- Номінальна потужність, кВт: 11
- Номінальний струм, А: 23.8
- Перевантажувальна здатність (1 хв), %: 110
- Вихідна частота, Гц: 0...500
- Фільтр ЕМС: є
- Гальмівний модуль: встановлений
- Дросель DC: встановлений
- ПІД регулятор: встановлений
- Пульти керування: є
- Скалярний закон керування U/f: є
- Векторний закон керування без енкодера: є
- Векторний закон управління с енкодером: ні
- Ступінь захисту, IP: 20

Відмінні риси:

- Універсальність завдяки великому вибору додаткових адаптерів, що дозволяє інтегрувати привод в будь-яку автоматизовану систему управління;
- Відповідає класу енергоефективності IE2 і сумісний з двигунами класу IE4, що дозволяє значно підвищити ефективність системи;
- Вбудований ЕМС С2 фільтр і дросель ланки постійного струму;
- Енергооптимізатор і лічильники енергії дозволяють безперервно відстежувати витрати на електроенергію і оптимізувати роботу перетворювача;
- Легке введення в експлуатацію за допомогою панелі управління та програмного забезпечення Drive Composer [9]

Default I/O connections

Default I/O connections of the ABB Standard macro are shown below.



Total load capacity of the Auxiliary voltage output +24V (X2:10) is 6.0 W (250 mA / 24 V DC).

Wire sizes:

0.2...2.5 mm² (24...14 AWG): Terminals +24V, DGND, DCOM, B+, A-, DGND, Ext. 24V

0.14...1.5 mm² (26...16 AWG): Terminals DI, AI, AO, AGND, RO, STO

Tightening torques: 0.5...0.6 N·m (0.4 lbf·ft)

Рисунок 2.3 Схема входів та виходів частотного перетворювача ACS580-01-026A-4

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1 Математична модель

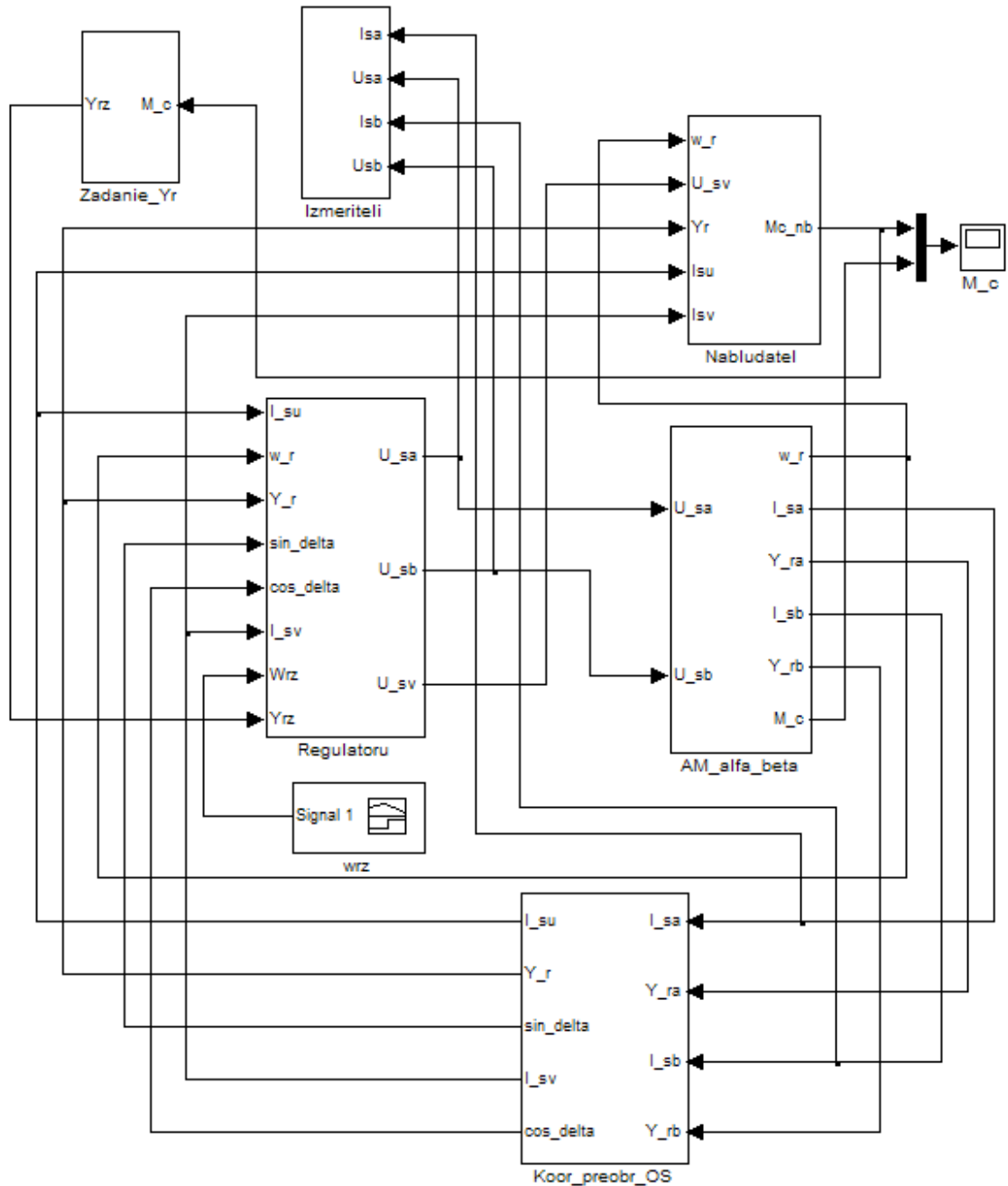


Рисунок 3.1 – Схема набору в Matlab Simulink математичної моделі

Математична модель замкненої системи електропривода, складена в Matlab Simulink, має блокову структуру і представлена на рисунку 3.1. У блоці AM_alfa_beta міститься модель асинхронної машини в осях α, β , структурна схема якої представлена на рисунку 3.1[6]. У підсистемі Koor_preobr_OS

знаходяться координатні перетворювачі в колах зворотних зв'язків, а також виконуються обчислення векторного аналізатора . На вхід підсистеми надходять змінні стану АМ в осях α, β , а виводяться струми в осях, орієнтованих за вектором потокозчеплення ротора, і направляючі синус і косинус[6]. Ці змінні передаються в блок регуляторів Regulatoru. Вхідними змінними цього блоку є змінні стану АМ в осях u, v , напрямні синус і косинус для реалізації координатних перетворень керуючих впливів, і сигнали завдання на швидкість і модуль потокозчеплення ротора[6]. З виходу цієї підсистеми на модель АМ надходять керування, що прикладаються до статора по осях α і β . У блоці Izmeriteli містяться структури, що реалізують обчислення реактивної й активної потужностей статора і коефіцієнта потужності АМ. У блоці Nabludatel зібрана математична модель спостерігача стану у відповідності зі структурою і призначена для обчислення моменту статичного навантаження на валу АМ[6]. З виходу цього блоку сигнал оцінки моменту навантаження подається в підсистему Zadanie_Yr, у якій реалізується вираз з формуванням вихідного сигналу, що є завданням регулятора потокозчеплення ротора в каналі реактивної потужності системи керування[6].

3.2 Графіки отриманих перехідних процесів отриманих шляхом моделювання в Matlab:

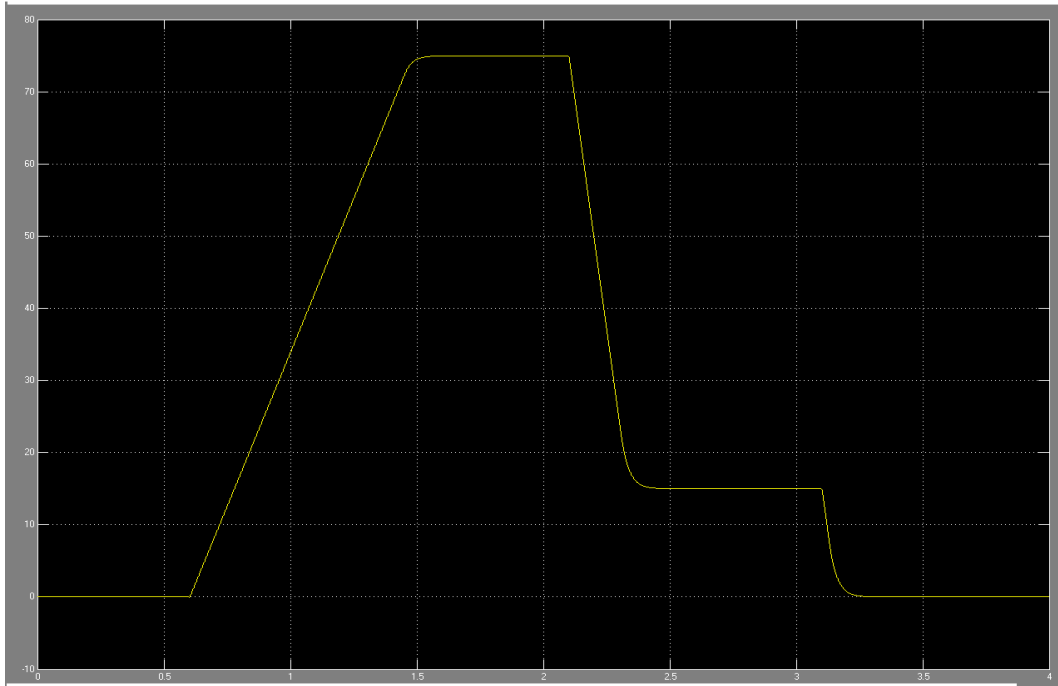


Рисунок 3.2 Швидкість електропривода мостового крану під час виконання роботи з переміщенням вантажу.

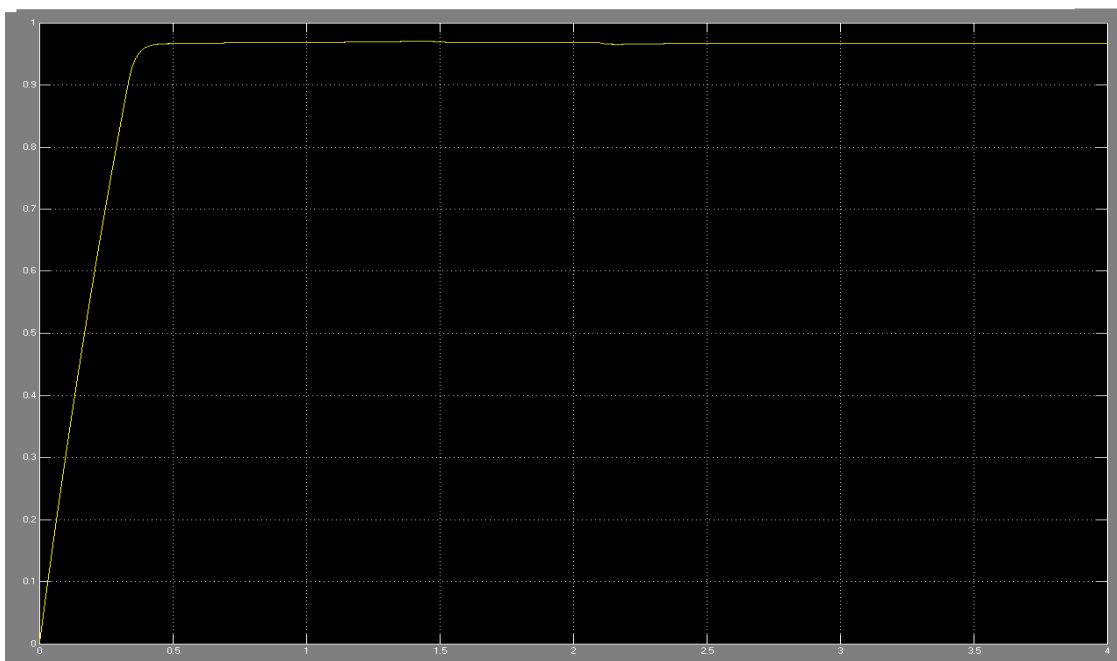


Рисунок 3.3 Модуль потокозчеплення ротора при роботі електропривода.

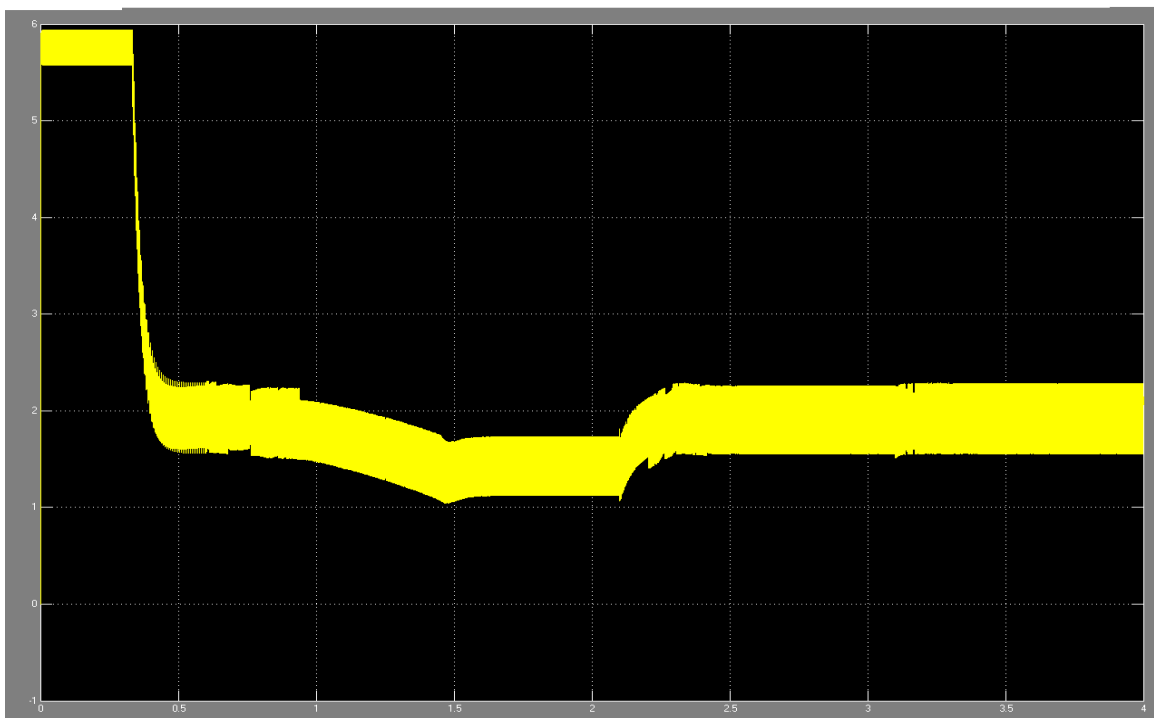


Рисунок 3.4 Реактивна складова струму статора

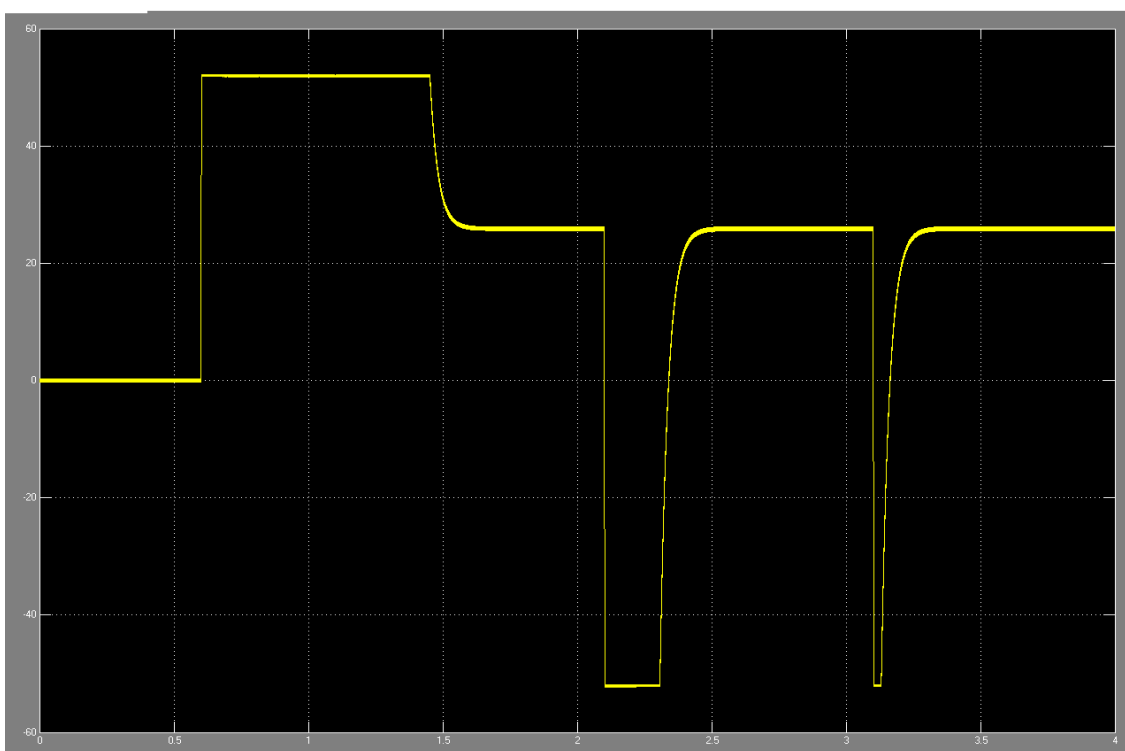


Рисунок 3.5 Активна складова струму статора

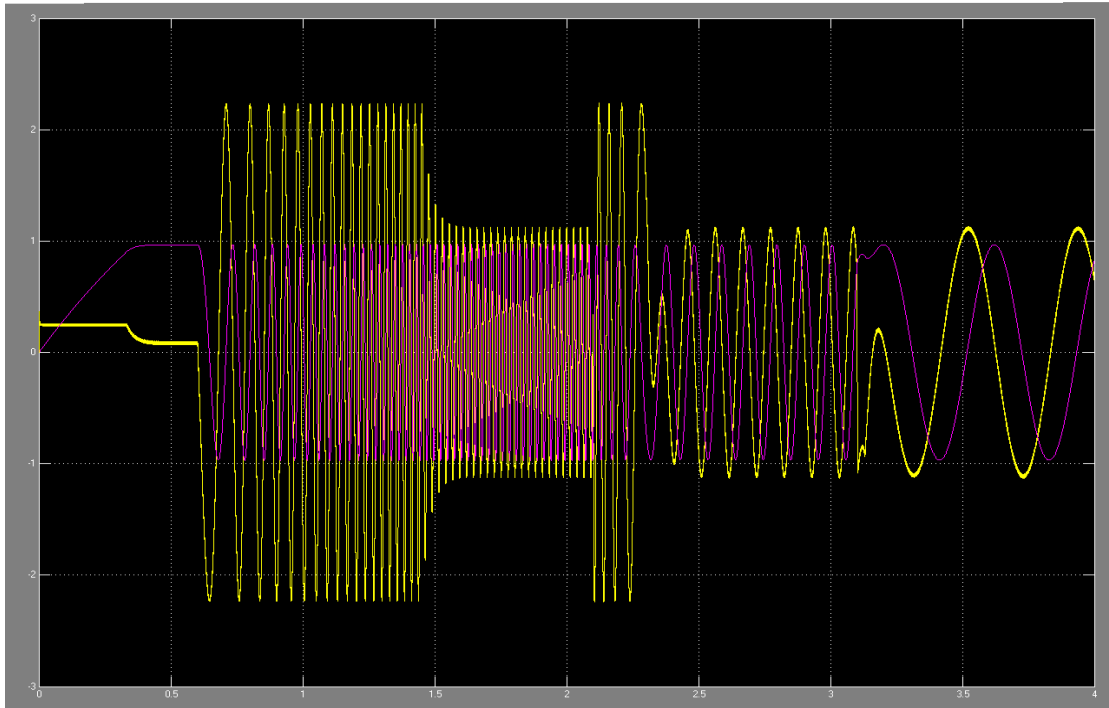


Рисунок 3.6 Потокосцеплення у фазі А ротора (фіолетовий колір лінії). Струм у фазі А статора(жовтий колір лінії) у відносних одиницях.

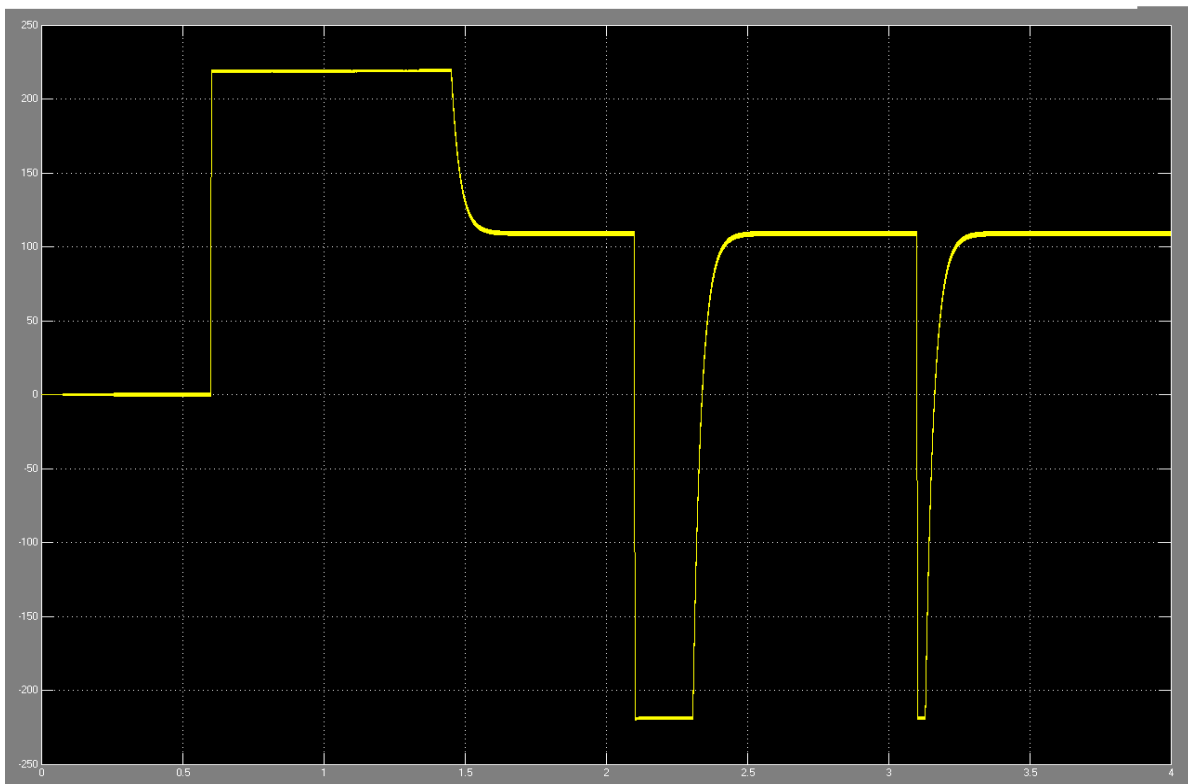


Рисунок 3.7 Електромагнітний момент

Як можна побачити з графіків (Рис. 3.2 та Рис. 3.6 – 3.7) при розгоні двигуна потокозчеплення у фазі А ротора від графіка струму статора у фазі А, також набуває найбільшого показника, щоб вийти на необхідну швидкість. Згодом при набутті необхідної швидкості потокозчеплення ротора відстає від струму статора, а електромагнітний момент набуває від'ємного значення, це означає, що електропривод гальмує для зменшення швидкості підйому вантажу, при цьому струм статора випереджає потокозчеплення ротора у фазі А.

Коли швидкість починає дорівнювати 0, то частота потокозчеплення ротора та частота струму статора у фазі А зменшується і електромагнітний момент показує, що вантаж утримується на певній висоті.

4 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

4.1 Спостерігач потокозчеплення ротора в системі векторного керування асинхронної машини.

Основним недоліком алгоритмів векторного керування асинхронними двигунами (АД) є їх чутливість до варіацій параметрів електричної машини. Основне параметричне обурення в розглянутій системі - це зміна активного опору ротора АД внаслідок його нагріву. При цьому порушуються умови полеорієнтації, в результаті чого погіршуються якісні показники координатного регулювання, можлива навіть втрата стійкості, знижується ефективність процесу електромеханічного перетворення енергії [11]. Вимірювання ланцюгів потоку в щілинах під фазними обмотками АД за допомогою датчиків

Хола практично складно реалізувати. Тому доцільно використовувати спостерігачів, які дозволяють проводити легкодоступні вимірювання сигналів фазних напруг і струмів статора відновити значення складових ланцюга потокозчеплення ротора в осях α та β . Значна частина алгоритмів спостереження за вектором потокозчеплення і ідентифікація активного опору ротора в умовах його невизначеності не мають значного теоретичного обґрунтування, а ті, що теоретично доведені, зазвичай дуже складні [11].

У матричному вигляді перше і друге рівняння системи будуть записані як система другого порядку:

$$\begin{aligned}
\mathbf{p} \begin{pmatrix} \widehat{\Psi}_{r\alpha} \\ \widehat{\mathbf{I}}_{s\alpha} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} \\ \mathbf{a}_{21} & \mathbf{a}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{\Psi}_{r\alpha} \\ \widehat{\mathbf{I}}_{s\alpha} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{b}_{11} & 0 \\ \mathbf{b}_{21} & \mathbf{b}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{pr\alpha} \\ \mathbf{u}_{s\alpha} \end{pmatrix}, \\
\text{де } \mathbf{u}_{pr\alpha} &= \omega \widehat{\Psi}_{r\beta}; \quad \mathbf{a}_{11} = -\mathbf{R}_r / \mathbf{L}_r; \quad \mathbf{a}_{12} = \mathbf{R}_r \mathbf{K}_r; \quad \mathbf{a}_{21} = \frac{\mathbf{K}_r \mathbf{R}_r}{\mathbf{L}_s \mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m^2}; \\
\mathbf{a}_{22} &= -\frac{\mathbf{L}_r (\mathbf{R}_s + \mathbf{K}_r^2 \mathbf{R}_r)}{\mathbf{L}_s \mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m^2}; \quad \mathbf{b}_{11} = -1; \quad \mathbf{b}_{12} = 0; \quad \mathbf{b}_{21} = \frac{\mathbf{L}_m}{\mathbf{L}_s \mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m^2}; \\
\mathbf{b}_{22} &= \frac{\mathbf{L}_r}{\mathbf{L}_s \mathbf{L}_r - \mathbf{L}_m^2}.
\end{aligned} \tag{4.1}$$

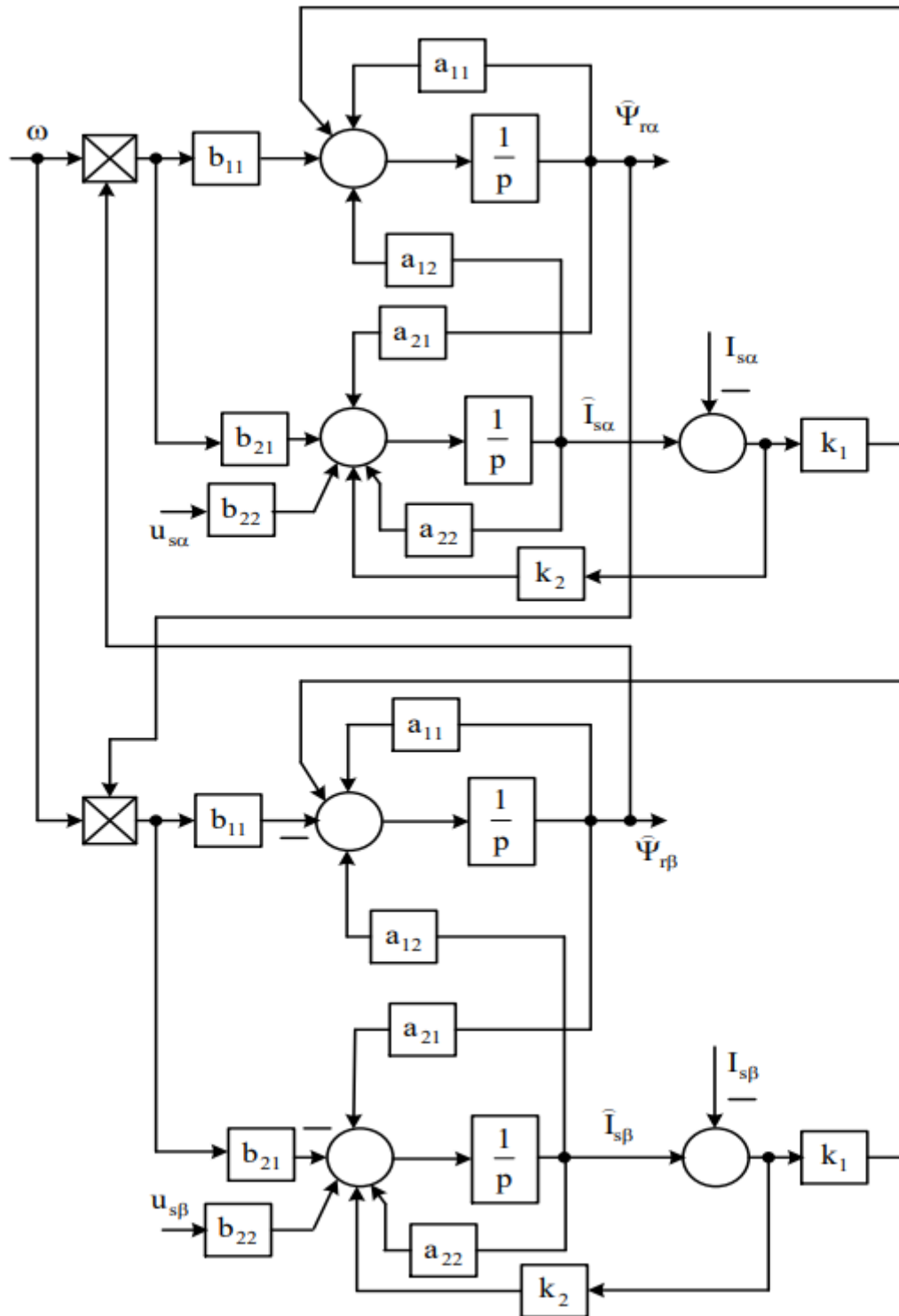


Рисунок 4.1 Структурна схема асимптотичного спостерігача потокозчеплення ротора векторного аналізатора.

Спостерігач дозволяє здійснити оцінку модуля поточкозчеплення ротора за формулою

$$\bar{\Psi}_r = \sqrt{\bar{\Psi}_{r\alpha}^2 + \bar{\Psi}_{r\beta}^2} \quad (4.2)$$

Та визначити направляючі синус і косинус

$$\cos \delta = \bar{\Psi}_{r\alpha} / \bar{\Psi}_r ; \sin \delta = \bar{\Psi}_{r\beta} / \bar{\Psi}_r .$$

Таблиця 4.1 Розрахункові коефіцієнти для побудови схеми спостерігача поточкозчеплення

a11	a12	a21	a22	b11	b12	b21	b22
8,3	0,525	17500	1615,4	-1	0	2100	1433,3

Ці коефіцієнти розраховуються згідно з таблицями 2.4 та 2.5

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Вступ

В даній роботі замінюється обладнання керування електроприводом мостових кранів на більш сучасне через недоліки релейно – контакторного керування, де використовуються резистори.

Тим самим, регулювання швидкості виконується ступінчасто, через що з'являється «надлишковий динамічний момент», який прискорює зношування механічних частин електропривода.

Через це необхідно часто проводити капітальний ремонт електродвигуна, щоб він і надалі справно працював і виконував свою роботу.

Тому є необхідність переробити систему керування для полегшення відпрацювання електроприводу. І одним із сучасних пристроїв є частотний перетворювач. Він не тільки невілює прискорене механічне старіння рухомих та конструктивних частин електродвигуна, а також запобігає витрат електроенергії на тепло у порівнянні з релейно – контакторним керуванням з резисторами.

5.1 Розрахунок капітальних витрат

При визначенні величини проектних капіталовкладень ($K_{пр}$) можна скористатися формулою:

$$K_{пр} = K_{об}(\sum_{i=1}^k C_i) + Z_{тзс} + Z_m + Z_n + Z_{пр} \quad (5.1)$$

де $K_{об}(\sum_{i=1}^k C_i)$ – вартість придбання електрообладнання (засобів автоматизації, програмного забезпечення тощо) за проектом або сумарна вартість комплектуючих елементів i -го виду, необхідних для реалізації прийнятого науково-технічного рішення [8];

k - кількість необхідних комплектуючих елементів;

$Z_{тзс}$ – транспортно-заготівельні і складські витрати;

Z_m – витрати на монтажні роботи;

Z_n - витрати на налагоджувальні роботи;

$Z_{пр}$ – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Витрати на перевезення обладнання згідно з ціною політикою компанії перевезника «Нова Пошта» - 394 грн. з Києва до Дніпра.

Таблиця 5.1 Зведення капітальних витрат

№ з/п	Найменування технічних засобів (комплектуючих виробів)	Кількість	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1	Перетворювач частоти ACS580-01-026A-4	1	50743	50743
	ВСЬОГО			50743

[9]

Витрати на монтажні (Z_m) і на налагоджувальні роботи (Z_n) можна визначити наступним чином:

$$Z_{m(n)} = \sum(C_i \times a_i \times t_i) \times K_d \times K_{см} \times K_{пр} \quad (5.2)$$

де C_i – чисельність працівників i -го розряду, необхідних для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), чол.;

a_i – годинна тарифна ставка працівника i -го розряду, грн.;

t_i – час, необхідний для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), год.;

K_d – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{см}$ – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{пр}$ – коефіцієнт, що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

$$Z_{м(н)} = (2 * 70 * 8 + 1 * 80 * 9) * 1,4 * 1,2 * 1,1 = 3400 \text{ грн.}$$

$Z_{пр}$ – додаткові кошти при непередбачених допоміжних витрат при заміні та налагодженні старого обладнання.

$$K_{пр} = 50743 + 394 + 3400 = 54537 \text{ грн.}$$

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати складуть:

$$C = C_a + C_z + C_c + C_t + C_e + C_{пр} \quad (5.3)$$

До основних статей експлуатаційних витрат електротехнічного устаткування відносяться:

- амортизаційні відрахування (C_a);
- заробітна плата обслуговуючого персоналу (C_z);
- єдиний соціальний внесок (C_c);
- витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт устаткування та мереж (C_t);
- вартість електроенергії, що буде споживана об'єктом проектування або витрат електроенергії (C_e);
- інші експлуатаційні витрати ($C_{пр}$)[8].

Модернізоване обладнання у даній роботі позначається як проектне (пр), а застаріле, яке треба замінити – базове (б).

5.3 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Норма амортизації при прямолінійному методі постійна протягом усього амортизаційного періоду і дорівнює:

$$N_a = \frac{\Phi_n - L}{\Phi_n * T_n} * 100 \% \quad (5.4)$$

де T_n – термін корисного використання (амортизаційний період) [8].

$$N_a = 50743 / (50743 * 2) * 100\% = 50\%$$

2 – роки термін корисного використання електрообладнання

Річні амортизаційні відрахування АО за прямолінійним методом:

$$AO = \frac{\Phi_n * N_a}{100} \quad (5.5)$$

$$AO = 50743 * 50 / 100 = 25371 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.2 Розрахунок амортизаційних відрахувань

№ з/п	Найменування	Капітальні інвестиції, тис. грн.	Норма амортизації, %	Сума амортизації, тис. грн.
1	Проектний варіант	54537	50	25371
2	Базовий варіант	3652	50	1826

5.4 Розрахунок річного фонду заробітної плати

Кількість працівників при заміні застарілого обладнання не змінилося, тому немає необхідності у розрахунку заробітної плати, бо вона залишилася незмінною.

5.5 Визначення річних витрат на технічне обслуговування і поточний ремонт

Витрати на поточний ремонт апаратури автоматики і систем автоматизації можна розрахувати за формулою:

$$Z_{т.р.} = \sum_{i=1}^n \left(R_i * t_i * m_i * R_{\Sigma i} + \frac{S_i * \Pi_i}{T_i} * T_{\phi} \right) \quad (5.6)$$

де n – число пристроїв автоматики, що підлягають ремонту;

R_i – годинна ставка робітників, що виконують ремонт, грн;

t_i – трудомісткість одного ремонту при категорії складності ремонту в одну ремонтну одиницю залежно від виду ремонту год./ од .:

- малого - 1,2;
- середнього - 7,0;
- капітального - 15,0.

m_i – число ремонтів за рік (наприклад, для закритих електромашин число малих ремонтів - 2, середніх - 1, капітальних - 0,1);

R_{Σ} – сумарна категорія складності ремонту в залежності від виду електрообладнання:

- ✓ асинхронний двигун від 0,5 до 5 кВт - 1,3; 12
- ✓ асинхронний двигун від 5 до 10 кВт - 2,1;
- ✓ асинхронний двигун від 55 до 75 кВт - 6,0;
- ✓ машини постійного струму від 0,5 до 5 кВт - 2,5;
- ✓ електродвигуни та генератори постійного струму від 55 до 75 кВт - 10,0.

S_i - вартість однотипних замінних елементів, грн.;

P – кількість однотипних замінних елементів;

T – середній термін служби деталей даного типу, год.;

T_{ϕ} – число годин роботи апаратури на рік, год

$Z_{т.р.}(пр) = (100 * 7 * 2 * 2,1 + (50743 * 1 / 61320) * 6168) = 8\ 059$ грн.

$Z_{т.р.}(б) = (100 * 7 * 2 * 2,1 + (200 * 6 / 8760) * 6168) = 3\ 785$ грн.

5.6 Розрахунок вартості спожитої електроенергії

Вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування протягом року, визначається виходячи з його встановленої потужності, річного фонду робочого часу об'єкта проектування та втрат електроенергії за формулою:

$$C_e = W_p * C_e \quad (5.7)$$

де W_p – кількість спожитої за рік електроенергії, кВт • год;

C_e – тариф на електроенергію станом на конкретну дату, грн. / кВт • год;

$$C_e(\text{пр})=0,11*6168*4,5=3\ 053 \text{ грн. [10]}$$

$$C_e(\text{б})=1,9*6168*4,5=52\ 736 \text{ грн.}$$

5.7 Визначення інших витрат

Інші витрати по експлуатації об'єкта проектування включають витрати з охорони праці, на спецодяг та ін[8]. Згідно з практикою, ці витрати визначаються у розмірі 4% від річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу.

Інші витрати не змінилися через заміну застарілого обладнання.

$$C(\text{б})=1826+3\ 785+52\ 736 = 58\ 347 \text{ грн.}$$

$$C(\text{пр})=25\ 371+8\ 059+3\ 053 = 36\ 483 \text{ грн.}$$

5.8 Визначення річної економії від впровадження науково-технічного рішення

Річну економію передбачається отримувати тільки при впровадженні даного проектного варіанту, а саме внаслідок заміни застарілого обладнання, то розрахунок повної річної економії може здійснюватися за формулою:

$$E_{\text{кп}} = E_{\text{кр}} \pm \Delta C \quad (5.8)$$

$$E_{\text{кп}}=49\ 683 - C(\text{б})-C(\text{пр})= 49\ 683 + (58\ 347 - 36\ 483)=71\ 547 \text{ грн.}$$

5.9 Визначення та аналіз показників економічної ефективності

Оцінка економічної ефективності розглянутих в дипломному проекті технічних і організаційних рішень здійснюється на основі визначення та аналізу наступних показників:

- а) розрахункового коефіцієнта ефективності (прибутковості) капітальних витрат E_p ;
- б) терміну окупності капітальних витрат T_p .

Коефіцієнт ефективності (прибутковості) капітальних витрат E_p показує, скільки гривень додаткового прибутку (економії) приносить одна гривня капітальних витрат:

$$E_p = E_{\text{кп}}/K_{\text{пр}} \quad (5.9)$$

де $E_{\text{кп}}$ - загальна річна економія від впровадження об'єкта проектування, тис. грн.;

$K_{\text{пр}}$ - капітальні витрати за варіантом, що викликали економію, тис. грн.

$$E_p = 71\,547/54\,537 = 1,31 \text{ долі од.}$$

Термін окупності капітальних витрат T_p показує, за скільки років вони окупляться за рахунок загальної економії від впровадження прийнятого технічного рішення:

$$T_p = K_{\text{пр}}/E_{\text{кп}} \quad (5.10)$$

$$T_p = 54\,537/71\,547 = 0,76 \text{ років}$$

Визначити нормативне значення коефіцієнта ефективності можна також виходячи з прийнятної для підприємства індивідуальної норми прибутковості:

$$E_n = 1/E_{\text{оч}} \quad (5.11)$$

де $T_{\text{оч}}$ – очікуваний, прийнятний для підприємства термін окупності капітальних вкладень, років.

$$E_n = 1/2 = 0,5$$

При цьому варіант визнається економічно доцільним за умови:

$$E_p > 1/T_{\text{оч}} \quad (5.12)$$

$$1,31 > 0,5$$

Для обраного варіанту визначається розрахунковий термін окупності капітальних витрат T_p

Якщо варіанти економічно рівноцінні, то приймається варіант, що забезпечує більш високу надійність, безпеку, поліпшення умов праці [8].

Таблиця 5.3 Порівняльна оцінка техніко-економічних показників

№ з/п	Найменування показників	Одиниці виміру	Базовий (альтернативний) варіант	Проектний варіант	Зміни у порівнянні з альтернативним варіантом	
					(тис. грн)	%
1	2	3	4	5	6	7
1	Капітальні витрати	тис. грн.	-	55	-	-
2	Експлуатаційні витрати всього	тис. грн.	58	36	22	38
3	Річна економія всього	тис. грн.	-	72	-	-
	Розрахунковий коефіцієнт ефективності	долі од.	-	1,31	-	-
4	Розрахунковий термін окупності капітальних вкладень	років	-	0,76	-	-
5	Економія електроенергії	кВт-год	11 719	679	50	94,2

5.10 Висновки з техніко економічного обґрунтування

Як можна побачити з розрахунків, що зміна системи керування може суттєво забезпечити економію фінансів.

Також заміна старого обладнання на нове, впливає на довговічність кранового електропривода, який не буде відчувати регулярне ударне навантаження тим самим зменшить кількість необхідних капітальних ремонтів і загальний час, який необхідний для заміни електродвигунів на мостових кранах.

І при зменшенні кількості ремонтів також зменшиться кількість простоїв при роботі частині виробництва, де використовується ця техніка.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розповідається про розрахунок необхідного електроприводу для мостового крану, що повинен керуватися векторною системою керування.

Сам двигун вибраний з потужністю 11кВт повністю задовольняє вимогам, щодо вибору електропривода для мостових кранів.

Векторна система керування розроблена для циклічного переміщення вантажу на підприємстві.

Вибране обладнання це – частотний перетворювач, який буде керувати електроприводом мостового крану.

Впровадження нового обладнання дозволяє зекономити кошти на електроенергії та на капітальному ремонті.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Крановый электропривод: Справочник /А.Г.Яуре, Е.М.Певзнер. - М.: Энергоатомиздат, 1998г.
2. Справочник по кранам: В 2 томах. Том1. Под общей редакцией М.М. Гохберга. - М.: «Машиностроение», 1988.
3. Справочник по кранам: В 2 томах. Том 2. Под общей редакцией М.М. Гохберга. - М.: «Машиностроение», 1988.
4. Зеленов А.Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів: Підручник /А.Б.Зеленов. – Луганськ: вид-во «Ноулідж», 2010.– 670 с.
5. Справочник по автоматизированному электроприводу /Под ред.В.А.Елисеєва и А.В.Шинянского – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 616 с.
6. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Оптимізація електромеханічного перетворення енергії” на тему “Оптимізація енергетичних показників асинхронного вентильного каскаду” для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Укл.: к.т.н., доцент Ключев О.В. - Кам'янське: ДДТУ, 2018, 35 стор.
7. Методичні рекомендації до передатестаційної практики та підготовки кваліфікаційної роботи магістрів М.М. Казачковський, О.А.Яланський, О.С.Бешта, Р.О.Боровик, С.С.Худолій, О.В.Балахонцев, В.А.Бородай, А.А.Колб. - Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 28 с.
8. Методичні вказівки до виконання економічної частини кваліфікаційної роботи для студентів напряму підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Любов Вікторівна Тимошенко. Дніпро: НТУ «ДП», 2020. - 18 с.
9. <https://privod.kiev.ua/> - перетворювач частоти.
10. [ACS580-01-026A-4 | АВВ](#) – опис перетворювача.
11. "Наблюдатель потокосцепления ротора в системе векторного управления асинхронной машиной" Ключев О.В.- Кам'янське: ДДТУ, 2021, 9 стор.

12. Крановое электрооборудование: Справочник /Ю.В.Алексеев, А.П.Богословский. - М.: Энергия, 1979г.
13. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе.М.: 2007.- 572с.
14. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам: В 2 Т. / под общей ред. И.П. Копылова. – Т1. М.: Энергоиздат, 2008. – 456.
15. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: учебник для вузов.- М.:Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.