

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ –
АСИНХРОННИЙ ДВИГУН ВЕЛИКОЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Денис ШАПАРЕНКО
гр. ХарЕМ2022-1з

Керівник:

Віталій КОЛОТІЛО
Старший. вікл, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

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

СТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЄТ



Микола ХВОРИСТ

2026 нар.

ЗАВДАННЯ
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Шапаренко Денис Олегович

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: Розробка електроприводу системи перетворювач частоти – асинхронний двигун великої вантажопідйомності

керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботиКолотіло Віталій Іванович, к.т.н.

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

затвержені наказом університету від 27.02.2026 № 184-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 17.06.2026 нар.

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

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка)

Електропривод механізму підйому як об'єкт автоматизації. Технічні характеристики підйомного механізму крана. .

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

Визначення додаткових параметрів механізму підйому. Обґрунтування застосування частотно-регульованого електроприводу

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

Вибір електродвигуна та розрахунок параметрів. Розрахункові параметри електродвигуна. Визначення параметрів схеми заміщення електродвигуна на основі каталожних даних. Розрахунок та побудова природної механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна.

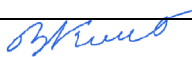
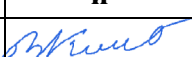
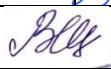



4.4. Охорона праці.

Значення забезпечення безпеки праці. Нормативна основа. Характеристика об'єкту. Мікроклімат та умови його забезпечення. Розрахунок штучного освітлення. Пожежна безпека.

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

1. Титульний.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Мета, задачі, актуальність роботи.
4. Технологічна схема обладнання
5. Кінематичні схеми
6. Електричний двигун підйомної лебідки
7. Характеристики асинхронного двигуна
8. Розрахункова та структурна схеми
9. Імітаційна модель електричної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун»
10. Результати моделювання
11. Висновки

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 16.05.2026 нар.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

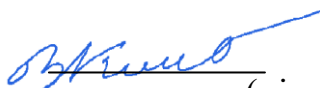
/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	23.05 – 29.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	30.05 – 05.06.2026	
3	Розрахункова частина	06.06 – 12.06.2026	
4	Охорона праці	06.06 – 12.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів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

Здобувач



Денис ШАПАРЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціалі)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



Віталій КОЛОТІЛО
(підпис) (прізвище та ініціалі)

Анотація

Випускна кваліфікаційна робота включає 74 сторінок та містить 39 малюнків, 8 таблиць, 11 джерел.

Ключові терміни: електропривод, що регулюється, асинхронний двигун, перетворювач частоти, оптимізація контуру, структурна схема, імітаційна модель.

Дане дослідження присвячене вивченню асинхронного частотно-регульованого електроприводу, що застосовується у механізмі підйому крана. Основним завданням роботи є розробка проекту електроприводу, який відповідає встановленим технічним умовам та експлуатаційним вимогам.

Для виконання роботи використовувався текстовий редактор Microsoft Word версії 2010. Розрахунки здійснювалися за допомогою середовища MathCAD версії 2014. Імітаційне моделювання проводилося на платформі Simulink у складі пакету Matlab.

Зміст

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	8
1.1 Електропривод механізму підйому як об'єкт автоматизації.....	8
1.2 Технічні характеристики підйомного механізму крана.....	10
1.2.1 Визначення додаткових параметрів механізму підйому.....	11
1.3 Обґрунтування застосування частотно-регульованого електроприводу	11
2 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ.....	15
2.1 Вибір електродвигуна та розрахунок параметрів.....	15
2.1.2 Розрахункові параметри електродвигуна.....	16
2.1.3 Визначення параметрів схеми заміщення електродвигуна на основі каталожних даних.....	17
2.1.4 Розрахунок та побудова природної механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна.....	21
2.2 Механічна система електроприводу підйому.....	25
2.2.1 Параметри елементів механічної системи приводу.....	25
2.3 Визначення заданої сфери роботи.....	27
2.4 Розрахунок граничних характеристик розімкнутої системи перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-).....	29
2.4.1 Визначення максимальної та мінімальної частоти інвертора.....	29
2.4.2 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик розімкнутої системи.....	30
2.4.3 Перевірка правильності вибору електродвигуна.....	31
2.5 Вибір перетворювача частоти.....	33
2.5.1 Параметри перетворювача частоти.....	34
2.5.2 Перевірка правильності вибору перетворювача.....	35

2.5.3	Перевірка забезпечення заданої сфери роботи	36
2.6	Структурна схема силового каналу електроприводу	37
2.6.1	Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу.....	38
2.7	Визначення максимального моменту при підйомі та спуску в системі векторного управління, максимального прискорення та максимального зусилля в канаті.....	39
3	ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ.....	41
3.1	Аналіз нелінійної сау електроприводу з одномасовою механічною системою	41
3.2	Контур потокозчеплення	41
3.3	Контур швидкості	43
3.4	Імітаційні дослідження частотно-регульованого асинхронного електроприводу механізму підйому крана	47
3.5	Розрахунок гальмівного резистора.....	50
3.6	Розробка та дослідження моделей електроприводу з урахуванням шим напруги	50
3.6.1	Розробка моделі електроприводу з урахуванням ШІМ напруги інвертора.....	50
3.7	Дослідження електроприводу методом комп'ютерного моделювання ...	58
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	64
4.1	Значення забезпечення безпеки праці.....	64
4.2	Нормативна основа	64
4.3	Характеристика об'єкту	64
4.4	Мікроклімат та умови його забезпечення	65
4.5	Розрахунок штучного освітлення.....	68

4.6 Пожежна безпека.....	69
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	72

ВСТУП

Більшість вантажопідіймальних кранів функціонують в умовах постійної мінливості, що потребує особливої адаптації їх механізмів, оснащених електроприводами до частоті зміни робочих завдань. Ці зміни обумовлені різними характеристиками вантажів, такими як маса, розміри та форма, а також умовами експлуатації – будь то закриті виробничі приміщення або відкриті вантажні майданчики. У цьому контексті електропривод механізму головного підйому виконує найбільш відповідальну функцію. Його завдання включають плавне початок руху, рівномірний підйом та спуск вантажів, надійне гальмування та утримання вантажу у нерухомому положенні.

Зазвичай для підйомного механізму використовується привід редукторний в поєднанні з поліспаотною системою підвісу. Процес підйому проводиться на швидкостях до 1 м/с із прискоренням у діапазоні 0,1–0,5 м/с², що визначається вимогами до продуктивності механізмів, їх енергоспоживанням та технологічними параметрами експлуатації. Для забезпечення безпечної роботи та продовження ресурсу механічних гальм підйомні пристрої повинні мати низькі посадкові та настановні швидкості. Навантаження підйомного механізму змінюються за величиною від холостого ходу до номінальних значень, а також у напрямку підйому та спуску (відповідно в режимі тяги та гальмування). При пуску та зупинці на заданих швидкостях часто виникають ударні навантаження, які значно перевищують номінальні. Тому потрібно передбачати спеціальні заходи щодо їх зниження.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Електропривод механізму підйому як об'єкт автоматизації

Серед різноманітності підйомного обладнання промисловості особливо широке застосування отримали мостові крани. Вони використовуються для виконання вантажно-розвантажувальних операцій у виробничих цехах, а також за їх межами, якщо підкранові шляхи виходять за межі будівлі. Така універсальна конструкція дозволяє не лише розвантажувати обладнання та матеріали з транспортних засобів без заїзду всередину цеху, а й ефективно використовувати простір усередині виробничих приміщень для технологічного процесу.

Механізм підйому крана функціонує циклічно. Типовий цикл включає кілька етапів: переміщення крана до місця навантаження або розвантаження, спуск порожнього захватного пристрою, підйом вантажу, його переміщення до цільової точки вивантаження, спуск вантажу та повернення пристрою у вихідне положення.



Рисунок 1- Загальний вигляд крана

Кінематична схема механізму представлена рисунку 2.

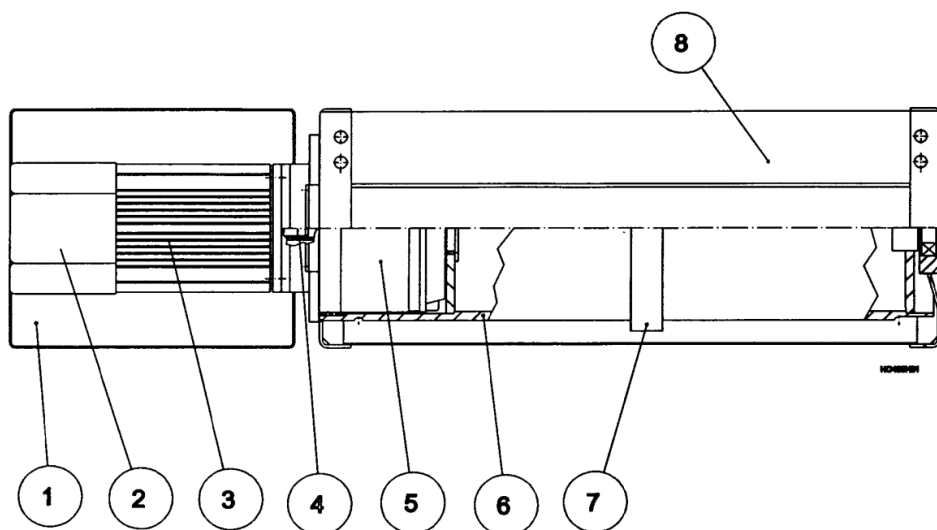


Рисунок 2– Кінематична схема електроприводу підйому крана:

1 – корпус; 2 – електромагнітне гальмо; 3 – електродвигун; 4 – муфта; 5 – редуктор; 6 – барабан; 7 – канатовкладальник.

Робота підйомного механізму здійснюється наступним чином: живлення подається одночасно на електродвигун та електромагнітне гальмо. При спрацьовуванні електромагнітного гальма він перестає утримувати механізм, дозволяючи двигуну розпочати обертання. Через муфту обертальний рух передається редуктору, який приводить у дію барабан. На барабані встановлений канатокладач, який забезпечує рівномірне намотування каната на барабанну поверхню. Така рівномірність необхідна для запобігання заплутуванню каната та безперебійної роботи механізму.

У конструкції використовується триступінчастий редуктор з передавальним числом 71. Це рішення дозволяє досягти високої надійності та ефективності передачі. Кінематична схема підйомного пристрою ілюструє основні складові: електродвигун, муфта, гальмо, редуктор, барабан та поліспапну систему.

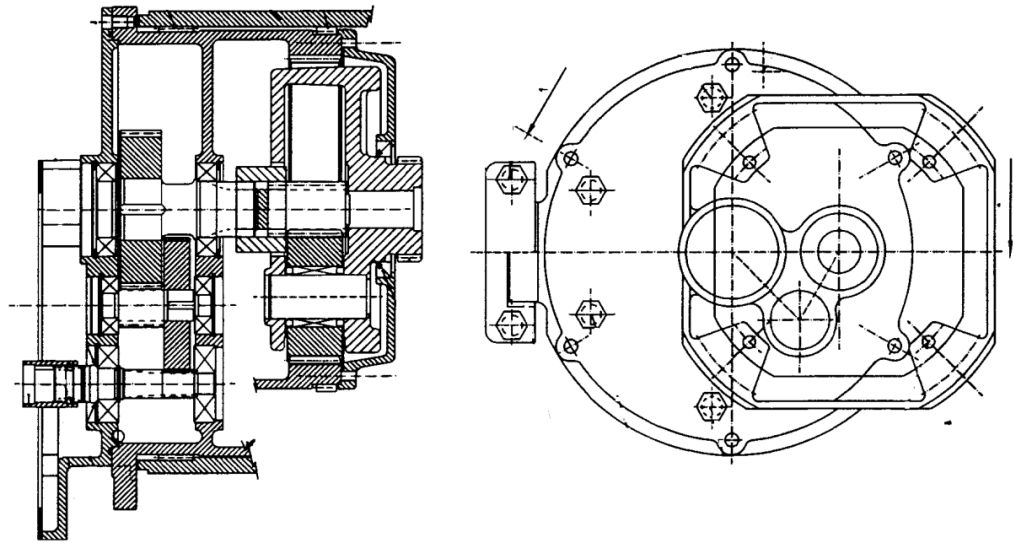


Рисунок 3– Редуктор механізму підйому крана

1.2 Технічні характеристики підйомного механізму крана

Основні технічні параметри роботи підйомного механізму систематизовані таблиці даних (таблиця 1), а кінематична схема пристрою представлена рисунку 4.

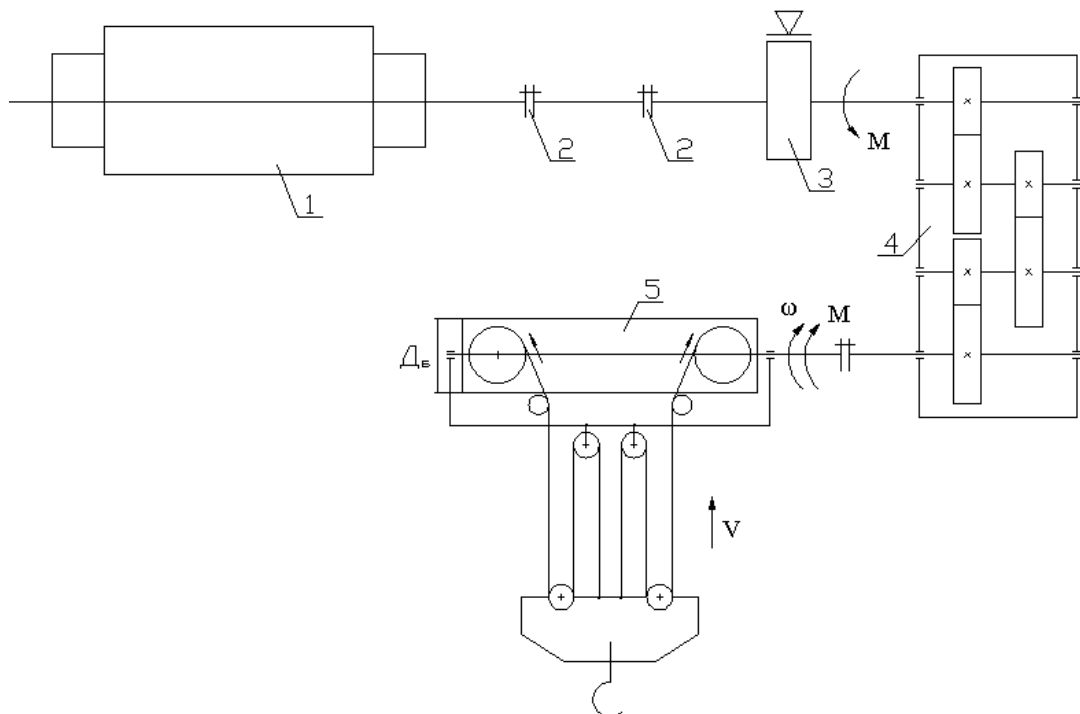


Рисунок 4- Кінематична схема механізму підйому крана: 1 двигун; 2 – муфта; 3 – гальмо; 4 – редуктор; 5 – барабан; 6 – поліспадна система
 Параметри механізму підйому крана наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри механізму підйому крана

Найменування, од. змін.	Позначення	Значення
Вантажопідйомність, т	$m_{гр}$	35
Маса вантажозахоплюючого пристрою, кг	$m_{у}$	6350
Висота підйому, м	h	28
Максимальна швидкість підйому, м/хв	$V_{макс}$	7,5
Барабан		
Діаметр навивки каната, мм	$D_{б}$	590
Довжина, мм	$L_{б}$	5040
Канат		
Діаметр, мм	$d_{кан}$	32
Довжина, м	$l_{кан}$	28
Розривне зусилля, кН	$F_{до макс}$	263
Поліспадна система		
Кількість блоків поліспаду	$a_{підлога}$	2
Число гілок каната поліспада	$i_{підлога}$	3
Редуктор		
Кількість ступенів редуктора		3
Передатна кількість редуктора	$i_{ред}$	71

1.2.1 Визначення додаткових параметрів механізму підйому

Максимальна кутова частота обертання барабана

$$\omega_{б.макс} = \frac{V_{б.макс}}{R_{б} \cdot 60} = \frac{2 \cdot V_{б.макс}}{D_{б} \cdot 60} = \frac{22,5}{0,59} = 1,2712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (1.1)$$

де $V_{б.макс} = i_{пол} \cdot V_{макс} = 3 \cdot 7,5 = 22,5 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$ - Максимальна лінійна швидкість

барабана.

Максимальна робоча кутова частота обертання двигуна

$$\omega_{р.макс} = \omega_{б.макс} \cdot i_{ред} = 1,2712 \cdot 71 = 90,25 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (1.2)$$

1.3 Обґрунтування застосування частотно-регульованого електроприводу

На багатьох сучасних виробничих підприємствах виникає потреба модернізації підйомного устаткування відповідності сучасним технічним стандартам. Сьогодні значна частина кранових установок оснащена

асинхронними двигунами із фазним ротором. Такі установки керуються через силові контролери або низьковольтні панелі керування.

Безперечна перевага цих систем полягає у простоті експлуатації, низькій вартості та зручності в ремонті. Однак вони мають ряд критичних недоліків:

- Високі енергетичні втрати внаслідок низьких значень коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) і ККД;

- часті поломки електродвигунів через перекоси в роторних ланцюгах, викликаних відмовами контакторів або втратою контактів у ланцюгах опорів.

Аналіз функціонування та оптимізації електроприводів кранового обладнання виявляє низку проблемних аспектів, характерних для традиційних способів керування. У тому числі відзначається різке зміна моменту двигунів, що зумовлює динамічним навантаженням вузлів крана, викликаним ступінчастим винятком опорів з роторної ланцюга. Недоліки включають також неможливість роботи в режимі посадкової швидкості механізмів підйому при використанні силових контролерів, відсутність функції силового спуску легких вантажів і порожнього гака в системах управління електроприводами, а також обмеження можливостей електричного гальмування механізму пересування. Крім того, відзначається низька довговічність релейних та контакторних пристроїв, а також значні енергетичні втрати при спуску та інтенсивному гальмуванні.

У разі індустріальної модернізації підприємства часто змінюють виробничі технології, розширюють асортимент продукції, і навіть переглядають планування виробничих і складських приміщень. При цьому спостерігається тенденція переведення кранів з кабінного керування на керування з підлоги із застосуванням радіоканалів. Однією з найефективніших способів модернізації електрообладнання кранів є використання системи управління з урахуванням частотно-регульованих електроприводів. Цей підхід надає безліч переваг:

- зниження енергоспоживання до 60%.
- Підвищення точності та якості регулювання швидкості.

- Плавний запуск та гальмування, що позитивно впливає на термін служби механічних компонентів, підвищує комфортність експлуатації та знижує ризик пошкодження вантажів.

- Економічність та надійність асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором у порівнянні з фазними роторами або двошвидкісними двигунами.

Сучасні перетворювачі частоти оснащені розвиненою системою діагностичного контролю, що відображає можливі помилки та збої на графічному інтерфейсі. Вбудовані функції, такі як керування гальмом, забезпечують автоматичну активацію гальма при досягненні необхідного моменту або зняття його при мінімальних швидкостях. Функція ваговимірювання дозволяє гнучко коригувати режими роботи згідно з вагою вантажу за допомогою зовнішнього датчика. Крім того, профілі розгону та гальмування S-подібною кривою сприяють рівномірному розподілу динамічних зусиль на всіх вузлах механізму, мінімізуючи розгойдування вантажу після зупинки. Електропривод здатний регулювати часові параметри запуску та гальмування виходячи із зовнішніх сигналів або заданої частоти перетворювача, забезпечуючи оптимальний режим керування конкретного механізму.

Функція позиціонування дозволяє використовувати кінцеві вимикачі, що підключаються безпосередньо до логічних входів перетворювача для попереднього подовження шляху гальмування або зниження швидкості. Крім того, векторне управління надає можливість встановити незалежне обмеження моменту як рухового, так і генераторного режиму.

Актуальним трендом у галузі технологічної модернізації електроприводів є використання модулів рекуперації. Перехід цей вид гальмування обумовлений енергетичною неефективністю традиційних резистивних систем. Стандартні методи реалізуються за допомогою підключених до кожного перетворювача частоти гальмівних резисторів, які трансформують енергію гальмування в теплову, збільшуючи вартість системи та погіршуючи її параметри

компонування. В результаті значне нагрівання резисторів призводить до марнотратного споживання енергії.

Застосування модулів рекуперації є альтернативою цьому підходу у випадках тривалої роботи приводу в генераторному режимі або при функціонуванні механізмів з великими значеннями гальмівної потужності, таких як підйомні системи або інерційні вузли. В даному випадку енергія гальмування повертається в мережу живлення, що забезпечує високу енергетичну ефективність пристрою.

З урахуванням розвитку технологій перетворювальної техніки поряд із зростанням цін на електроенергію використання рекуперативних модулів стає все більш затребуваним рішенням завдяки їх ключовим перевагам:

- Компактність конструкції.
- Спрощена процедура введення в експлуатацію без потреби у складному програмуванні.
- Можливість поєднання кількох перетворювачів частоти в єдину систему через ланку постійного струму.

2 ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ І РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ

2.1 Вибір електродвигуна та розрахунок параметрів

Для частотно-регульованих приводів широко застосовуються асинхронні електродвигуни із короткозамкненим ротором. У процесі модернізації кранових електричних приводів розробники та виробники часто використовують двигуни серії, спеціально призначені для кранового обладнання. Ці двигуни оснащуються роторами особливої конструкції, виконаними із сплавів із підвищеним електричним опором. Основне призначення таких рішень - забезпечення значного пускового моменту, що необхідне виконання частих запусків.

Однак для підтримки оптимального теплового режиму доводиться вживати додаткових заходів. Зокрема, знижується кратність пускових струмів, а також збільшується витрата активних матеріалів, що, зрештою, підвищує масу та вартість двигуна. При цьому стандартні ізоляційні системи та вузли підшипників серійних двигунів часто не розраховані на експлуатацію із частотними перетворювачами. Це стає причиною передчасних відмов: виходить із ладу статорна обмотка, перегріваються і пошкоджуються роторні стрижні, руйнуються підшипники та датчики положення, задіяні в приводах основних підйомних механізмів.

Таким чином, застосування традиційних електродвигунів призводить до нераціональної системи управління через необхідність використання більш потужних частотних перетворювачів і громіздких двигунів. Очевидно, що для ефективного та надійного функціонування частотно-регульованого приводу слід вибирати спеціалізовані електродвигуни.

З урахуванням даних факторів для механізму підйому крана обрано асинхронний електродвигун кранової серії з короткозамкненим ротором 4МТКМ225L6У2, спеціально адаптований для роботи спільно з перетворювачем частоти.

Структура умовного позначення:

- 4 – порядковий номер серії;
- МТ - позначення серії;
- М - модернізований;
- L - настановний розмір по довжині верстата;
- 6 – число пар полюсів;
- У2 - кліматичне виконання.

Технічні характеристики електродвигуна представлені таблиці 2.

Таблиця 2 - Технічні дані двигуна 4МТКМ225L6У2

Типорозмір двигуна	Потужність P_2 , КВт	Синхронна частота обертання n_0 , про/хв	При номінальному навантаженні		
			частота обертання n_H , про/хв	ККД η_H , %	$\cos\phi_H$
4МТКМ225L6У2	55	1000	940	87	0,822
M_{\max}	$M_{\text{пуск}}$	$I_{\text{пуск}}$	$J_{\text{дв.кг}\cdot\text{м}^2}$	Ступінь захисту	клімат. викон.
2200 Н·м	2100 Н·м	820 А	1,02	IP54	У2

Примітка:

1 Технічні характеристики наведено для основного режиму роботи S3 (ПВ = 40%).

2 Діапазон зміни частоти живлення – від 5 до 150 Гц.

2.1.2 Розрахункові параметри електродвигуна

Синхронна кутова частота обертання двигуна

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.1)$$

Номінальне ковзання двигуна

$$s_H = \frac{n_0 - n_{\text{НОМ}}}{n_0} = \frac{1000 - 940}{1000} = 0,06. \quad (2.2)$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{\text{двн}} = \frac{n_{\text{НОМ}}}{9,55} = \frac{940}{9,55} = 98,429 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.3)$$

Номінальний момент двигуна

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 1000}{\omega_{\text{дв.}}} = \frac{55000}{98,429} = 558,777 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.4)$$

Визначимо кратність максимального та пускового моменту двигуна

$$m_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{2200}{558,777} = 3,937; \quad (2.5)$$

$$m_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{2100}{558,777} = 3,758 \quad (2.6)$$

та кратність пускового струму

$$k_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{820}{115,404} = 7,105. \quad (2.7)$$

2.1.3 Визначення параметрів схеми заміщення електродвигуна на основі каталожних даних

Параметри схеми заміщення асинхронного електродвигуна, представлені на рисунку 5, обчислимо відповідно до методики, описаної в джерелі [9], і представимо їх у таблиці 3.

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, Гн	X_{μ} , Ом	X_k , Ом	L_{μ} , Гн
0,13	0,052	$166,3 \cdot 10^{-6}$	0,128	0,171	$225,7 \cdot 10^{-6}$	7,067	0,124	$22,4 \cdot 10^{-3}$

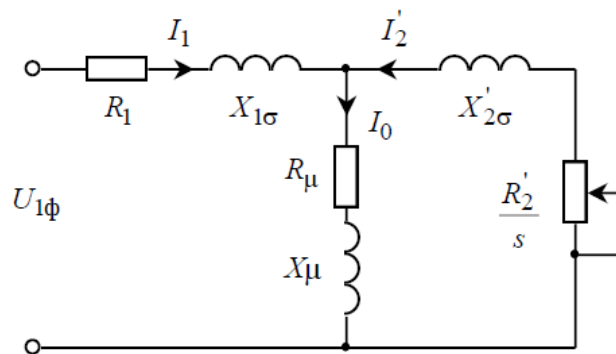


Рисунок 5– Схема заміщення асинхронного двигуна

Номинальний струм статора

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 1000}{3 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,87} = 115,404 \text{ А}. \quad (2.8)$$

Струм статора двигуна при частковому завантаженні

$$I_{11} = \frac{P_H \cdot p^*}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos\varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,822 \cdot 0,87} = 87,395 \text{ А.} \quad (2.9)$$

де p^* - коефіцієнт завантаження двигуна, приймаємо $p^* = 0,75$;

η_{p^*} - ККД при частковому завантаженні, приймаємо $\eta_{p^*} = \eta_H$.

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні, згідно [9, Рисунок 6]

$$\cos\varphi_{p^*} = 0,99 = \cos\varphi_H = 0,99 \cdot 0,83 = 0,822.$$

η_{p^*} –

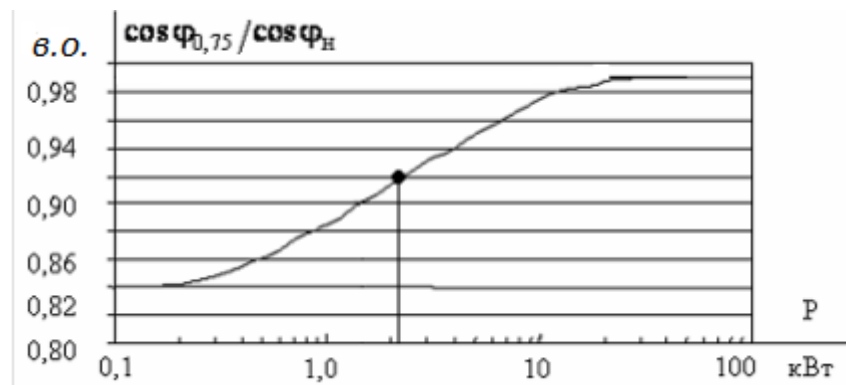


Рисунок 6– Залежність $\cos\varphi/\cos\varphi_H$ від потужності асинхронного двигуна

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p^* \cdot I_{1H} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p^* \cdot s_H} \right)^2}{1 - \left(p^* \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p^* \cdot s_H} \right)^2}} \quad (2.10)$$

$$= \sqrt{\frac{87,395^2 - \left(0,75 \cdot 115,404 \cdot \frac{1 - 0,06}{1 - 0,75 \cdot 0,06} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,06}{1 - 0,75 \cdot 0,06} \right)^2}} = 28,899 \text{ А.}$$

Критичне ковзання

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_M + \sqrt{k_M^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1)} \quad (2.11)$$

$$= 0,06 \cdot \frac{3,937 + \sqrt{3,937^2 - (1 - 2 \cdot 0,06 \cdot (3,937 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (3,937 - 1)} = 0,722.$$

де - коефіцієнт, значення якого знаходиться в діапазоні 0,6-2,5, приймаємо -1.

Визначимо коефіцієнти

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{28,899}{2 \cdot 7,105 \cdot 115,404} = 1,018; \quad (2.12)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_M \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,06)}{2 \cdot 1,018 \cdot 3,937 \cdot 55000} = 0,31. \quad (2.13)$$

Наведений активний опір обмотки ротора, перерахований щодо обмотки статора асинхронного двигуна.

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{0,31}{\left(1 + \frac{1}{0,722}\right) \cdot 1,018} = 0,128 \text{ Ом}. \quad (2.14)$$

Активний опір статорної обмотки можна визначити за таким виразом

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,018 \cdot 0,128 \cdot 1 = 0,13 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Визначимо параметр γ , який дозволить знайти індуктивний опір короткого замикання до X

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,722^2}\right) - 1^2} = 0,959, \quad (2.16)$$

Індуктивний опір обмотки статора може бути визначений за наступним виразом

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_K = 0,42 \cdot 0,124 = 0,052 \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

Індуктивність обмотки статора, обумовлена потоком розсіювання, у номінальному режимі

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,052}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 166,382 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

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

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_k}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,124}{1,018} = 0,071 \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

Індуктивний опір роторної обмотки, що наведена до статорної сторони, може бути обчислена з урахуванням параметрів машини та її конструкції.

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,071}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 225,787 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (2.20)$$

Індуктивність роторної обмотки, обумовлена розсіяним магнітним потоком, визначається в номінальному режимі та впливає на динаміку перехідних процесів.

Спираючись на векторну діаграму, електрорушійна сила гілки намагнічування E_1 , створювана магнітним потоком повітряного зазору в обмотці статора, в номінальному режимі відповідає певному значенню, що залежить від характеристик машини:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi_H - I_{1H} \cdot R_1)^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_H} - I_{1H} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,83 - 115,404 \cdot 0,13)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,83^2} - 115,404 \cdot 0,052)^2} = 204,226 \text{ В.} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Індуктивний опір контуру намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{204,226}{28,899} = 7,067 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

ґрунтується на результуючій індуктивності,

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{7,067}{2\pi \cdot 50} = 22,495 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

обумовленої магнітним потоком у повітряному зазорі. Цей потік створюється сумарним впливом струмів, що протікають через статор, що визначає індуктивність даного контуру.

Критичні параметри двигуна на природній характеристиці включають момент 2238,3 Нм і критичне ковзання.

$$M_K = 3 \cdot \frac{U_{1H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{[R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2]} \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_\mu^2} \right) \right)} =$$

$$= 3 \cdot \frac{220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot \left(0,13 + \sqrt{[0,13^2 + (0,052 + 0,171)^2]} \cdot \left(1 + \frac{0,13^2}{7,067^2} \right) \right)} = 2238,3 \text{ Н} \cdot \text{м};$$
(2.24)

Ковзання

$$s_K = R_2' \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1^2}{X_\mu^2} + 1}{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = 0,128 \cdot \sqrt{\frac{\frac{0,13^2}{7,067^2} + 1}{0,13^2 + (0,052 + 0,171)^2}} = 0,713.$$
(2.25)

Номинальний електромагнітний момент двигуна

$$M_{эм} = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left(X_K^2 + \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right] \right)}$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,128}{104,712 \cdot 0,06 \cdot \left(0,124^2 + \left[\left(0,13 + \frac{0,128}{0,06} \right)^2 + \left(0,13 + \frac{0,128}{0,06 \cdot 7,067} \right)^2 \right] \right)} = 577,261 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$
(2.26)

Також розглядається момент, викликаний силою тертя, що впливає вал електродвигуна.

$$M_c = M_{эм} - M_{дв.н} = 577,261 - 558,771 = 18,484 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$
(2.27)

2.1.4 Розрахунок та побудова природної механічної та електромеханічної характеристик електродвигуна

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна розраховується за словами:

$$M(S, f_1) = \frac{3 \cdot \left[U_{1\Phi H}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot S \cdot \left(\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot \left[220^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 \right]^2 \cdot 0,128}{104,712 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left(\left(0,124 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(0,13 + \frac{0,128}{s} \right)^2 + \left(\frac{0,13 \cdot 0,128}{s \cdot 7,067 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right)}; \quad (2.28)$$

$$\omega(s, f) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1-s).$$

Природна механічна характеристика двигуна $\omega=f(M)$ при $f_1 = f_{1H} = 50$ Гц наведена на Рисунок 7.

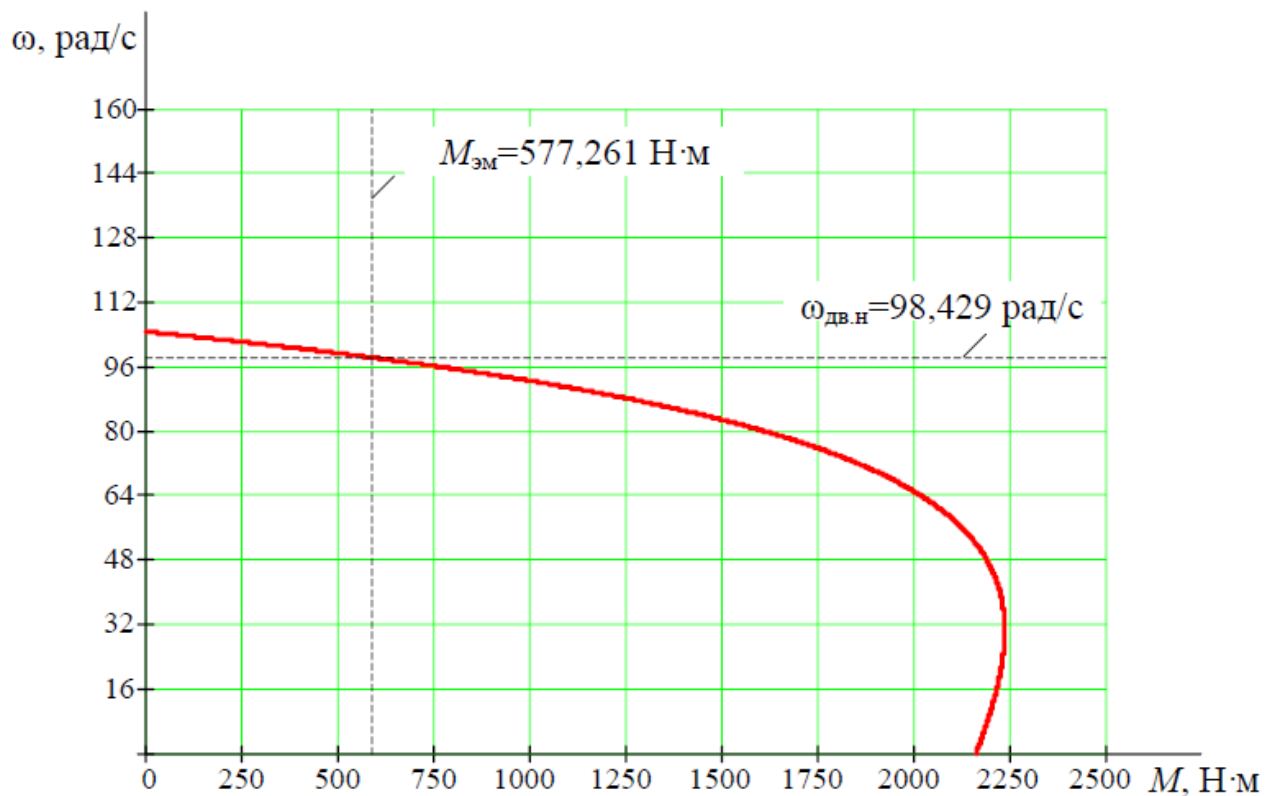


Рисунок 7- Природна механічна характеристика

За результатами розрахунку механічної характеристики знайдено значення електромагнітних моментів двигуна: номінального $M_{\text{ем.н}} = 577,261 \text{ Н}\cdot\text{м}$; пускового $M_{\text{ем.п}} = 2163,834 \text{ Н}\cdot\text{м}$; критичного $M_{\text{ем.к}} = 2244,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $\omega_{\text{к}} = 31,697 \text{ рад/с}$.

За отриманими результатами визначаємо

- Кратність пускового моменту

$$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{эм п}}}{M_{\text{эм н}}} = \frac{2163,834}{577,261} = 3,748;$$

- кратність максимального (критичного) моменту

$$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{эм к}}}{M_{\text{эм н}}} = \frac{2244,8}{577,261} = 3,878;$$

- Критичне ковзання

$$s_{\text{к}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{к}}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 31,697}{104,7} = 0,697.$$

Природні електромеханічні характеристики двигуна $I_1(s, f_1)$, $I_2(s, f_1)$ розраховуються за виразами:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin\varphi_2(s, f_1)}; \quad (2.29)$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{\text{к}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}}\right)^2}} = \quad (2.30)$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}} = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{0,13^2 + (0,052 + 7,067)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}}; \quad (2.31)$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_K \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(0,13 + \frac{0,128}{s}\right)^2 + \left(0,124 \cdot \frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{0,13 \cdot 0,128}{s \cdot 7,067 \cdot \frac{f_1}{50}}\right)^2}};$$
(2.32)

За результатами розрахунку рисунку 8 побудовані природні електромеханічні характеристики, $\omega=(I_1)$, $\omega=(I_2')$ при Гц 50 .

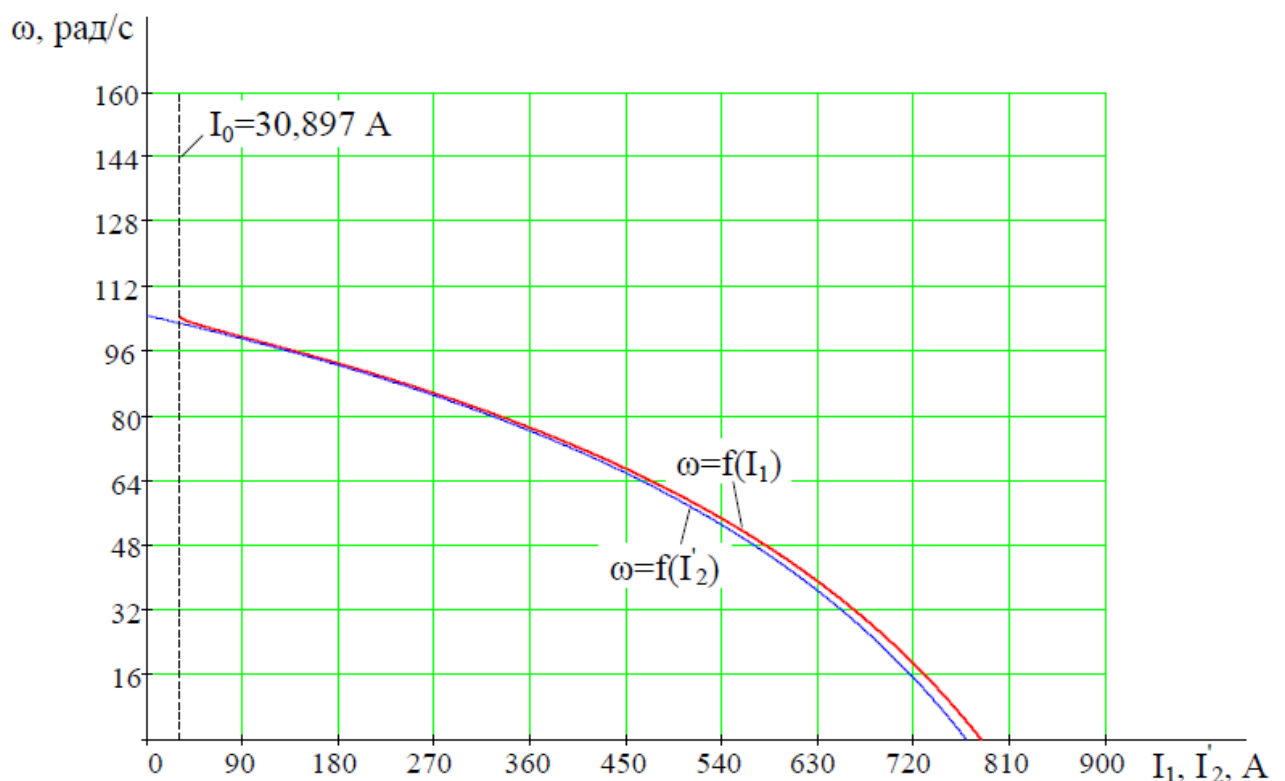


Рисунок 8– Природні електромеханічні характеристики $\omega(I_1)$, $\omega(I_2')$

В результаті розрахунку електромеханічної характеристики $\omega(I)$ були визначені наступні значення: струм холостого ходу (намагнічування) склав $I_0=30,897$ А, номінальний струм $I_n=103,734$ А, а пусковий струм двигуна досяг $I_n=783,318$ А.

За отриманими результатами визначаємо кратність пускового струму

$$k_i = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{н}}} = \frac{783,318}{103,734} = 7,5.$$

Параметри розрахункових механічних та електромеханічних характеристик двигуна показали високий рівень відповідності довідковим даним, наведеним у таблиці 1.

2.2 Механічна система електроприводу підйому

Розрахункова схема механічної системи електроприводу підйому є двомасовою системою, представленою на Рисунок 9, де прийняті такі позначення:

1. J_1 – момент інерції двигуна та механізму;
2. J_2 - момент інерції мас, що піднімаються;
3. $M_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент двигуна;
4. M_c – момент опору типу сухого тертя на валу першої маси;
5. $M_{\text{с.нав}}$ - момент навантаження, що розвивається вантажем, активний за характером;
6. $c_{\phi 12}$ - Еквівалентна кутова жорсткість;
7. $b_{\text{в}12}$ - еквівалентний коефіцієнт внутрішнього демпфування.

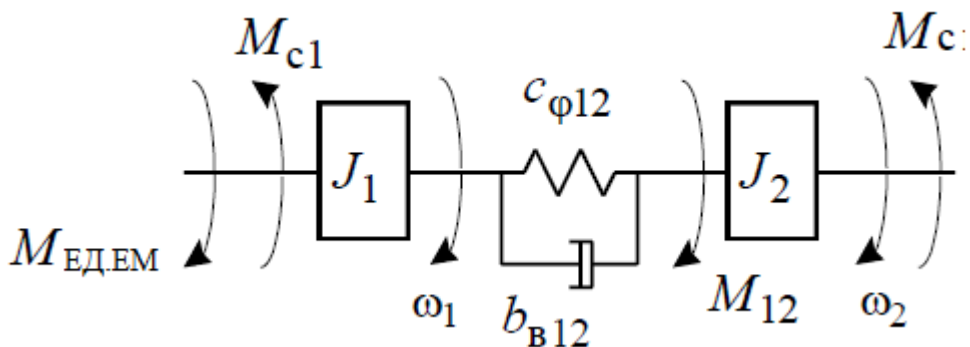


Рисунок 9- Розрахункова схема механічної системи приводу підйому

2.2.1 Параметри елементів механічної системи приводу

Момент інерції на валу першої маси

$$J_1 = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} + J_{\text{дв}} + J_{\Gamma} + J_{\text{пер}} = 1,02 + 0,153 + 0,102 + 1,275 \text{ кг м}^2; \quad (2.33)$$

де $J_{\text{дв}} = 1,02 \text{ кг м}^2$ момент інерції двигуна;

$J_{\Gamma} = 0,15 \cdot 1,02 = 0,153 \text{ кг м}^2$ момент інерції гальма;

$J_{\text{пер}} = 0,1 \cdot 1,102 = 0,102 \text{ кг м}^2$ момент інерції передачі.

Момент інерції мас, що піднімаються при підйомі максимального вантажу.

$$J_{\text{мл}} = m_y \cdot \left(\frac{D_{\text{б}}}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{\text{ред}}^2 \cdot i_{\text{пол}}^2} = 6350 \cdot \left(\frac{0,59}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{71^2 \cdot 3^2} = 0,01218 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (2.34)$$

Момент інерції каната

$$J_{\text{кан}} = m_{\text{кан}} \cdot \left(\frac{D_{\text{б}}}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{\text{ред}}^2 \cdot i_{\text{пол}}^2} = 175,648 \cdot \left(\frac{0,59}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{71^2 \cdot 3^2} = 0,00033692 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.35)$$

Маса каната

$$m_{\text{кан}} = 2 \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot s_{\text{кан}} \cdot l_{\text{кан}} = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 4,021 \cdot 10^{-4} \cdot 28 = 175,648 \text{ кг} \quad (2.36)$$

$$\rho_{\text{ст}} = (7,7 - 7,9) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \text{приймаємо сталі, вага питома } \rho_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

площа перерізу дротів

$$s_{\text{кан}} = \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{кан}}}{2}\right)^2 \cdot k_{\text{зап}} = \pi \cdot \left(\frac{32 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot 0,5 = 4,021 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (2.37)$$

Момент інерції на валу другої маси під час підйому максимального вантажу

$$J_{2\text{мін}} = J_{\text{м2}} + J_{\text{кан}} = 0,07932 + 0,00033692 = 0,0796528 \text{ кг м}^2, \quad (2.38)$$

Лінійна жорсткість підйомного каната (у нижньому положенні)

$$c_l = a_{\text{пол}} \cdot i_{\text{пол}} \cdot \frac{c_{\text{кан}}}{l_{\text{кан}}} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{5,027 \cdot 10^7}{28} = 1,077 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (2.39)$$

де $c_{\text{кан}} = E_{\text{кан}} \cdot s_{\text{кан}} = 1,25 \cdot 10^{11} \cdot 4,021 \cdot 10^{-4} = 5,027 \cdot 10^7 \text{ Н}$ - Жорсткість одного погонного метра каната;

$E_{\text{кан}} = (1,1 - 1,4) \cdot 10^{11}$ - каната, сталевого для гості модуль упру, приймаємо
 $E_{\text{кан}} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$,

Наведена кутова жорсткість (у нижньому положенні)

$$c_{12} = c_l \cdot \left(\frac{D_6}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2} \cdot \frac{1}{i_{Пол}^2} = 1,077 \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{0,59}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{71^2} \cdot \frac{1}{3^2} = 20,661 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}} \quad (2.40)$$

Мінімальне значення кутової частоти резонансних коливань ДМС

$$\omega_{12} = \sqrt{c_{12} \cdot \frac{J_1 + J_{2\text{макс}}}{J_1 \cdot J_{2\text{макс}}}} = \sqrt{20,661 \cdot \frac{1,275 + 0,0796528}{1,275 \cdot 0,0796528}} = 16,601 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.41)$$

Коефіцієнт внутрішнього демпфування (у нижньому положенні)

$$b_{в12} = \frac{\lambda_{в} \cdot c_{12}}{\pi \cdot \omega_{12}} = \frac{(0,1 \div 0,2) \cdot 20,661}{\pi \cdot 16,601} = 0,0396156 \div 0,0792311 \quad (2.42)$$

Приймаємо $b_{в12} 0,1$

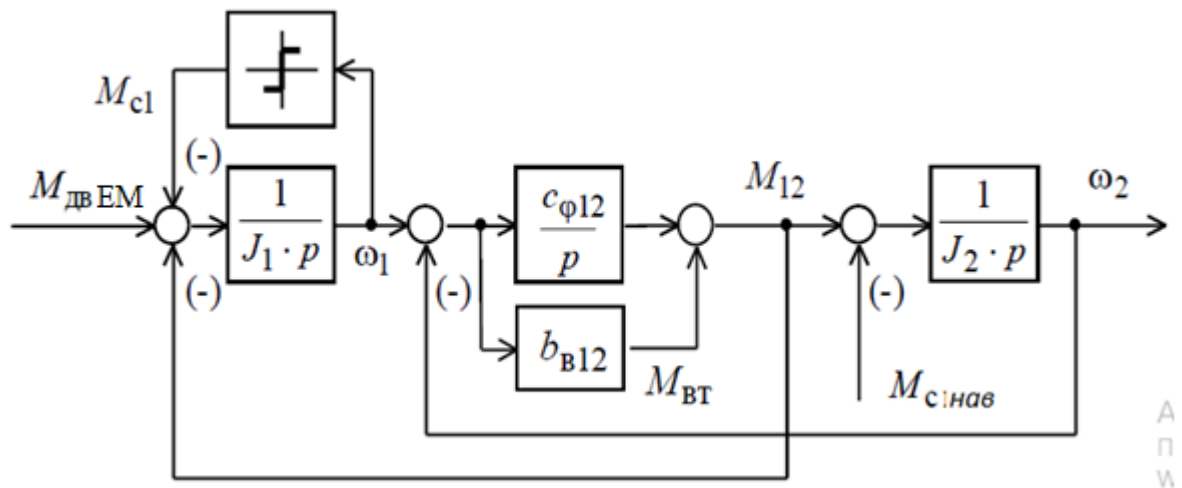


Рисунок 10– Структурна схема двомасової механічної системи електроприводу механізму підйому

2.3 Визначення заданої сфери роботи

Момент опору на валу двигуна

$$M_{с.дв.} = M_{см} + M_{дв.н.} = 577,261 + 558,777 = 18,484 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

ККД передачі в номінальному режимі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

$$\eta_{пер.н.} = \eta_{кан} \cdot \eta_{укл} \cdot \eta_{ред} = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,84 = 0,81, \quad (2.43)$$

де $\eta_{кан} = 0,98$ ККД блоку канатної передачі; $\eta_{кул} = 0,98$ ККД канатоукладача; $\eta_{ред} = 0,84$ – ККД триступінчастого редуктора.

Коефіцієнти постійних та змінних втрат

$$a = b = \frac{1 - \eta_{\text{пер.н.}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер.н.}}} = \frac{1 - 0,81}{2 \cdot 0,81} = 0,11728. \quad (2.44)$$

Приведений до валу двигуна момент, обумовлений вантажем
– при максимальному вантажі

$$M_{\text{гр.макс}} = \frac{(G_{\text{гр}} + G_{\text{у}}) \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}} = \frac{(343350 + 62293,5) \cdot 0,59}{2 \cdot 71 \cdot 3} = 561,8 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.45)$$

де $G_{\text{гр}} = m_{\text{гр}} \cdot g = 35000 \cdot 9,81 = 343350 \text{ Н}$ – вага вантажу максимальна; $G_{\text{у}} = m_{\text{у}} \cdot g = 6350 \cdot 9,81 = 62293,5 \text{ Н}$ – вага вантажозахоплювального пристрою;

– при порожньому гаку

$$M_{\text{гр.мин}} = \frac{G_{\text{гр}} \cdot D_{\text{б}}}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}} = \frac{62293,5 \cdot 0,59}{2 \cdot 71 \cdot 3} = 86,27 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.46)$$

Момент постійних втрат у механізмі

$$M_{\text{с.пост}} = a \cdot M_{\text{гр.макс}} = 0,11728 \cdot 561,8 = 65,89 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.47)$$

Момент тертя на валу першої маси двомасової електромеханічної системи
при максимальному вантажі

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} = 18,484 + 65,89 = 84,375 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.48)$$

Статичні моменти

– при підйомі максимального вантажу

$$M_{\text{с1макс}} = M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} + (1 + b) \cdot M_{\text{гр.макс}} = 18,484 + 65,89 + (1 + 0,11728) \cdot 561,8 = 712,073 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.49)$$

– під час підйому порожнього вантажозахоплюючого пристрою

$$M_{\text{с1мин}} = M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} + (1 + b) \cdot M_{\text{гр.мин}} = 18,484 + 65,89 + (1 + 0,11728) \cdot 86,27 = 180,769 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.50)$$

– при спуску максимального вантажу

$$M_{\text{с2макс}} = -M_{\text{с.дв.}} - M_{\text{с.пост}} + (1 - b) \cdot M_{\text{гр.макс}} = -18,484 - 65,89 + (1 - 0,11728) \cdot 561,8 = 411,541 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.51)$$

– при спуску порожнього вантажозахоплюючого пристрою

$$\begin{aligned}
 M_{c2\text{МИН}} &= -M_{c.\text{ДВ.}} - M_{c.\text{ПОСТ}} + (1 - b) \cdot M_{\text{ГР.МИН}} = \\
 &= -18,484 - 65,89 + (1 - 0,11728) \cdot 86,27 = -8,219 \text{ Н} \cdot \text{М};
 \end{aligned}
 \tag{2.52}$$

Задана область роботи наведена на рисунку 11.

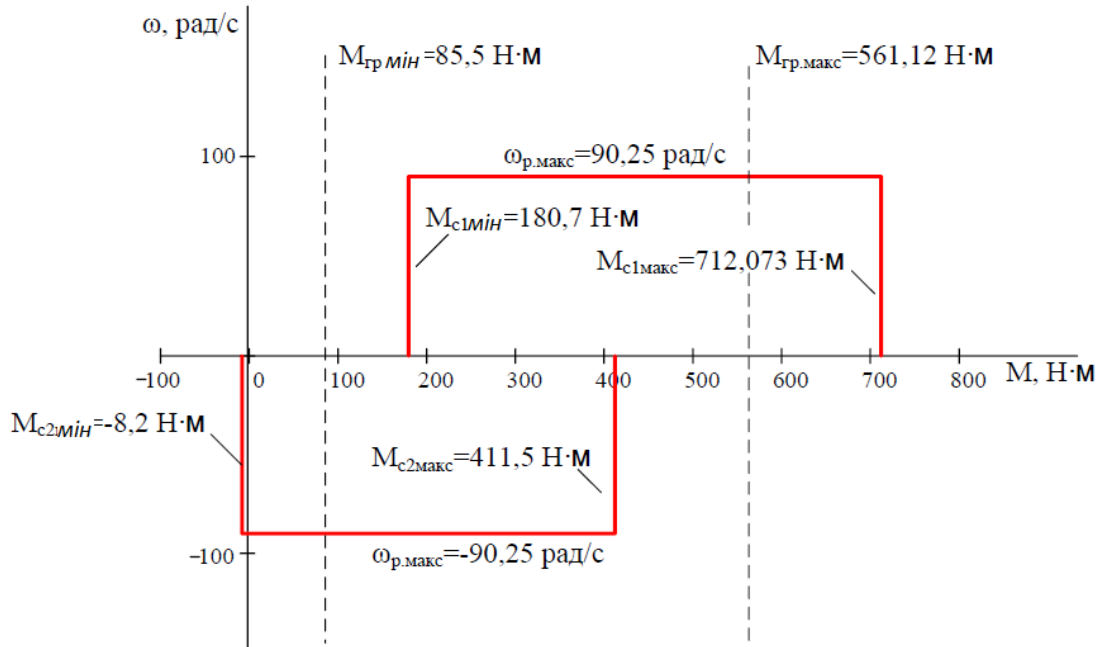


Рисунок 11– Задана область роботи електроприводу

2.4 Розрахунок граничних характеристик розімкнutoї системи перетворювач частоти - асинхронний двигун (ПЧ-)

2.4.1 Визначення максимальної та мінімальної частоти інвертора

Максимальну робочу частоту інвертора, що відповідає максимальній робочій швидкості $\omega = \omega_{p.\text{макс}} = 90,254 \text{ рад/с}$ при максимальному навантаженні $M = M_{c1\text{макс}} = 712,073 \text{ Н} \cdot \text{м}$, визначаємо шляхом рішення щодо частоти f_1 рівняння

$$M = \frac{3 \cdot \left[U_{1\text{ФН}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} \right)^2 \right]^2 \cdot R'_2}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} - \omega \right) \cdot \left[\left(X_{\text{кН}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} - \omega} \cdot \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{Н}}} \right)^2 \right]};
 \tag{2.53}$$

Приймаємо найближче значення частоти інвертора $f_{i.\text{макс}} = 47 \text{ Гц}$.

Мінімальну робочу частоту інвертора визначаємо за умови забезпечення заданого діапазону регулювання швидкості $D=10:4,7$ Гц

Приймаємо $f_{\text{мін}} = 5$ Гц.

2.4.2 Розрахунок механічних та електромеханічних характеристик розімкнутої системи

Механічна характеристика $M = f(s, f_1)$ для розімкнутої системи перетворювача частоти (ПЧ) та асинхронного двигуна () при частотному регулюванні була розрахована з використанням виразу (53) для значення вихідної частоти інвертора $f_1 = f_{\text{макс}} = 47$ Гц і представлена на Рисунок 12.

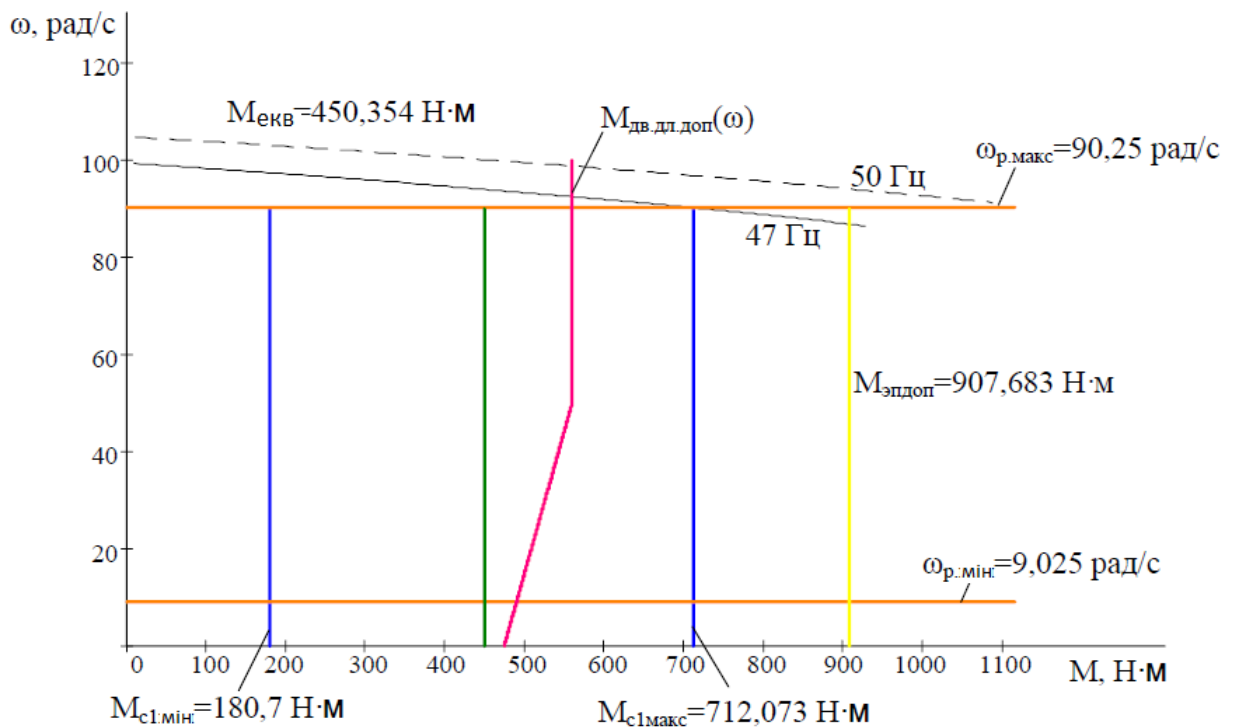


Рисунок 12– Механічні характеристики розімкнутої системи електроприводу та навантаження

Електромеханічна характеристика $I_1 = f(s, f_1)$ розімкнутої системи ПЧ-АД при частотному регулюванні розрахована з використанням виразів формул для частоти $f_1 = f_{\text{макс}} = 47$ Гц. Результати наведені Рисунок 13 як графіка залежності $\omega = f(I_1)$.

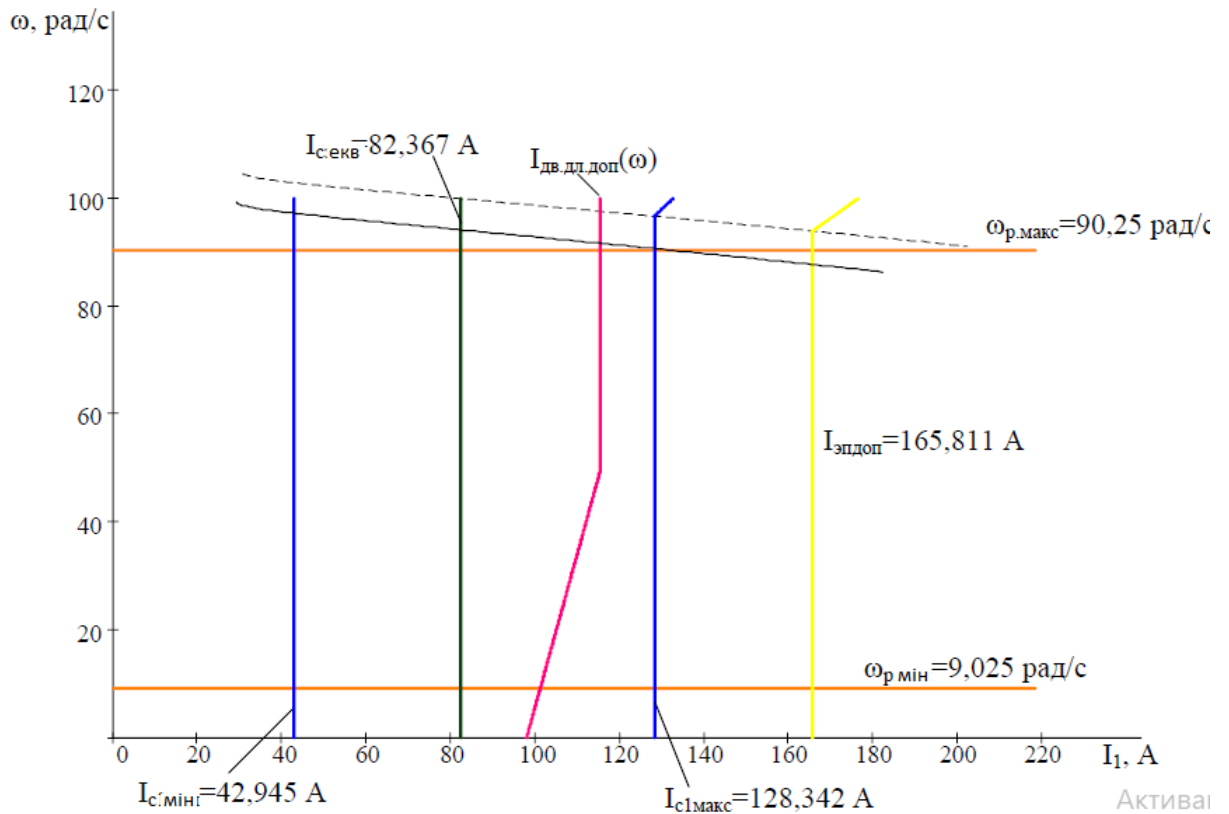


Рисунок 13– Електромеханічні характеристики розімкнутої системи електроприводу та навантаження

2.4.3 Перевірка правильності вибору електродвигуна

Розраховані та побудовані в площині механічних характеристик $\omega = f(M)$ (Рисунок 13) наступні характеристики:

- характеристика максимального статичного моменту при підйомі максимального вантажу $M_{c1макс}(\omega) = \text{const} = 712,073 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- характеристика мінімального статичного моменту при підйомі мінімального вантажу $M_{c1мін}(\omega) = \text{const} = 180,769 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- характеристика еквівалентного статичного моменту $M_{c1екв}(\omega) = \text{const} = M_{c1макс} \cdot \text{ПВ} = 712,073 \cdot 0,4 = 450,354 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$$M_{c1екв}(\omega) = \text{const} = M_{c1макс} \cdot \sqrt{\text{ПВ}} = 712,073 \cdot \sqrt{0,4} = 450,354 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.54)$$

де $\text{ТВ} = 0,4$ - тривалість включення [6];

– характеристика максимального динамічного моменту електроприводу, $M_{\text{сп.доп}}(\omega) = \text{const}$, розрахована з умови обмеження прискорення на допустимому рівні:

$$M_{\text{сп.доп}}(\omega) = \text{const} = M_{\text{с1макс}} + M_{\text{дин.доп}} = 712,073 + 195,61 = 907,683 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де $a_{\text{доп}} = 0,2-0,3 \text{ м} / \text{с}^2$ - допустиме прискорення, приймаємо $a_{\text{доп}} = 0,2 \text{ м} / \text{с}^2$

$$M_{\text{дин.доп}}(\omega) = J_{\text{э}} \cdot a_{\text{доп}} \cdot \frac{\omega_{\text{раб макс}}}{V_{\text{макс}}} = 1,355 \cdot 0,2 \cdot \frac{90,25 \cdot 60}{7,5} = 195,61 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.55)$$

- Характеристика тривало допустимого моменту двигуна

$$M_{\text{дв.дов.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,85 + \frac{0,15 \cdot \omega}{0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}} \right), \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \quad (2.56)$$

$$M_{\text{дв.дов.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}}, \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega < \omega_{\text{дв.н}}.$$

На площині електромеханічних характеристик $\omega = f(I_1)$ були розраховані та побудовані наступні залежності:

$$I_{\text{с1макс}}(\omega) = \text{const} = 128,342 \text{ А},$$

– Характеристика статичного струму $I_{\text{с1макс}}$ за умови $\omega = \text{const} = 128,342 \text{ А}$, що відповідає значенню статичного моменту для підйому максимального вантажу. Ця характеристика визначена з використанням виразів для частоти $f_1 = f_{1н} = 50 \text{ Гц}$ при ковзанні $s = 0,7675$, отриманому в результаті розв'язання рівняння при моменті $M = M_{\text{с1макс}} = 712,073 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

$$M = \frac{3 \cdot U_{\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}; \quad (2.57)$$

– Статичний струм $I_{\text{с1мін}}(\omega) = \text{const} = 42,9 \text{ А}$, що відповідає статичному моменту при підйомі мінімального вантажу, розрахований за формулами при частоті ($f_1 = f_{1н} = 50 \text{ Гц}$) та значенні ковзання ($s = 0,01731$), $M_{\text{с1мін}} = 180,769 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

– Еквівалентний статичний струм $I_{\text{с.екв}}(\omega) = \text{const} = 82,367\text{А}$, відповідний еквівалентному статичному моменту, розрахований за формулами при частоті $f_1 = f_{1н} = 50\text{ Гц}$ та значенні ковзання $s = 0,04525$, н. $M_{\text{с.екв}} = 450,354\text{ Н м}$.

– Характеристика тривало допустимого струму двигуна $I_{\text{дв.дл.доп}}$, при (ω) (продовження цього пункту не завершено і вимагає уточнення).

$$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,85 + \frac{0,15 \cdot \omega}{0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}} \right), \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}}, \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega < \omega_{\text{дв.н}}.$$

Характеристика максимально допустимого струму електроприводу:

Максимально допустимий струм електроприводу визначається як стала величина: $I_{\text{сп.доп}}(\omega) = \text{const} = 165,811\text{ А}$. Цей параметр відповідає максимальному динамічному моменту, розрахованому на основі виразів. Розрахунок виконаний при фіксованій частоті $f_1 = f_{1н} = 50\text{ Гц}$ і ковзанні $s = 0,10305$, визначеному рішенням рівняння (2.54) для $M = M_{\text{сп.доп}} = 907,683\text{ Н} \cdot \text{м}$.

Аналіз механічних та електромеханічних характеристик електроприводу та навантаження (представлених на рисунках 12 та 13) показує, що обраний асинхронний частотно-регульований привід відповідає заданому діапазону регулювання швидкості.

2.5 Вибір перетворювача частоти

Для кранових частотно-регульованих електроприводів потрібні спеціалізовані перетворювачі частоти, адаптовані до роботи з підйомними кранами. Вони повинні мати такі функціональні можливості:

-Функція управління гальмом**: забезпечує видачу сигналу на відкриття гальма при досягненні двигуном необхідного моменту, що крутить, і на накладення гальма при зниженні швидкості до мінімуму. При цьому може використовуватися функція ваговимірювання для коректного зняття гальма.

- Функція підйому з підвищеною швидкістю**: максимальна швидкість автоматично визначається залежно від маси вантажу, що піднімається.

- Функція обмеження моменту двигуна^{**}: формує необхідні механічні характеристики як у руховому, так і у генераторному режимах.

- Функція завдання темпу розгону та гальмування^{**}: дозволяє точно регулювати динамічні параметри системи.

- Функція гальмування з використанням гальмівного резистора^{**} або блоку рекуперації енергії: застосування модулів рекуперації забезпечує економічний ефект при збільшенні потужності електроприводів, різних гальмуваннях інерційних механізмів, а також при опусканні важких вантажів на велику глибину, наприклад, у ліфтах або шахтних витягах. Однак з урахуванням існуючої думки щодо низької ефективності рекуперації в системах зі струмом споживання до 100 А [8], а також високої вартості модулів рекуперації та складності їх впровадження, було прийнято рішення використати гальмівний резистор.

2.5.1 Параметри перетворювача частоти

З урахуванням висунутих вимог було обрано перетворювач частоти Dyna-Hoist V (vector) 55 F 34-A, розроблений спеціально для кранового електроприводу. Розшифровка умовного позначення:

- 55 - вихідна потужність (кВт);
- F - напруга живлення 380-500 В;
- 34 – серія;
- A – наявність зовнішнього резистора.

Детальні параметри вибраного перетворювача частоти наведено в таблиці 4:

Таблиця 4 – Параметри перетворювача частоти

Тип	Параметри живильної мережі		Вихідна частота	Вихідний струм	
	$U_{1л}$, В	f_c , Гц	f_i , Гц	I_{in} , А	$I_{in\ max}$, А (60 с)
Dyna-Hoist 55 F 34 A	380-500	50/60	0-120	150	225

Загальні технічні дані перетворювача частоти серії Dyna-Hoist V

(vector) 55 F 34-A:

- мережа живлення: $(380-500) \pm 10\%$; $(50-60)$ Гц $\pm 5\%$, 3 фази;
- перевантаження по струму: $2,5 I_n$ - протягом 2 с;
- Діапазон регулювання швидкості;
- Розімкнена система, векторне управління $s_n = 100\%$;
- замкнута система, векторне керування $0 \div 100\%$;
- максимальна похибка підтримки частоти обертання (розімкнена система) $0,01 \cdot \omega_n$ у діапазоні швидкостей $0,1 \cdot \omega_n < \omega \leq \omega_n$ та $1/3 \cdot s_n$ у діапазоні швидкостей $0,1 \cdot \omega_n$. Інші блоки: порт послідовного зв'язку RS485.

Захисту:

- електронний тепловий захист двигуна від навантаження $2,8 \cdot I_{дв.н}$;
- Тепловий захист перетворювача;
- Контроль напруги проміжного ланцюга постійного струму;
- захист перетворювача від короткого замикання на клеммах двигуна;
- Захист від втрати фази відключенням перетворювача;
- захист від несправності заземлення на клеммах двигуна.

Навколишнє середовище:

- максимальна відносна вологість (5-93)%;
- температура навколишнього середовища від мінус 40 до плюс 60 °С;
- максимальна висота над рівнем моря 1000 м-коду.

2.5.2 Перевірка правильності вибору перетворювача

На Рисунок 14 у площині електромеханічних характеристик побудовані характеристики навантаження та характеристики перетворювача частоти

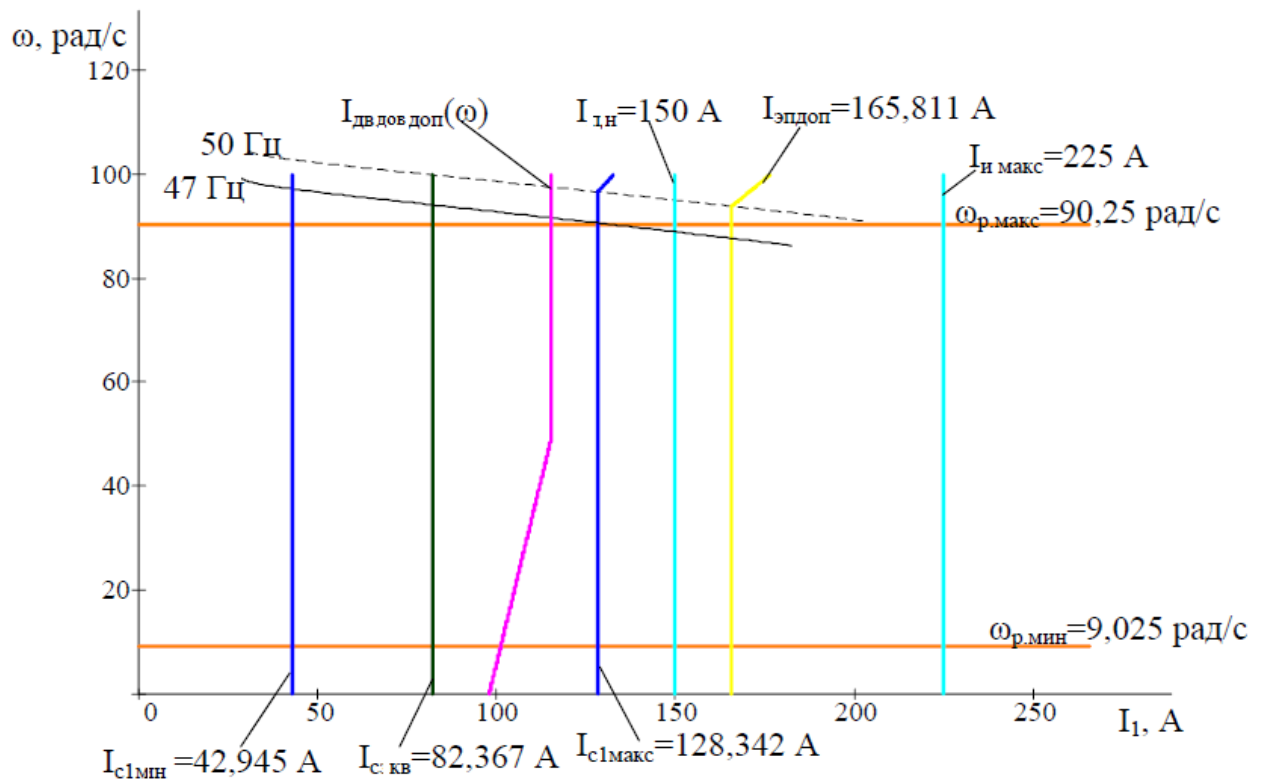


Рисунок 14– Електромеханічні характеристики розімкнутої системи електроприводу, перетворювача та навантаження

Умови перевірки правильності вибору перетворювача частоти ін еків

$$I_{с.екв}(\omega) < I_{інв};$$

$$I_{с1макс}(\omega) < I_{і.макс};$$

$$I_{еп.доп}(\omega) < I_{і.макс};$$

Аналіз електромеханічних характеристик розімкнутої системи електроприводу, а також характеристик частотного перетворювача та навантаження, представлених на Рисунок 14 демонструє виконання всіх трьох умов. Отже, вибір перетворювача є коректним.

2.5.3 Перевірка забезпечення заданої сфери роботи

Характеристики, представлені на Рисунок 15, підтверджують, що за заданих умов електропривод із частотним регулюванням успішно забезпечує необхідну область роботи.

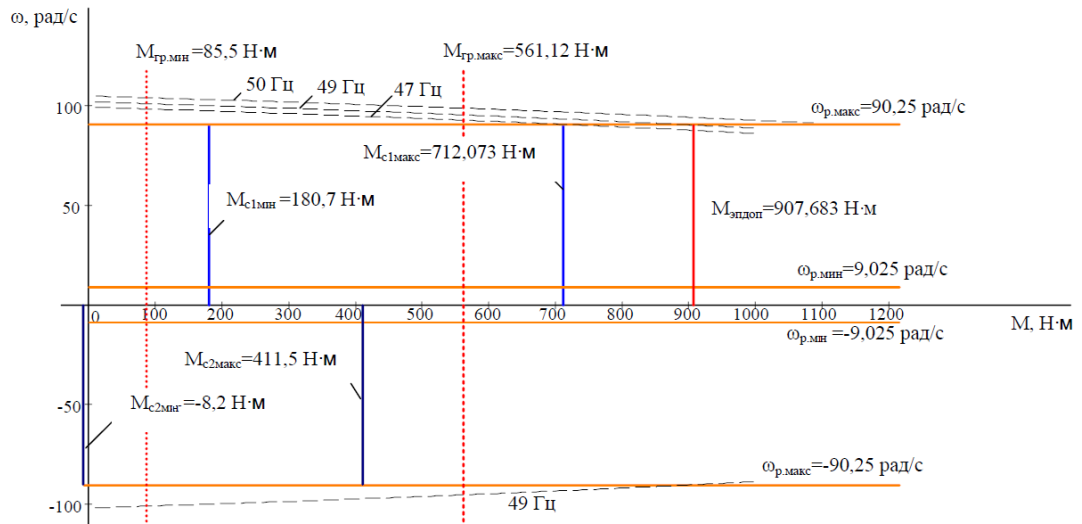


Рисунок 15– Механічні характеристики розімкнутої системи електроприводу при частотному регулюванні та характеристики навантаження

2.6 Структурна схема силового каналу електроприводу

Структурна схема силового каналу безперервної лінеаризованої системи ПЧ-АТ в системі координат, що обертається, орієнтованої по результуючого вектору потокосцеплення ротора, представлена на Рисунок 16 . На вході перетворювача даної схеми керованими сигналами служать напруги постійного струму. У свою чергу, вихідні напруги перетворювача виражаються через складові напруги статора U_{1d} і U_{1q} , представлені в ортогональній системі координат d і q , яка орієнтована за результуючим вектором потокосцеплення ротора $d2\Psi$.

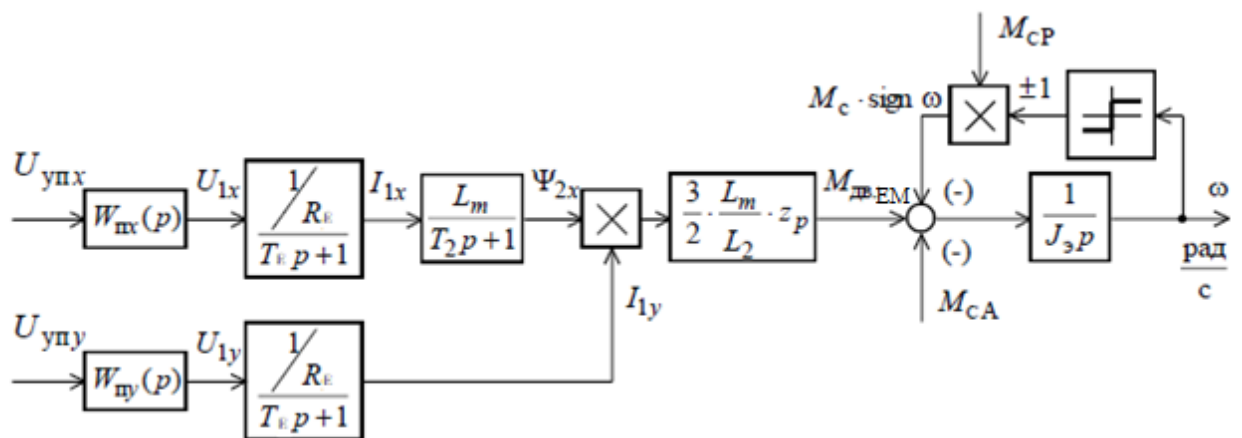


Рисунок 16- Представляє структурну схему силового каналу системи ПЧ-, виконану в двофазній системі координат, що обертається.

Ця система орієнтована за результуючим вектором потокозчеплення ротора, а також передбачає компенсацію внутрішніх перехресних зворотних зв'язків.

2.6.1 Розрахунок параметрів елементів структурної схеми силового каналу електроприводу

Розрахунок параметрів перетворювача

Максимальне значення коефіцієнта посилення перетворювача

$$k_H = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\Phi\Phi}}{U_{уп\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,113, \quad (2.58)$$

де $U_{уп\max}$ – максимальне значення напруги управління, приймаємо $U_{уп\max} = 10\text{В}$.

Еквівалентна постійна часу перетворювача

$$T_H = \frac{0,5}{f_{ш\text{им}}} = \frac{0,5}{8000} = 62,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \quad (2.59)$$

де $f_{ш\text{им}}$ – частота інвертора, що несе, Гц. Приймаємо $f_{ш\text{им}} = 8 \text{ кГц}$.

Розрахунок параметрів двигуна

Еквівалентні індуктивності обмоток

- Статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 0,166 \cdot 10^{-3} + 0,02249 = 0,02266 \text{ Гн}; \quad (2.60)$$

- Ротора

$$L_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,255 \cdot 10^{-3} + 0,02249 = 0,022721 \text{ Гн}. \quad (2.61)$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = \frac{0,02249^2}{0,2266 \cdot 0,022721} = 0,01721. \quad (2.62)$$

Еквівалентний опір

$$R_E = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 0,13 + 0,128 \cdot \frac{0,2249^2}{0,022721^2} = 0,255 \text{ Ом}. \quad (2.63)$$

Електромагнітні постійні часу

$$T_{\Sigma E} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_E} = \frac{0,01721 \cdot 0,02266}{0,255} = 1,5297 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (2.64)$$

2.7 Визначення максимального моменту при підйомі та спуску в системі векторного управління, максимального прискорення та максимального зусилля в канаті

Номинальний потік двигуна

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu} = \sqrt{2} \cdot 30,8 \cdot 0,02249 = 0,983 \text{ Вб}. \quad (2.65)$$

Максимальний момент електроприводу, який визначається максимальним струмом інвертора $I_{\text{макс}}$, в системі векторного управління

$$\begin{aligned} M_{\text{эп.в.макс1}} &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{макс}}^2 - I_0^2} \cdot \Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2} = \\ &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{225^2 - 30,8^2} \cdot 0,983 \cdot \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,02249}{0,022721} = 1380,238 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (2.66)$$

Динамічний момент електроприводу у системі векторного управління

– при підйомі максимального вантажу

$$M_{\text{дин.в}} = M_{\text{эп.в.макс1}} - M_{\text{с1макс}} = 1380,238 - 712,073 = 668,165 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.67)$$

– при підйомі мінімального вантажу

$$M_{\text{дин.в.макс}} = M_{\text{эп.в.макс1}} - M_{\text{с1мін}} = 1380,238 - 180,769 = 1199,469 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.68)$$

Необхідний максимальний момент електроприводу в системі векторного управління при пуску з умови забезпечення рівності динамічних моментів під час підйому та спуску

$$M_{\text{эп.в.макс2}} = M_{\text{дин.в}} + M_{\text{с2макс}} = 668,165 + 411,541 = 1079,706 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.69)$$

Максимально допустимий струм у векторній системі управління при спуску

$$I'_{1\text{умакс}} = \frac{M_{\text{эп.в.макс2}}}{\Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_{\mu}}{L_2}} = \frac{1079,706}{0,983 \cdot \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,02249}{0,022721}} = 246,56 \text{ А}. \quad (2.70)$$

Максимально допустиме значення струму при постійному струмообмеженні $I_{\text{епмакс}} = \text{const}$

$$I_{у.макс} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{нмакс}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{225^2 - 30,8^2} = 315,184 \text{ А.} \quad (2.71)$$

Прискорення підйому максимального вантажу

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{макс} &= \frac{M_{дин.в}}{J_{\text{э}}} = \frac{668,165}{1,355} = 493,266 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \\ a_{макс} &= \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{макс} \cdot \frac{V_{макс}}{\omega_{макс}} = 493,266 \cdot \frac{7,5}{90,25 \cdot 60} = 0,683 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \end{aligned} \quad (2.72)$$

Час розгону під час підйому максимального вантажу

$$t_p = \frac{V_{макс}}{a_{макс}} = \frac{7,5}{60 \cdot 0,683} = 0,183 \text{ с.} \quad (2.73)$$

Максимальне зусилля у канаті

$$F_k = \frac{F_{\text{б}}}{a_{\text{пол}}} = \frac{M_{\text{б}}}{\left(\frac{D_{\text{б}}}{2} \right) \cdot a_{\text{пол}}} = \frac{M_{\text{эп.в.макс1}} \cdot i_{\text{ред}}}{\left(\frac{D_{\text{б}}}{2} \right) \cdot a_{\text{пол}}} = \frac{1380,238 \cdot 71}{\left(\frac{0,59}{2} \right) \cdot 2} = 166,096 \cdot 10^3 \text{ Н,} \quad (2.74)$$

тобто. при вибраному максимальному прискоренні $a_{макс} = 0,683 \text{ м/с}^2$ максимальне зусилля в канаті не перевищує значення розривного зусилля (див. таблицю1):

$$F_k < F_{k.макс}$$

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

3.1 Аналіз нелінійної сау електроприводу з одномасовою механічною системою

Структурну схему нелінійної САУ частотно-регульованого електроприводу механізму підйому крана наведено на рисунку 30. Структурну схему малюнка 31 складено на підставі структурної схеми лінеаризованої САУ електроприводу та враховує наступні основні нелінійності елементів системи керування електроприводу:

Насичення регуляторів струму, потокозчеплення та швидкості

$$U_{pc \text{ макс}} = \pm 10 \text{ В}, U_{p\psi \text{ макс}} = \pm 10 \text{ В}, U_{rc \text{ макс}} = \pm 10 \text{ В};$$

- Обмеження напруги завдання на струм $U_{zсмакс} = 10 \text{ В};$

- Обмеження вихідної напруги інвертора

$$E_i = \pm 2 \cdot U_{1\phi n} = \pm 2 \cdot 220 = \pm 311,127 \text{ В};$$

– момент опору типу сухого тертя (реактивний характером)

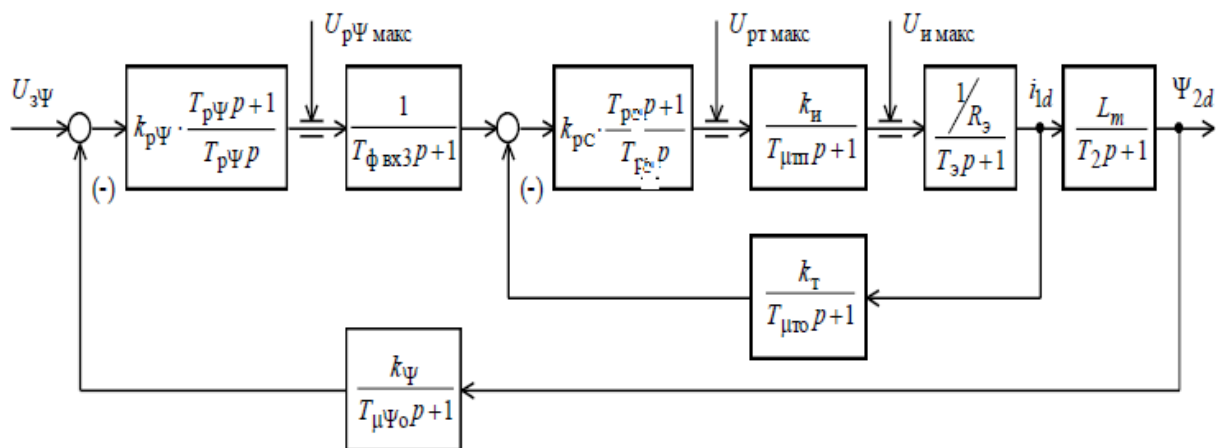
$$M_c(\omega) = M_c \cdot \text{sign}\omega,$$

$$\text{де } M_c = M_{сдв} + M_{пост} = 18,485 + 65,89 = 84,375 \text{ Н м.}$$

3.2 Контур потокозчеплення

Структурна схема контуру потокозчеплення наведена наРисунок 17.

Параметри елементів контуру потокозчеплення зведені до таблиці 5.



3

Рисунок 17– Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення

Таблиця 5 – Параметри елементів контуру потокозчеплення

$U_{з\psi}, \text{У}$	$k_{p\psi}$	$T_{p\psi}, \text{з}$	$k_{\Psi}, \text{В/Вб}$	$T_{\mu\Psi}, \text{з}$	$T_{\Phi}, \text{вх}^{\circ}\text{з}$	k_{pT}	$T_{pT}, \text{з}$	$k_T, \text{В/А}$	$T_{\mu T}, \text{з}$
10	4,982	0,00079	12,283	0,002	0,000333	0,366	0,00152	0,04316	0,000333
$T_{\mu T}, \text{з}$	$R_e, \text{Ом}$	$T_e, \text{з}$	$L_m, \text{Гн}$	$T_2, \text{з}$	$\Psi_{2дн}, \text{Вб}$	$U_{p\psi}, \text{макс}^{\circ}\text{У}$	$U_{pT}, \text{макс}^{\circ}\text{У}$	$E_{та}, \text{макс}^{\circ}\text{У}$	k_i
0,0000625	0,255	0,001529	0,0224	0,178	0,814	± 10	± 10	$\pm 311,12$	31,11

За структурною схемою Рисунок 17 набирається імітаційна модель контуру потокозчеплення. До складу імітаційної моделі Рисунок 18 входять суперблоки:

- Контур струму;
- регулятора струму;
- регулятора потокозчеплення.

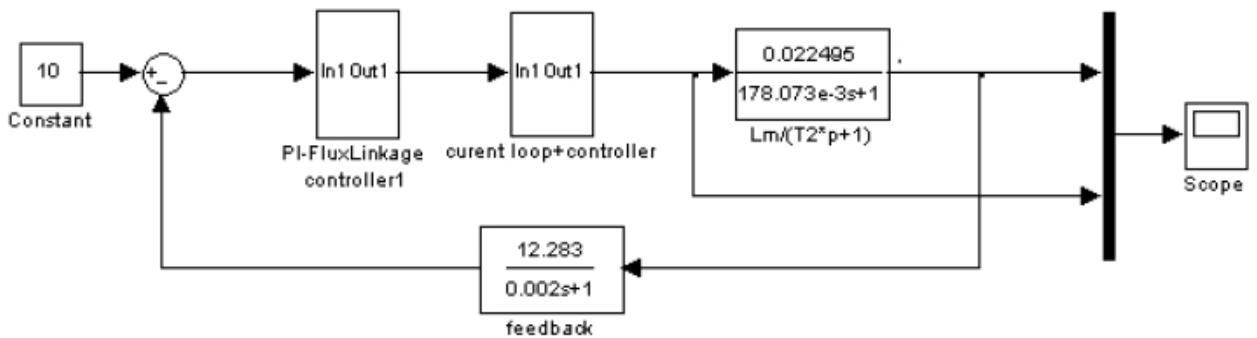


Рисунок 18– Схема набору імітаційної моделі контуру потокозчеплення. Програма імітаційних досліджень контуру потокозчеплення включає оцінку процесу формування номінального значення потокозчеплення двигуна. На рисунку наведено часові діаграми зміни струму намагнічування $I_{1d}(t)$ і потокозчеплення $\Psi_{d2}(t)$ при ступінчастому завданні керування на вході контуру $U_{з\psi}=10 \text{ В}$.

Процес формування потокозчеплення двигуна характеризується такими кількісними показниками:

- значення потокозчеплення $\Psi_{2д} = \Psi_{2н} = 0,814 \text{ Вб}$, що встановилося;
- статична помилка відпрацювання заданого значення потокозчеплення $\Delta\Psi|_{t=0} = 0$;

– час досягнення значення $0,95\Psi_{2d\text{ст}\cdot\tau_1(5)} = 0,29\text{ с}$.

Внутрішній контур струму забезпечує обмеження максимального значення струму на рівні $I_{1d\text{макс}} = I_{1q\text{макс}} = 231,6\text{ А}$ і значення струму, що встановилося, дорівнює $I_{1d\text{ст}} = 2 \cdot I_0 = 2 \cdot 25,5 = 36,1\text{ А}$.

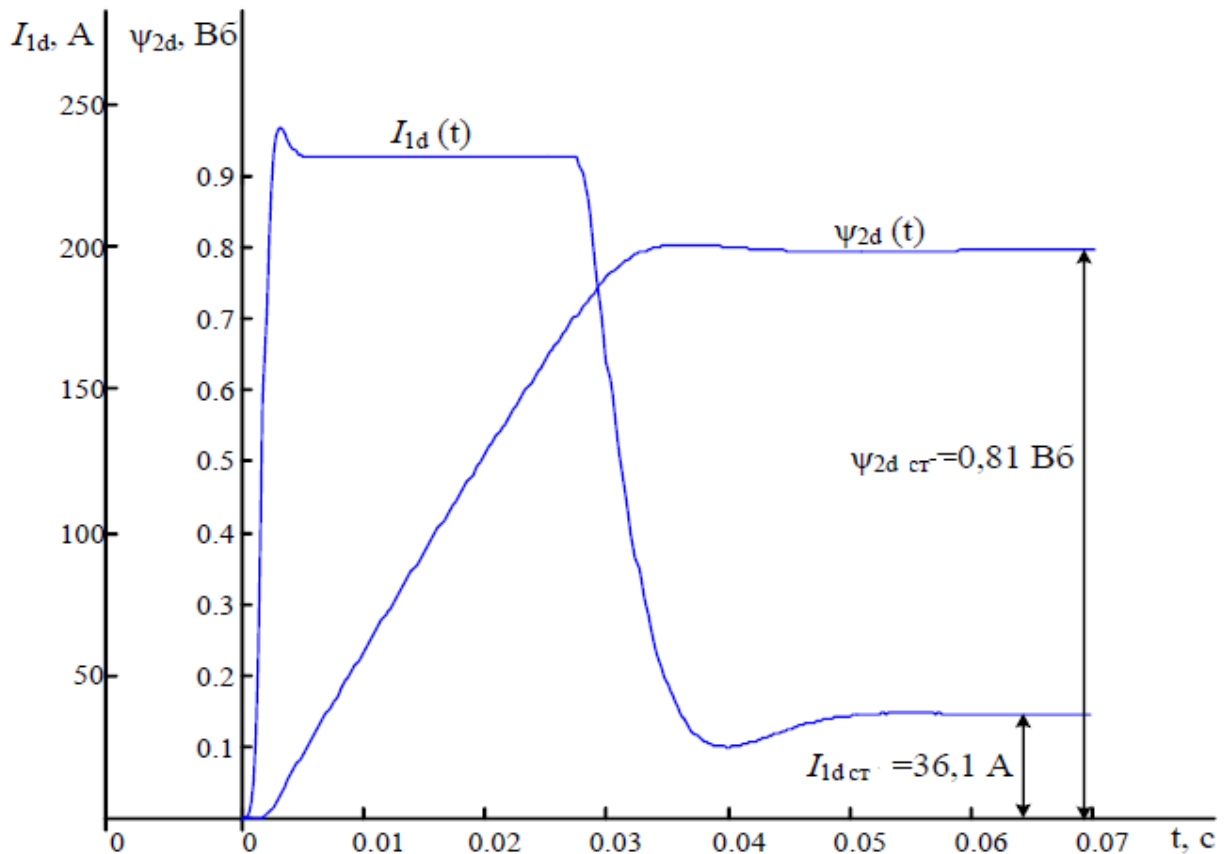


Рисунок 19 – Перехідні процеси в контурі потокозчеплення при $U_{3\psi} = 10\text{ В}$

3.3 Контур швидкості

Структурну схему контуру швидкості наведено на рисунку 27. Параметри елементів контуру швидкості зведено в таблиці 6. За структурною схемою малюнка 27 набирається імітаційна модель контуру швидкості, представлена на рисунку 28.

До складу імітаційної моделі малюнка 28 входять суперблоки:

- Контур струму (рисунок 23);
- регулятора швидкості (рисунок 29);
- Механічної системи приймального пристрою (рисунок 30).

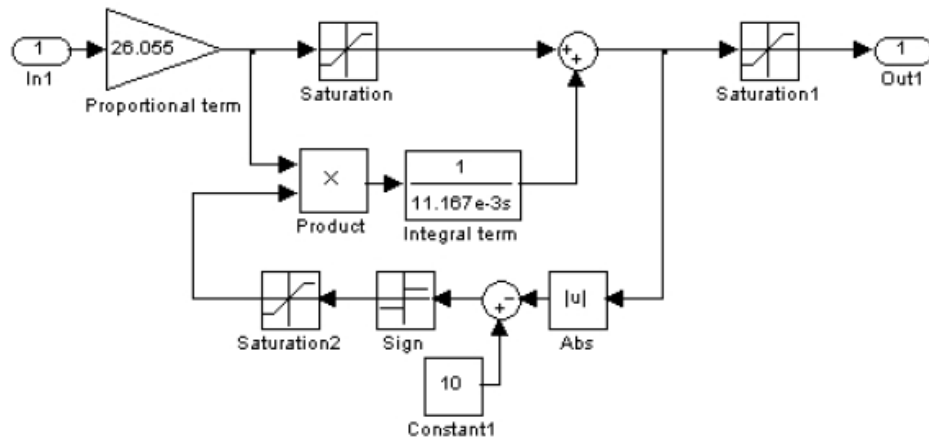


Рисунок 22– Схема набору імітаційної моделі регулятора швидкості

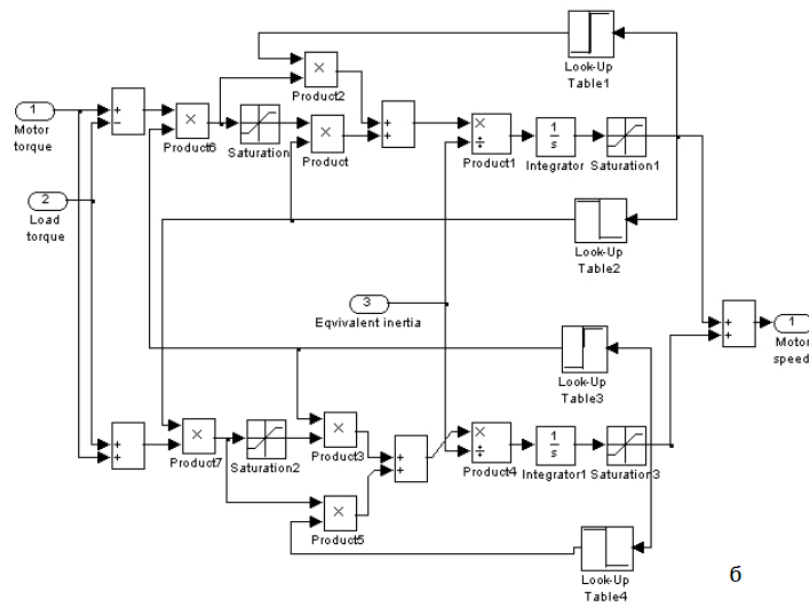


Рисунок 23– Схема набору імітаційної моделі механічної системи: а – суперблок; б – схема набору моделі

Обмежити крутний момент двигуна у пускових режимах можна за рахунок використання задатчика інтенсивності швидкості у вхідному ланцюзі управління електроприводом. Найпростіший варіант такого пристрою – лінійний задатчик швидкості. Його використання дозволяє забезпечити постійний темп зміни швидкості (збільшення при розгоні або зменшення при гальмуванні), що означає підтримку постійного прискорення або уповільнення електроприводу. Це досягається за рахунок збереження постійного значення динамічного моменту електроприводу.

У разі електромагнітний момент двигуна, і навіть його максимальне значення, безпосередньо залежить від рівня статичного моменту навантаження. Застосування задатчика інтенсивності з S-подібною характеристикою дозволяє додатково обмежувати другу похідну швидкості, тобто темп зміни динамічного моменту. Це забезпечує підвищення плавності перехідних процесів у системі електроприводу.

Модель задатчика інтенсивності з S-подібною характеристикою виконана в аналоговому варіанті з максимальним значенням вхідної та вихідної напруги 10 В. Імітаційна схема такого задатчика представлена на рисунку 36 згідно джерела [7]. Параметри системи були визначені на підставі розрахунків, наведених у розділі 2.7, та для неї вибрано такі характеристики:

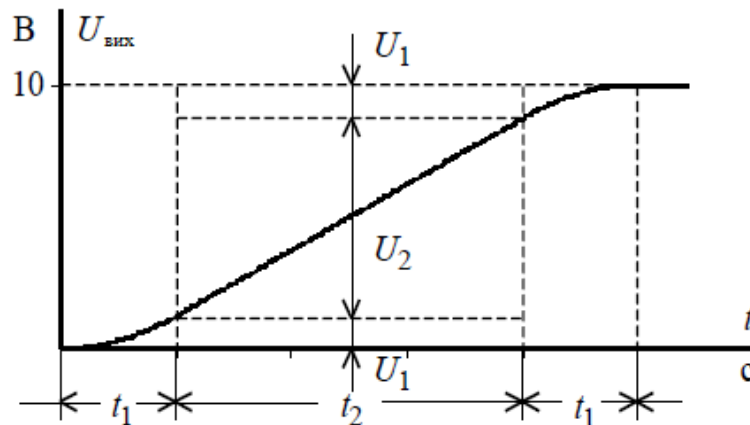


Рисунок 24 – Часова характеристика s – образного задатчика інтенсивності

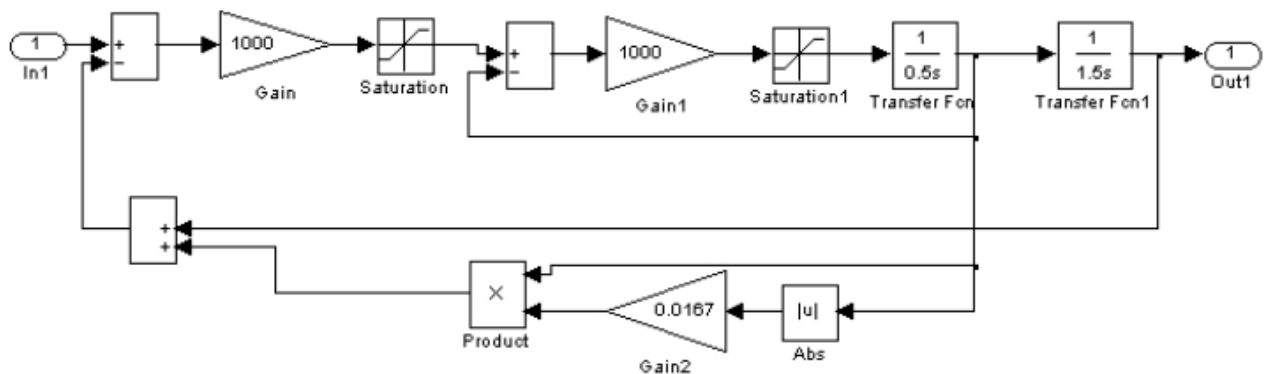


Рисунок 25 – Імітаційна модель задатчика інтенсивності з s – подібною характеристикою: а – суперблок; б – схема набору моделі

3.4 Імітаційні дослідження частотно-регульованого асинхронного електроприводу механізму підйому крана

Імітаційне моделювання роботи електроприводу механізму підйому крана проводиться з метою оцінки його функціональності в ключових технологічних режимах. Серед них: запуск на будь-яку робочу швидкість, підйом із певною швидкістю, гальмування, зупинка в електричному режимі гальмування, запуск із фіксованою швидкістю, а також гальмування та повна зупинка в електричному режимі гальмування.

У процесі імітаційних досліджень розглянуто такі режими роботи системи електроприводу:

- Ваговимірювання та формування завдання на струм у режимі підйому та спуску;
- пуск електроприводу на задану робочу швидкість підйому вантажу;
- гальмування та зупинка електроприводу при підйомі;
- пуск електроприводу на задану робочу швидкість спуску;
- гальмування та зупинка електроприводу при спуску вантажу.

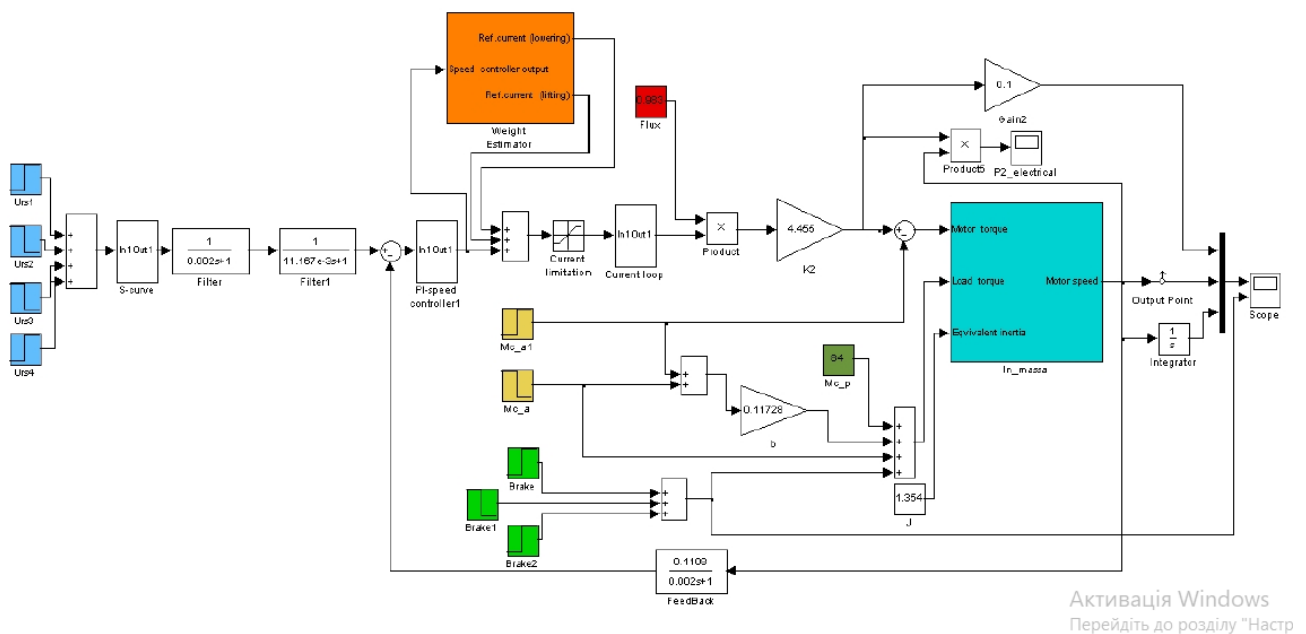


Рисунок 26– Імітаційна модель нелінійної САУ РЕП механізму підйому крана, набрана у середовищі Simulink/Matlab

Як приклад на Рисунок 27 і Рисунок 28 наведено відпрацювання електроприводом підйомного механізму прийнятого циклу при підйомі та спуску максимального вантажу та порожнього вантажозахоплювального пристрою відповідно.

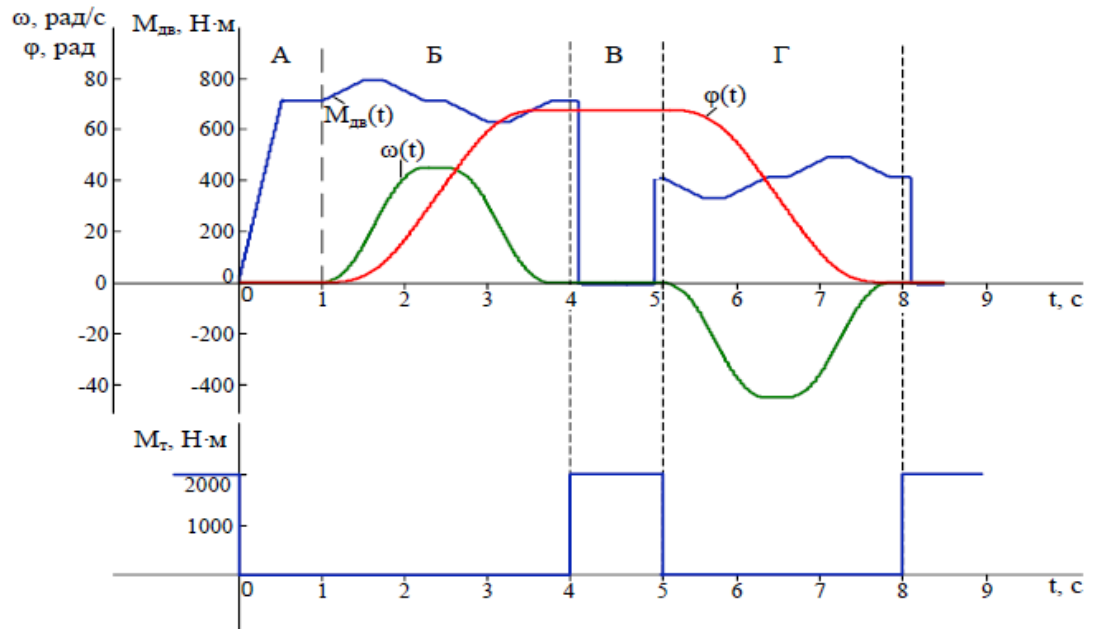


Рисунок 27– Результати імітаційних досліджень відпрацювання електроприводом механізму підйому заданого циклу під час підйому/спуску максимального вантажу

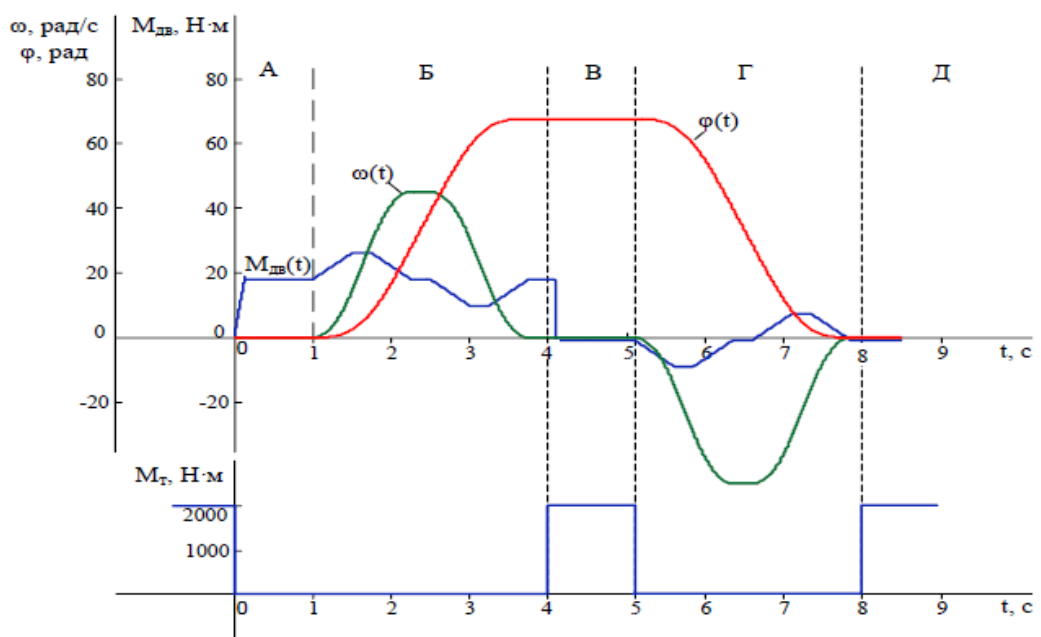


Рисунок 28– Результати імітаційних досліджень відпрацювання електроприводом механізму підйому заданого циклу при підйомі/спуску порожнього

вантажозахоплюючого пристрою $M_{гр.хв} 86,275 \text{ Нм}$, $U_{зс} 5 \text{ В}$: ваговимірювання; Б - підйом; В – пауза; Г – спуск

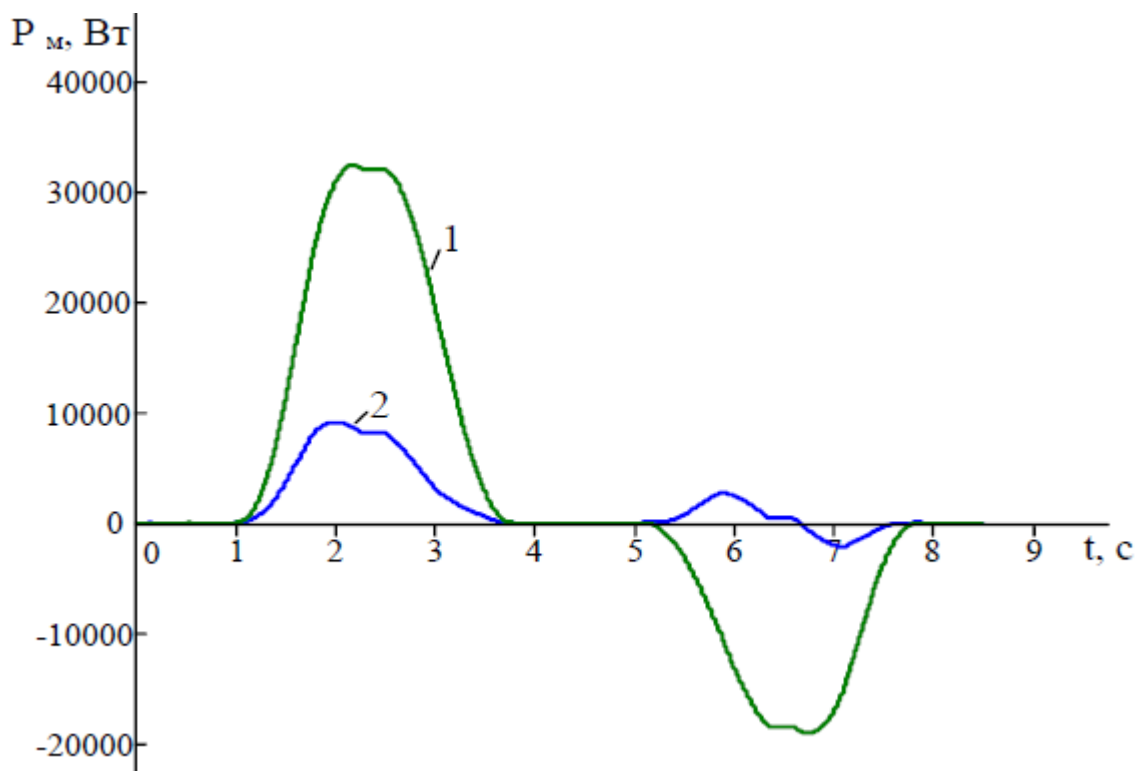


Рисунок 29– Графіки електромагнітної потужності В 5 зс U_1 – при підйомі/спуску максимального вантажу $M_{гр}$.

наРисунок 29представлені графіки електромагнітної потужності, що передається від статора до ротора під час підйому, а також від ротора до статора при спуску, з урахуванням електричних втрат та втрат у сталі. Ці графіки дають можливість визначити потужність, яка споживається з мережі, а також ту, яка повертається у ланку постійного струму.

Висновки: Результати проведених імітаційних досліджень підтверджують, що асинхронний частотно-регульований електропривод з векторним керуванням забезпечує необхідний діапазон регулювання швидкості механізмів підйому крана. Перехідні процеси протікають плавно, у своїй дотримуються обмеження динамічний момент, струми двигуна і перетворювача. Тривалість пуску та електричного гальмування електроприводу піддається регулюванню шляхом коригування значення постійного часу завдання швидкості.

3.5 Розрахунок гальмівного резистора

Середня потужність гальмування при спуску вантажу

$$\begin{aligned} P_{\text{ср}} &= (m_{\text{гр}} + m_{\text{у}}) \cdot g \cdot \frac{v_{\text{макс}}}{60} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{инв}} = \\ &= (3500 + 6300) \cdot 9,81 \cdot \frac{7,5}{60} \cdot 0,87 \cdot 0,81 \cdot 0,94 = 33548 \text{ Вт}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

Максимальна потужність при спуску вантажу

$$\begin{aligned} P_{\text{ср}} &= (m_{\text{гр}} + m_{\text{у}}) \cdot (g + a_{\text{макс}}) \cdot g \cdot \frac{V_{\text{макс}}}{60} \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{инв}} + \frac{J_{\text{э}} \cdot \omega_{\text{р.макс}}^2}{2 \cdot t_{\text{торм}}} = \\ &= (3500 + 6300) \cdot (9,81 + 0,683) \cdot 9,81 \cdot \frac{7,5}{60} \cdot 0,87 \cdot 0,81 \cdot 0,94 + \frac{1,354 \cdot 90,25^2}{2 \cdot 2} = \\ &= 38685,7 \text{ Вт}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$s_{\text{талм}} = t_1 = 2 \text{ с}$ - час розгону / гальмування по S - образної характеристики наведеної на рисунку.

Необхідна потужність гальмівного резистора

$$P_{\text{треб}} = \frac{P_{\text{ср}} \cdot t_{\text{сп}} + P_{\text{макс}} \cdot t_{\text{торм}}}{t_{\text{цикла}}} = \frac{33542 \cdot 224 + 38685,7 \cdot 2}{570} = 13335,3 \text{ Вт}, \quad (3.3)$$

Опір гальмівного резистора

$$R_{\text{торм}} = \frac{U_{\text{дмакс}}^2}{P_{\text{макс}}} = \frac{650^2}{38685,7} = 10,91 \text{ Ом}. \quad (3.4)$$

Вибір гальмівного резистора здійснюється зі стандартного ряду у бік більшого опору, ніж розрахункове значення.

3.6 Розробка та дослідження моделей електроприводу з урахуванням шим напруги

3.6.1 Розробка моделі електроприводу з урахуванням ШІМ напруги інвертора

У розрахунку вихідної напруги інвертора, що використовує ШІМ, передбачається синусоїдальна система керування з додаванням третьої гармоніки. Технічні характеристики асинхронного двигуна наведено в таблиці 2, а його довідкові та розрахункові параметри описані у розділах 2.2 та 2.3. Параметри перетворювача частоти розглядаються у розділі 2.5, тоді як дані механічної системи електроприводу представлені у розділах 2.2 та 2.3.

Функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним векторним управлінням та інвертором напруги на основі ШІМ демонструється на Рисунок 30. Імітаційну модель електричної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун» показано на рисунках 42 та 43.

При розробці моделі електроприводу замість традиційного аналогового керуючого сигналу $U_{зад} = 10$ використовується одиничний вплив, позначений як $1 \text{ зад} = N$ в умовних одиницях.

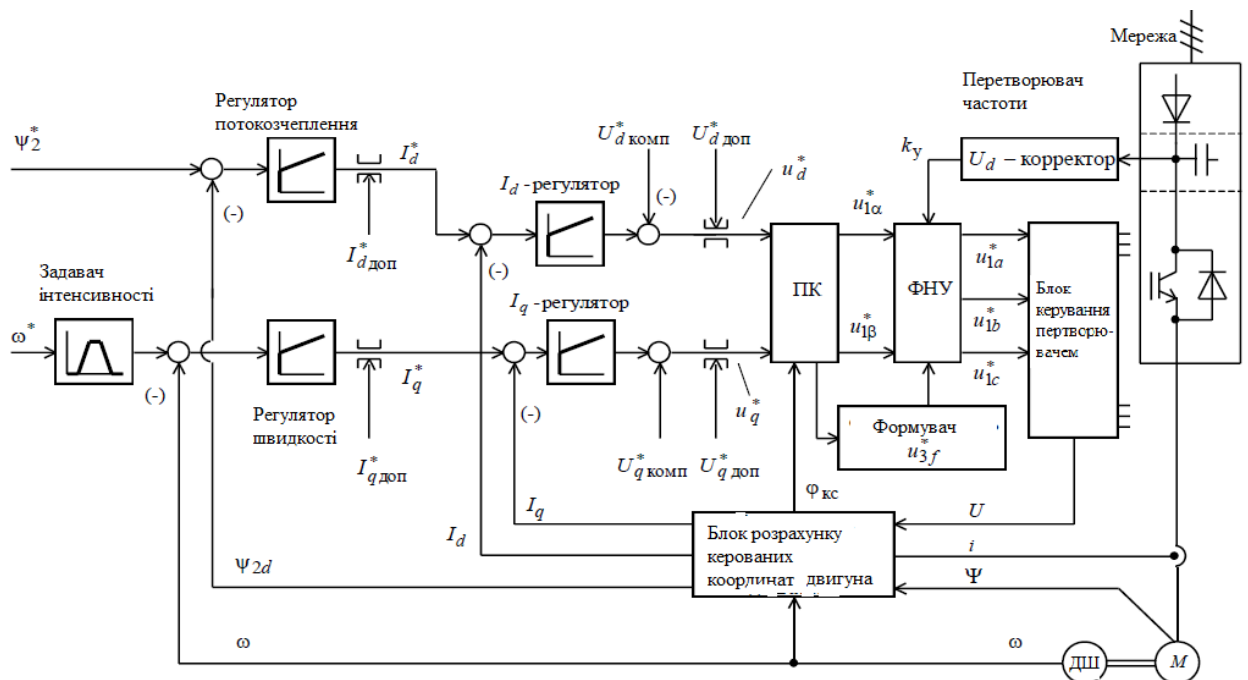


Рисунок 30– Базова функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним векторним керуванням та моделлю трифазного інвертора напруги з ШІМ

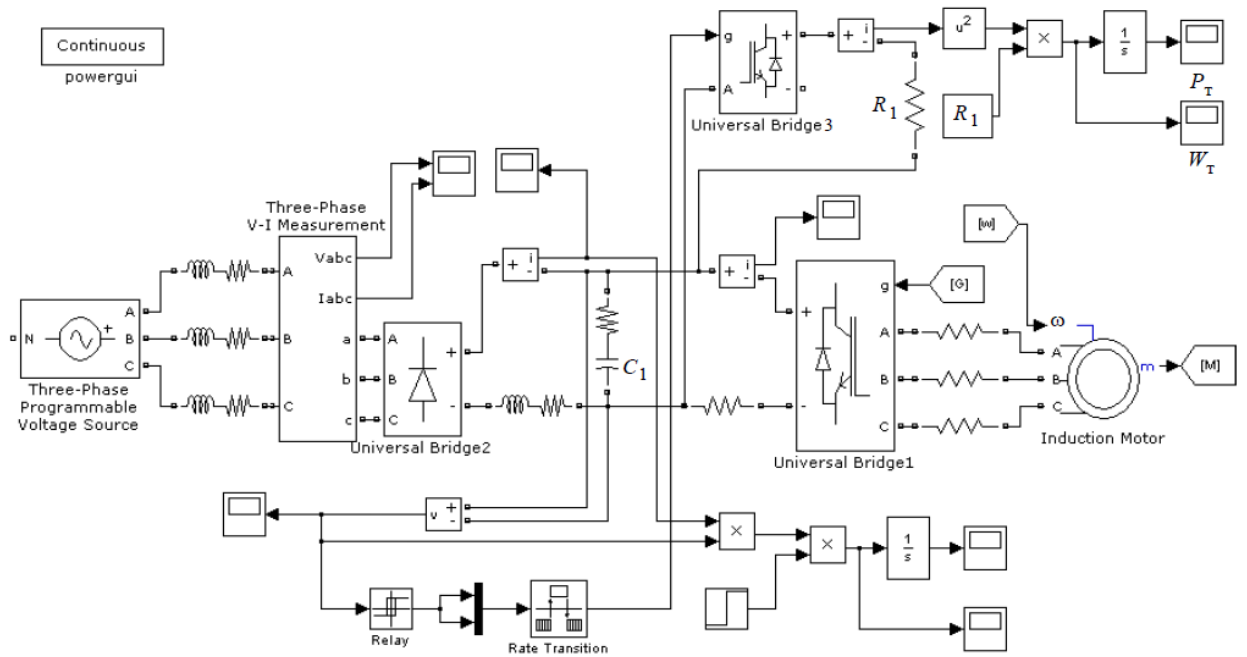


Рисунок 31 – Імітаційна модель електричної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун»

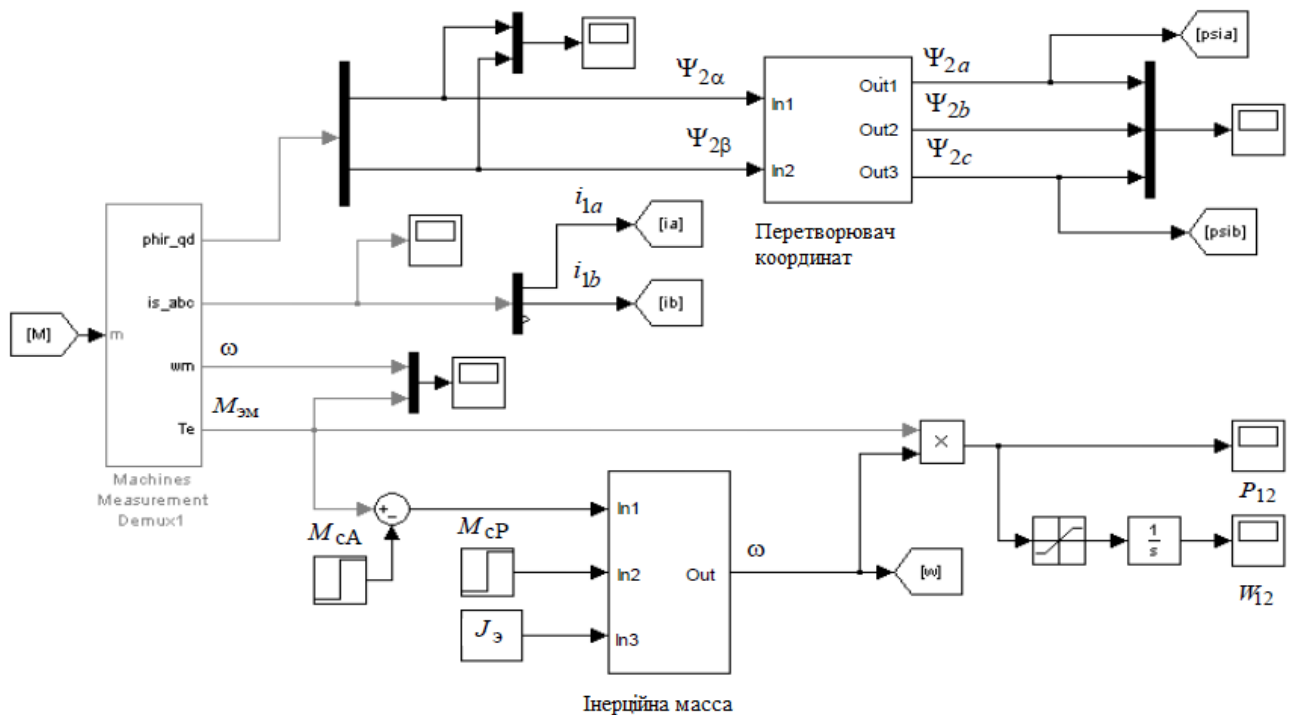


Рисунок 32 – Імітаційна модель механічної частини силового каналу системи «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун»

Параметри вхідного ланцюга та ланки постійного струму при обліку ШІМ вихідної напруги інвертора.

Параметри мережевого трансформатора або реактора вибираються відповідно до таблиці 7.

Таблиця 7

І _{рф} , А	12.3	20.5	41	82	165	265	410	660	820
L _p , мГн	3	2	1	0.5	0.25	0.156	0.1	0.064	0.05
R _p , мОм	450	265	100	37	13	7.2	3.8	2.1	1.4
I _{дн} , А	15	25	50	100	200	320	500	800	1000

При з'єднанні статора обмоток двигуна в зірку номінальний струм обмотки фази трифазного трансформатора або реактора

$$I_{рфн} = I_{1фн} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot U_{1фн}}{U_{сн}} = 115.4 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot 220}{380} = 121.5 \text{ А}, \quad (3.5)$$

де коефіцієнт 1,05 враховує падіння напруги на елементах ланцюга інвертор - двигун.

Приймаємо $L_p = 0.4 \cdot 10 \text{ Гн}^{-3}$ $R_p = 0.03 \text{ Ом}$.

Ємність конденсатора ланки постійного струму вибирається з умови

$$C \approx (100 \div 300) \cdot P_n, \text{ мкФ},$$

де P_n - номінальна потужність двигуна, кВт.

Приймаємо $C = 100 \cdot 55 \cdot 10^{-6}$, Ф.

Напруги спрацьовування ключа гальмівного резистора:

– ключ закривається при напрузі на конденсаторі ланки постійного струму $U_{off} > 2 \cdot U_{смакс} = 2 \cdot 1.1 \cdot 380 = 591.14 \text{ В}$;

– ключ відкривається при напрузі на конденсаторі $U_{on} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot U_{off} = 1.05 \cdot 591.14 = 620.7 \text{ В}$.

Приймаємо: $U_{on} = 630 \text{ В}$; $U_{off} = 600 \text{ В}$.

Параметри механічної системи електроприводу

$$\Delta M = 22.28 \text{ Нм} \quad \Delta M = 65.89 \text{ Нм}$$

$$M_{сАмін} = 86.27 \text{ Нм} \quad M_{сАмакс} = 561.8 \text{ Нм}$$

$$28757.1 \cdot 1_{хв е} = J \cdot 2 \text{ мкг} \cdot 354653 \cdot 1_{макс е} = 0.2 \text{ м кг}^2$$

$$k_j = \frac{J_{Емакс} - J_{Емін}}{M_{сАмакс} - M_{сАмін}} = \frac{1.354653 - 1.28757}{561.8 - 86.27} = 0.00014 \quad (3.6)$$

k_j - Коефіцієнт зміни моменту інерції електроприводу при зміні статичного моменту навантаження.

Розрахунок параметрів налаштування контурів регулювання системи керування електроприводом При розрахунку параметрів налаштування системи регулювання електроприводу приймаємо:

Максимальна швидкість електроприводу $\omega_{\text{еп.макс}} = 90.254$ рад/с;

Максимальний струм електроприводу $I_{\text{еп.макс}} = 165.811$ А;

Номинальне потокозчеплення ротора двигуна $\Psi_{2\text{н}} = 0,919$ Вб.

Частота $f_{\text{ШИМ}} = 8000$ Гц.

Період ШІМ $T_{\text{шім}} = 1/f_{\text{шім}} = 0.000125$ с.

Тимчасовий крок розрахунку $\Delta t = 0.000001$ с.

Розрахунок параметрів налаштування контуру струму з ПІ-регулятором та аналоговим датчиком

Максимальний струм електроприводу $I_{\text{еп.макс}} = 165.811$ А.

Приймаємо наці. дС = 10 .

Приймаємо $I_{\text{вим.макс}} = 300$ А з умови

$$I_{\text{изм.макс}} \geq \sigma_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}} = 1.2 \cdot \sqrt{2} \cdot 165.811 = 281.37 \text{ А.} \quad (3.7)$$

$$k_{\text{дт}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{шт.дт}}}}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{512}{300} \text{ 1/А.}$$

Приймаємо $N_{\text{от.макс}} \square 1$ – максимальний сигнал зворотного зв'язку, тоді N – максимальне значення завдання струму.

$$k_T = \frac{1}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{300} \text{ 1/А; } k_{\text{ос.т}} = \frac{1}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{шт.дт}}}} = \frac{1}{512}. \quad (3.8)$$

$$N_{\text{зт.макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}}}{I_{\text{изм.макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 165.811}{300} = 0.76164 \quad (3.9)$$

Приймаємо $T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шім}} = 0.000125$ с.

Приймаємо $T_{\text{ос.т.}} = 0$.

Вибираємо $n_{\text{тд}} = n_{\text{тq}} = n_T = 3$.

$$T_{\mu\tau\epsilon} = T_{\mu\tau d\epsilon} = T_{\mu\tau q\epsilon} = n_{\tau d} \cdot \frac{T_{\text{шм}}}{2} = 3 \cdot \frac{0.000125}{2} = 1.875 \cdot 10^{-4} \text{ с.} \quad (3.10)$$

Приймаємо $n_{\tau d}=2$.

$$T_{\text{рт}d} = T_{\text{рт}q} = T_{1\epsilon} = 1.52515 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

$$k_{\text{рт}} = k_{\text{рт}d} = k_{\text{рт}q} = \frac{T_{1\epsilon} \cdot R_{1\epsilon}}{k_{\text{пр}} \cdot k_{\tau} \cdot a_{\tau} \cdot T_{\mu\tau\epsilon}} =$$

$$= \frac{1.52515 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \cdot 0.22547}{327 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1.875 \cdot 10^{-4}} = 0.8413. \quad (3.11)$$

$$T_{\tau} = T_{\tau d} = T_{\tau q} = a_{\tau} \cdot T_{\mu\tau\epsilon} = 2 \cdot 1.875 \cdot 10^{-4} = 3.75 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Коефіцієнт компенсаційної негативної зворотної зв'язки регулятора струму d

$$k_{\text{комп.}d} = (\sigma \cdot L_1 \cdot z_p) \cdot \frac{I_{\text{вим.макс}} \cdot \omega_{\text{вим.макс}}}{k_{\text{пр}}} =$$

$$= (0.0172 \cdot 0.0226613 \cdot 3) \cdot \frac{300 \cdot 120}{327} = 0.128733. \quad (3.12)$$

Коефіцієнт компенсаційного позитивного зворотного зв'язки регулятора струму I_q – обмеження регуляторів струму.

Розрахунок параметрів контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором без датчика потоку Номінальне значення потокозчеплення ротора $\Psi_{2н} = 0.919$ Вб.

Приймаємо $\Psi_{2\text{розр.макс}} = 1$ Вб із умови

$$\Psi_{2\text{расч.макс}} \geq \sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2н} = 1.05 \cdot 0.919 = 0.965 \text{ Вб.} \quad (3.13)$$

Приймаємо $K_{d\Psi_1}=1$.

Приймаємо $N_{0\Psi\text{макс}}=1$ – максимальний сигнал зворотний зв'язок.

$$k_{\Psi} = k_{\text{ос.}\Psi} = \frac{N_{0\Psi\text{макс}}}{\Psi_{2\text{расч.макс}}} = \frac{1}{1} = 1 \text{ 1/Вб.} \quad (3.14)$$

$$N_{3\Psi_{\text{макс}}} = \frac{\Psi_{2\text{н}}}{\Psi_{2\text{расч.макс}}} = \frac{0.919}{1} = 0.919 - \text{Максимальне значення завдання}$$

потокосцеплення.

Приймаємо $T_{\text{роз.}} = T_{\text{шім}} = 0.000125 \text{ с.}$

Приймаємо $T_{\text{ос.}\Psi} = T_{\text{пк.}\Psi} = 20 \cdot T_{\text{роз.}\Psi} = 20 \cdot 0.000125 = 0.0025 \text{ с.}$

Приймаємо $T_{\text{ф.о}\Psi} = 0.$

Приймаємо $a_{\Psi} = 2.$

$$T_{\mu\Psi\varepsilon} = T_{\text{тд}} + \frac{T_{\text{ос.}\Psi}}{n_{\Psi}} + T_{\text{ф.о}\Psi} = 3.75 \cdot 10^{-4} + \frac{0.0025}{2} + 0 = 0.001625 \text{ с.} \quad (3.15)$$

Приймаємо $a_{\Psi} = 2.$

$$T_{\text{р}\Psi} = T_2 = 0.177055 \text{ с;}$$

$$k_{\text{р}\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\text{т}}}{L_m \cdot k_{\Psi} \cdot a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi\varepsilon}} = \quad (3.16)$$

$$= \frac{0.177055 \cdot 1}{300 \cdot 0.022495 \cdot 0.919 \cdot 2 \cdot 0.001625} = 8.784.$$

$N_{\text{р}\Psi} \text{ додатковий} = N_{\text{зт.макс}} = 0.76164$ – обмеження регулятора потокосцеплення.

Розрахунок положення (кут повороту координатної системи $\varphi_{\text{кс}}$) та модуля потокосцеплення ротора $\Psi_{2\text{д}}$ здійснюється розрахунковим шляхом з використанням значень струмів $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ та кутової швидкості ω двигуна відповідно до схеми, наведеної на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, складеної на основі моделі двофазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором у нерухомій системі координат статора \square , \square відповідно до виразів:

$$\Psi_{2\alpha} = \frac{L_m \cdot i_{1\alpha} - \frac{L'_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \cdot \Psi_{2\beta}}{T_2 \cdot p + 1}, \quad \Psi_{2\beta} = \frac{L_m \cdot i_{1\beta} + \frac{L'_2}{R_2} \cdot \omega \cdot \Psi_{2\alpha}}{T_2 \cdot p} \quad (3.17)$$

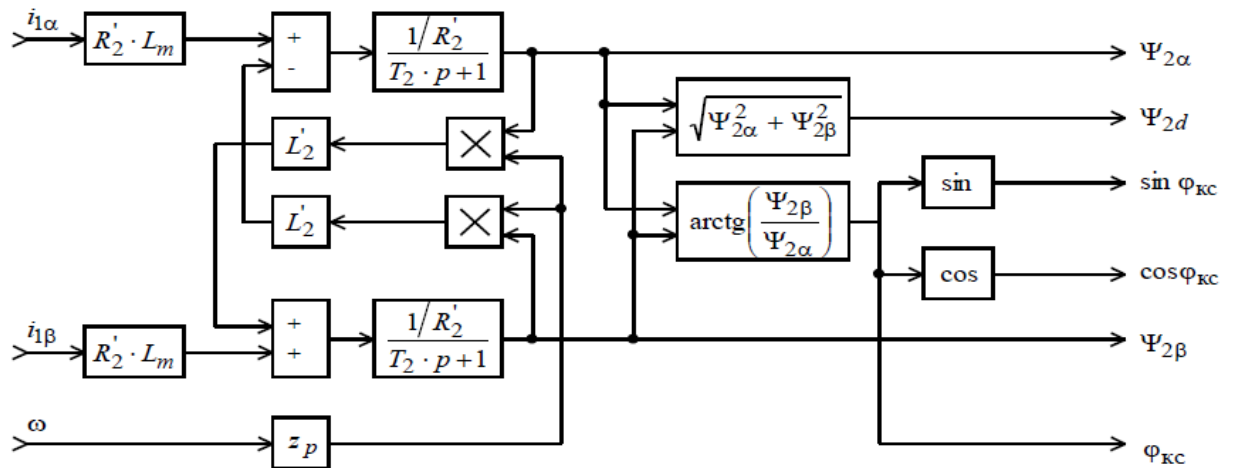


Рисунок 33- Схема розрахунку потокозчеплень і кута повороту координатної системи, що обертається.

Розрахунок параметрів контуру швидкості з ПІ-регулятором та імпульсним датчиком

Максимальна швидкість електроприводу $\omega_{\text{еп.макс}} = 90.254$ рад/с.

Датчик швидкості імпульсний $n_{\text{дш}} = 2500$.

Приймаємо $\omega_{\text{вимм.макс}} = 120$ рад/с із умови $\omega_{\text{вимм.макс}} = \sigma_c \cdot \omega_{\text{еп.макс}} = 1.2 \cdot 90.254 = 108.3$ рад/с.

Приймаємо $T_{\text{вим.с}} = T_{\text{ос.с}} = T_{\text{пк.с}} = 40 \cdot T_{\text{шім}} = 40 \cdot 0.000125 = 0.005$ с (частота розрахунку у контурі швидкості $f_{\text{розр.с}} = 200$ Гц).

$$k_{\text{дс}} = k_{\text{дс}} \cdot T_{\text{вим.с}} = \frac{4 \cdot 2500}{2 \cdot \pi \cdot 200} \text{ с/рад.} \quad (3.18)$$

Приймаємо $N_{\text{з макс.}} = 1$ - максимальний сигнал зворотного зв'язку.

$$k_c = \frac{1}{\omega_{\text{вим макс}}} = \frac{1}{120} \text{ с/рад.} \quad (3.19)$$

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{вим.с}} \cdot \omega_{\text{вим.макс}} \cdot n_{\text{дс}}} = \frac{200 \cdot 2 \cdot \pi}{120 \cdot 4 \cdot 2500}$$

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{\omega_{\text{еп.макс}}}{\omega_{\text{вим.макс}}} = \frac{90.254}{120} = 0.7521 \quad - \quad \text{макисмальний сигнал}$$

завдання

Приймаємо $T_{ф.ос} = 0$.

Приймаємо $n_c = 2$.

$$\begin{aligned} T_{\mu c \varepsilon} &= T_{Tq} + \frac{T_{\text{ИЗМ.с}} + T_{\text{ос.с}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} = \\ &= 3.75 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0.005 + 0.005}{2} + 0 = 0.005375 \text{ с.} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Приймаємо $b_c = a_c = 2$.

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon} = 2 \cdot 2 \cdot 0.005375 = 0.0215 \text{ с.}$$

$$\begin{aligned} k_{pc} &= \frac{J_{\text{э макс}} \cdot k_T}{\Psi_{2H} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu c \varepsilon}} = \\ &= \frac{1.354653 \cdot 1 \cdot 120}{300 \cdot 0.919 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.022495}{0.0227207} \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.005375} = 12.31. \end{aligned} \quad (3.20)$$

$N_{pc \text{ доп}} = \sqrt{N_{\text{зт. макс}}^2 - N_{p\psi}^2} = \sqrt{(0.76164)^2 - N_{p\psi}^2}$ - Обмеження регулятора швидкості.

Оскільки електропривод управляється від задатчика інтенсивності швидкості, фільтр, що згладжує, на вході контуру швидкості не встановлюємо.

3.7 Дослідження електроприводу методом комп'ютерного моделювання

Основні вимоги до електроприводу формують перелік умов, які мають забезпечувати надійну і безпечну експлуатацію. У тому числі:

- Діапазон регулювання швидкості повинен становити щонайменше 100:1.
- Система повинна забезпечувати плавний пуск та м'яку зупинку.
- Реверс двигуна повинен відбуватися тільки після повної зупинки механізму на нульовій швидкості.
- У режимі паузи обов'язково наявність гальмівного моменту фіксації положення.

Аналіз роботи електроприводу включає розгляд його поведінки у режимі експлуатації механізму, зокрема:

1. Пуск в обидві сторони обертання двигуна. Це має бути доступно на будь-якій швидкості та при будь-якому допустимому значенні активного моменту навантаження.

2. Гальмування до повної зупинки з будь-якої початкової швидкості та рівня навантаження.

Крім того, дослідження електроприводу проводиться в наступних типових робочих циклах механізму підйомної лебідки:

- Плавний пуск на малу швидкість (у режимі підйому чи спуску).
- робота на малій швидкості.
- Поступовий перехід до проміжної швидкості та її утримання.
- досягнення максимальної робочої швидкості з подальшою експлуатацією на цьому рівні.
- Поетапне гальмування: від максимальної швидкості до проміжної, потім мінімальної, і повна зупинка.
- фаза паузи, під час якої на вал накладається гальмо.

Дослідження проводяться як у режимі підйому, так і спуску з різними рівнями навантаження $M_s A$. При цьому реверсування здійснюється лише після повної зупинки механізму.

Ілюстрації (додаток А) демонструють динамічні характеристики електроприводу (фазний струм, момент, швидкість двигуна) при опрацюванні описаних робочих циклів як без вантажу, так і з максимальним вантажем. При спуску вантажу потенційна енергія перетворюється електричною машиною на електричну, яка потім дисипує через гальмівний резистор, запобігаючи надмірному зростанню напруги на конденсаторах ланки постійного струму (Додаток Б).

Результати моделювання електроприводу підйомної лебідки показали:

- Застосування асинхронних електроприводів із частотним векторним керуванням та датчиком швидкості забезпечує чудові регульовальні властивості, включаючи широкий діапазон швидкостей понад 100:1.

- Можливе формування плавних перехідних процесів з обмеженням прискорення та ривків, а також задавати максимальне значення моменту двигуна.

Одним з ключових переваг електроприводів з датчиком є можливість стійкої роботи при нульовій швидкості, коли двигун здатний розвивати або крутний, або гальмівний момент заданого значення.

Однак при напрузі мережі $U_m = 380$ В та максимальному статичному моменті $M_{cAmax} = 561.8$ Нм електропривод не досягає максимально необхідної робочої швидкості механізму $\omega_{еп.мах} = 90.254$ рад/с. Це з обмеженням номінального значення потокосцеплення ротора $N_{\psi,мах} = 0.919$ \text{Вб} \), заданого у контурі регулювання.

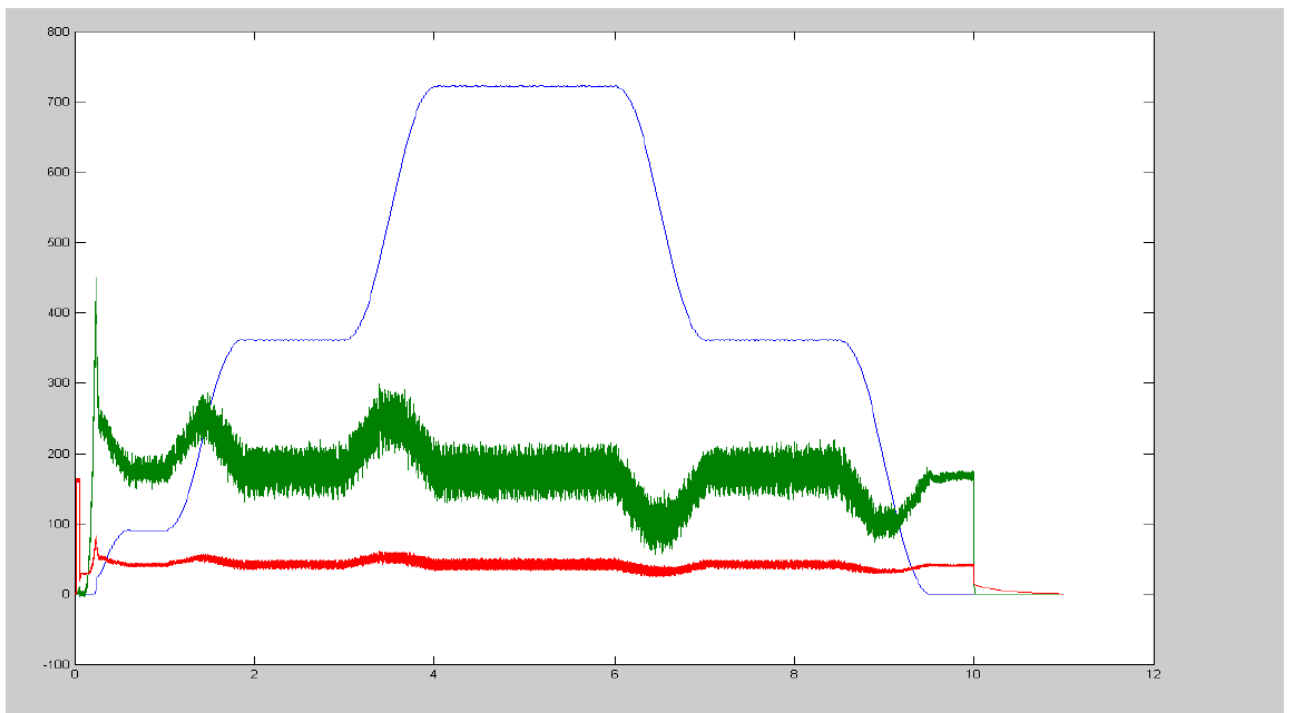


Рисунок 34— Діаграми діючого струму $I_1\phi$, електромагнітного моменту $M_{ем}$ та швидкості ω двигуна при відпрацюванні електроприводом типового циклу підйому без вантажу

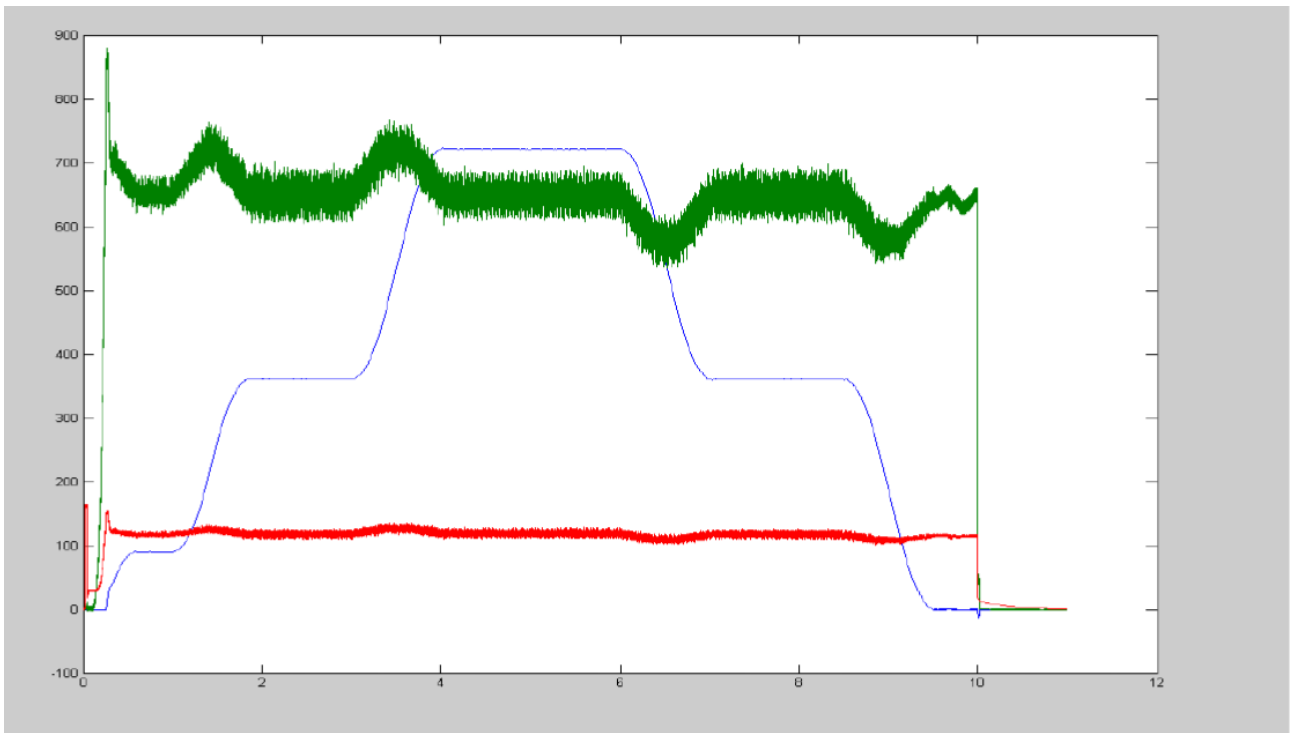


Рисунок 35– Діаграми діючого струму $I_{1\phi}$, електромагнітного моменту M_{em} та швидкості ω двигуна при відпрацюванні електроприводом типового циклу підйому з максимальним вантажем

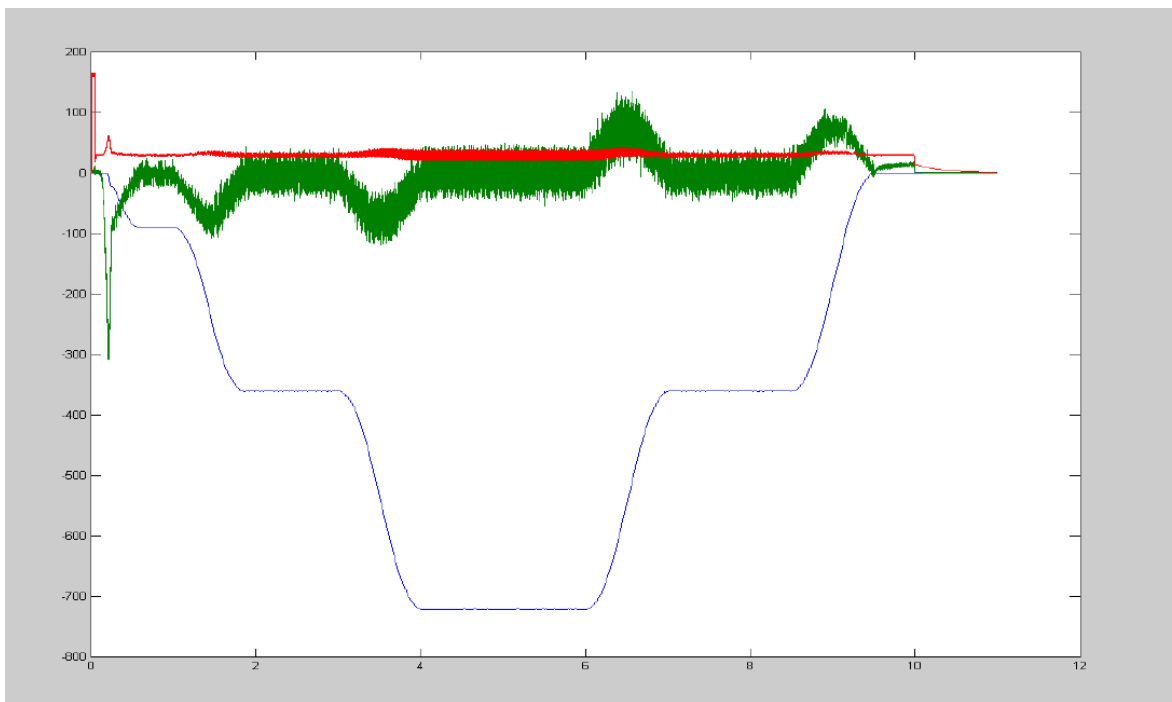


Рисунок 36– Діаграми діючого струму $I_{1\phi}$, електромагнітного моменту M_{em} та швидкості ω двигуна при відпрацюванні електроприводом типового циклу

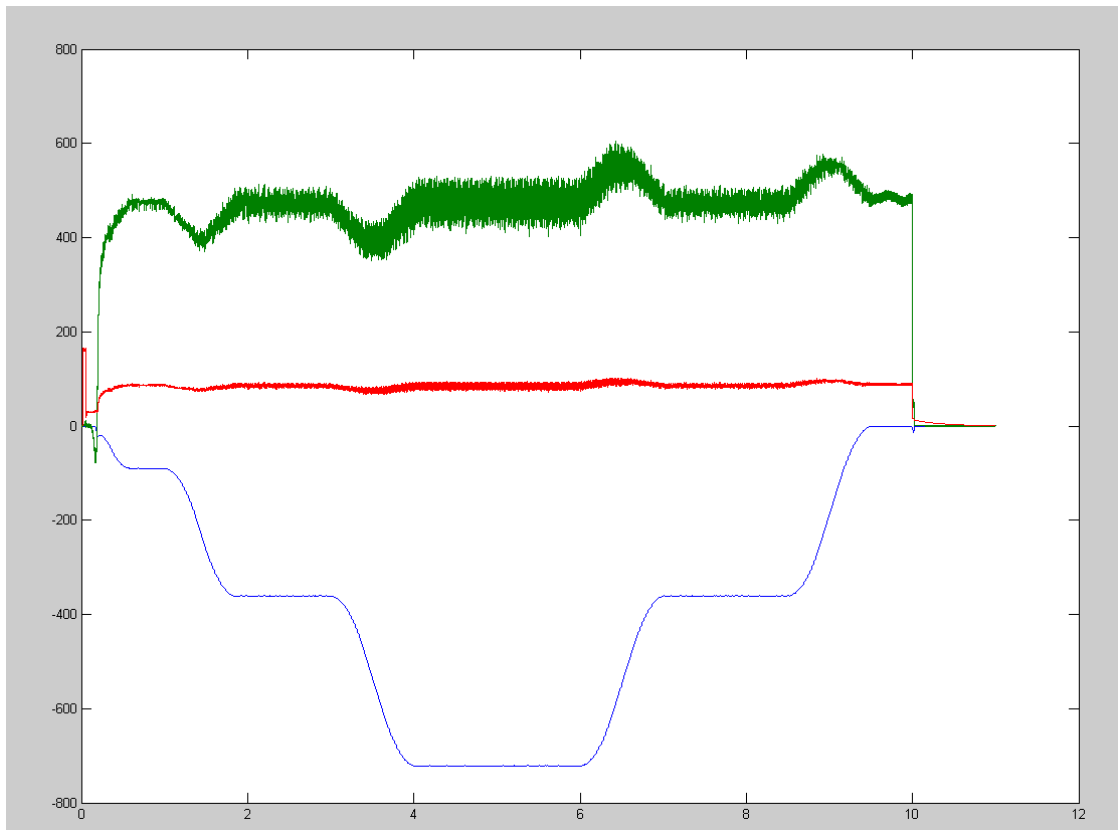


Рисунок 37– Діаграми діючого струму I_{ϕ} , електромагнітного моменту M_{em} та швидкості ω двигуна при відпрацюванні електроприводом типового циклу спуску з максимальним вантажем

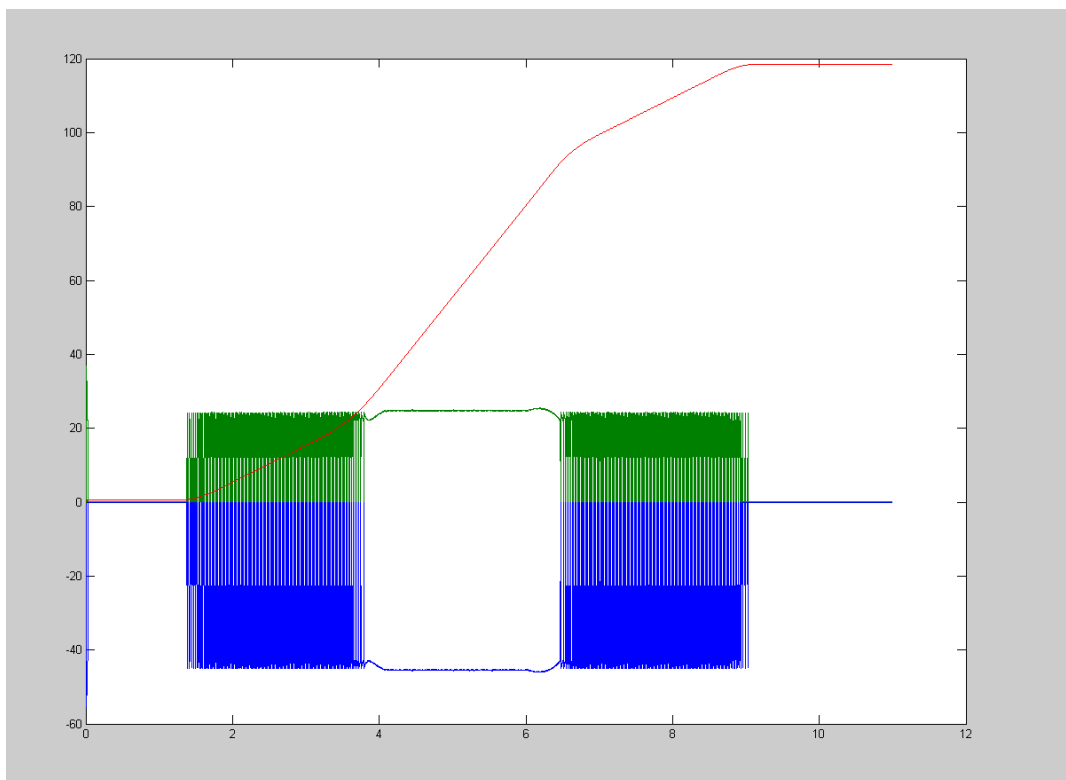


Рисунок 38– Діаграми струму I_{Rt} (А), потужності P_{Rt} (кВт) та енергії W_{Rt} (кВт · с) гальмівного резистора при відпрацюванні електроприводом типового циклу спуску з максимальним вантажем

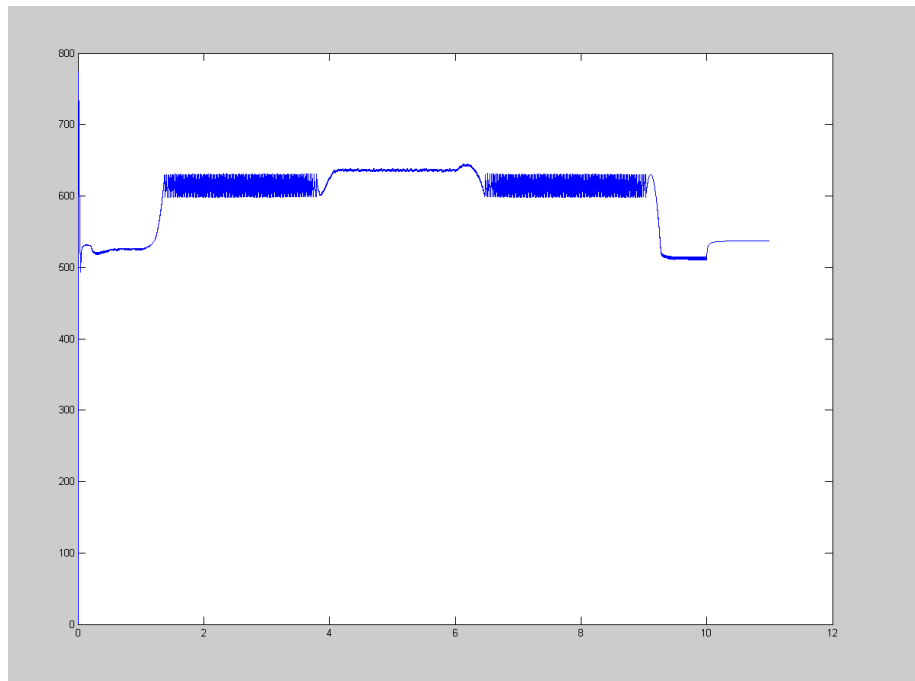


Рисунок 39– Діаграма напруги конденсатора ланки постійного струму U_d (В) при відпрацюванні електроприводом типового циклу спуску з максимальним вантажем

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Значення забезпечення безпеки праці

Поліпшення умов праці та забезпечення її безпеки є одним із найважливіших засобів досягнення головного соціально-економічного завдання — неухильного піднесення матеріального та культурного рівня життя народу. Чим сприятливіші та безпечніші умови праці, тим краще зберігаються здоров'я та життя працюючих, а праця стає привабливішою і стає все більше потребою. Водночас підвищується продуктивність праці, успішніше виконуються виробничі завдання.

Безпека професійної діяльності працюючих на підприємствах багато в чому залежить від умов праці, що визначаються характером трудового процесу та виробничою обстановкою. Аналіз показує, що трудова діяльність основних категорій працівників складів, транспортних цехів та ін. пов'язана з впливом несприятливих мікрокліматичних умов, нерівномірного робочого навантаження протягом дня, тижня, місяця, сезонів року, негативних факторів, економії у вирішенні головної дилеми: найбільш раціонального витрачання ресурсів для задоволення

4.2 Нормативна основа

Відповідно до законів України та нормативної бази здійснюється:

- указами;
- нормативними правовими актами виконавчої суб'єктів;
- нормативними правовими актами, що містять норми трудового права:
- постановами та нормативними правовими актами виконавчої влади;
- трудовим законодавством (включно із законодавством про охорону праці), що складається з Трудового кодексу, що містять норми трудового права;

4.3 Характеристика об'єкту

Виготовлення металевих конструкцій на заводі складається з низки технологічних процесів, до виконання яких організуються цех основного виробництва. До них належать цех підготовки металу зі складом, цех обробки деталей, склад напівфабрикатів, збірно-зварювальні цехи, цех контрольного складання, малярно-вантажний цех зі складом готової продукції.

У цеху здійснюються розвантаження, сортування, маркування, виправлення, складування, зберігання та видача металопрокату. Крім того, тут проводяться приймання та зберігання обрізів та ділових відходів, видача ділових відходів, обробка обрізів та відвантаження металобрухту, проводять очищення металопрокату від корозії та окалини на спеціальних установках, різання профільної сталі на заготовки, а також попереднє стикування листової сталі.

У цеху обробки виконуються операції з виготовлення деталей із металопрокату, що надходить із цеху підготовки.

У цеху виконуються такі операції:

отокарні;

огоризонтально - розточувальні;

офрезерно - розточувальні; Устаткування встановлене у цеху:

отокарний верстат;

офрезерний верстат;

освердлильні верстати;

ошліфувальний верстат;

орозточувальні верстати.

4.4 Мікроклімат та умови його забезпечення

Метеорологічні умови або мікроклімат у виробничих умовах визначається поєднаннями температури повітря, що діють на людину, швидкості його руху на робочому місці і відносної вологості. Для хорошої фізіологічної діяльності організму та працездатності людини необхідне їх оптимальне поєднання в залежності від енергетичних витрат при виконанні

роботи та пори року. Відповідно до ДСТУ оптимальні та допустимі норми мікроклімату вибираються згідно з тяжкістю робіт. Мікроклімат виробничих приміщень досягається шляхом опалення та припливної вентиляції.

Чинними нормативними документами, що регламентують умови, є:

ДСТУ "Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони".

Допустимі значення параметрів мікроклімату на робочих місцях виробничих приміщень при відносній вологості повітря в діапазоні 15...75% наведено в таблиці 6.4

Таблиця 8 – параметри мікроклімату робочої зони

Сезон року	Категорія робіт	Температура, °С			Швидкість руху повітря, м/с	
		повітря		поверхонь	Нижче оптим.	Вище оптим.
		Нижче оптим.	Вище оптим.			
Холодний	Легка-Іа	20÷21	24÷25	19÷26	не більше 0,1	0,1÷0,2
	Легка-Іб	19÷20,9	23,1÷24	18÷25		
Теплий	Легка-Іа	21÷22,9	25,1÷28	26	не більше 0,1	0,1-0,4
	Легка-Іб	20÷21,9	24,1÷28	25		

Кабіни обладнуються опалювальними приладами, приладами примусовою вентиляцією чи кондиціонерами.

При механічній вентиляції кабінні свіже повітря подають до кабінні через стельовий плафон або через спеціальний повітропровід. Щоб виключити обдув машиніста зосередженим потоком повітря, застосовують решітки з

регульованими напрямними лопатями або розподіляють повітря по кабіні віяловими струменями.

У склінні закритої кабіни влаштовані фрамуги, що відкриваються, для природної вентиляції кабіни і для більш зручного протирання зовнішньої поверхні скла. Площа скління кабіни вибирається великою. Щоб в кабіну надходила мала кількість теплоти, для скління кабін застосовують теплопоглинаючі та тепловідбивні скла. Теплопоглинаючі скла мають темне забарвлення, а тепловідбивні складаються з двох листових стекол, з'єднаних разом, причому зовнішнє дзеркальне з напиленим шаром оксиду металу. Нижнє скло кабіни захищене металевими ґратами.

На робочому місці машиніста визначається станом повітряного середовища приміщення, в якому встановлено кран. Оскільки за ступенем важкості виконуваної роботи робота машиніста може бути віднесена до категорії легких фізичних робіт з енерговитратами до 172 Дж/с, то оптимальними метеорологічними умовами на робочому місці машиніста у відкритій кабіні управління є наступні: температура (+19) — (+25) °С, відносна вологість — не більше 2 м/с.

Монтажних петель і падіння вантажу, перевантаження крана, небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, підвищений рівень шуму, підвищений рівень вібрації, розташування робочого місця на висоті відносно поверхні підлоги, небезпечні фактори пожежі.

Ступінь відповідальності крана – нормальна, група – 3.

Відповідно до постанови бруківки кран підлягає обов'язковій сертифікації для підтвердження відповідності вимогам технічного регламенту «Про безпеку машин та обладнання».

На робочому місці машиніста крана з'являються шуми механічного походження. Сумарний рівень шуму в кабіні управління не більше 80 дБ.

Для зменшення механічного шуму застосовуємо:

-звукоізоляцію кабіни керування.

-балансування обертових частин машини;

-технічне обслуговування та ремонт, оскільки підвищений рівень шуму є наслідком несправності чи зносу механізму;

На робоче місце машиніста крана передається загальна вібрація другої категорії – транспортно-технологічна та локальна – від органів управління. Передачу загальної вібрації на робоче місце машиніста крана усуваємо демпфованою підвіскою кабіни, установкою

4.5 Розрахунок штучного освітлення

На даній ділянці виконання робіт здійснюється на протязі 24 годин, тому використовується поєднане освітлення, яке передбачає використання штучного освітлення у темний час доби. На всій площі прольоту прикріплені лампи типу ПKN.

Необхідний світловий потік однієї лампи визначається за такою формулою:

$$\Phi_{л} = \frac{E * K'_{з} * S_{п} * Z_{н}}{N_{с} * n_{л} * \eta}, \quad (4.1)$$

де $E = 300$ - нормована освітленість;

$K'_{з}$ - коефіцієнт запасу для ламп; $S_{п} = 1800 \text{ м}^2$ - площа цеху;

$Z_{н}$ – коефіцієнт нерівномірності висвітлення;

$N_{с}$ – кількість ламп, прим.;

$n_{л} = 1$ шт. - Число ламп у світильнику;

η -коефіцієнт використання світлового потоку, для визначення якого необхідно обчислити індекс переміщення i за такою формулою:

$$i = \frac{b \times l}{h \times (b + l)}, \quad (4.2)$$

де b - ширина цеху: $b = 30 \text{ м}$; l - Довжина цеху: $l = 60 \text{ м}$;

h – висота підвісу над робочою поверхнею лампи: $h = 4 \text{ м}$. Для ламп приймаємо ПKN $K'_{з} = 1,5$; $Z_{н} = 1,1$.

Світловий потік одного світильника при використанні ламп ПКН 250 Вт дорівнює 13000 лк.

Індекс переміщення:

Коефіцієнт використання світлового потоку =49%. Визначаємо необхідну кількість світильників N_c :

Приймаємо для освітлення ділянки 140 штук ламп ПДК-250, які розміщені на периметрі ділянки. Це дозволить поліпшити параметри виробничого освітлення шляхом зміни типу ламп, що використовуються, і призведе до значного зниження зорового навантаження на машиніста.

4.6 Пожежна безпека

Пожежі завдають величезних матеріальних збитків і в ряді випадків супроводжуються загибеллю людей. Тому захист від пожеж є найважливішим обов'язком кожного члена суспільства та проводиться у загальнодержавному масштабі.

Протипожежний захист має на меті пошук найбільш ефективних, економічно доцільних та технічно обґрунтованих способів та засобів попередження пожеж та їх ліквідації з мінімальною шкодою при найбільш раціональному використанні сил та технічних засобів гасіння.

Клас приміщення цеху по функціональною пожежній небезпеці залежно від призначення – Ф5.1.

Категорія приміщення цеху з вибухопожежної та пожежної небезпеки відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 (знижена пожежна небезпека).

Можливі класи пожеж – А (горіння твердих речовин) та Е (горіння електроустановок, що знаходяться під напругою).

Ступінь вогнестійкості – II. Витрата води на зовнішню пожежогасіння – 10 л/с, на внутрішню – 5 л/с.

Для приміщень категорії Д відстань від можливого вогнища пожежі до місця розміщення вуглекислотних вогнегасників не повинна перевищувати 70 м. Для подачі вручну сигналу тривоги на станцію пожежної сигналізації ручні

ВИСНОВКИ

У цій роботі було проведено аналіз та розрахунок частотно-регульованого електроприводу для механізму підйому крана. На основі вимог, що висуваються до електроприводу, було обрано крановий електродвигун, розрахований для роботи з частотним регулюванням, а також перетворювач частоти, що відповідає необхідним функціям управління. Як метод управління застосовано векторне управління.

У процесі дослідження було визначено сферу застосування системи, розраховано параметри схеми заміщення двигуна та його робочі характеристики. Також визначено параметри механічної частини електроприводу підйому. Проведено оптимізацію контурів регулювання лінійної системи автоматичного управління регульованим електроприводом (САУ РЕП). Для підвищення якості керування запропоновано використовувати ПІ-регулятори струму, швидкості та потокозчеплення. Крім того, вказано параметри їх налаштування та попередньо визначено очікувані показники ефективності їхньої роботи. Встановлено, що система САУ РЕП має суттєву нелінійність, що вимагає подальших досліджень для оцінки впливу цієї особливості на якість регулювання.

За результатами імітаційних експериментів виявлено, що вимоги щодо плавності регулювання можна задовольнити рахунок застосування s-образного задатчика інтенсивності. Аналіз функціонування електроприводу підтвердив коректність одержаних результатів.

Насамкінець можна відзначити, що розроблена система автоматичного управління регульованим електроприводом механізму підйому крана повністю задовольняє пред'явленим технічним вимогам, забезпечуючи високу надійність та ефективність роботи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Вантажопідйомні машини: навчальний посібник / Н. М. Слободян, І. О. Пономарчук. - Вінниця: ВНТУ, 2020. - 87 с.
2. Полянський С. К. Будівельнодорожні та вантажопіднімальні машини / Полянський С. К. – К. : Техніка, 2001. – 624 с.
3. Назаренко І. І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник / Назаренко І. І. - К.: КНУБА, 1999. - 488 с
4. Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка»/М.Г. Попович, О.Ю. Лозінський, В.Б. Клепиков та інш. - К.: Лібідь, 2005. - 680 с. Ч1.
5. . Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка»/М.Г. Попович, О.Ю. Лозінський, В.Б. Клепиков та інш. - К.: Лібідь, 2005. - 680 с. Ч2.
6. Теорія електроприводу: Підручник/М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. - К.: Вища шк., 1993 - 494 с.
7. Перетворювачі частоти Altivar Process ATV900 Shneider Electric, Католог - 2016 Режим доступу: https://elprivod.nmu.org.ua/ru/student/techdoc/pch/Altivar%20Process%20ATV900_%D0%BA%D0%B0%D1%82%20%D1%80%D1%83%202016.pdf
8. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський; М-во освіти та науки України, Нац. гірн. ун-т. - Електрон. текст. дані. - 2-ге вид., Віпр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. Патент № 2278812. Віттур Хорст, Кюнчер Дітмар. "Безредукторний ліфт із тросовим приводом".
9. Моделювання електромеханічних систем: підручник / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й., Сісук Г.Ю., Садовий О.В]. - Кременчук, 2001. 410 с.
10. ПРАВИЛА будови та безпечної експлуатації ліфтів ДНАОП 0.00-1.02-99

11. Я. О. Сєріков. Основи охорони праці: Навчальний посібник для студентів вищих закладів освіти. - Харків, ХНАМГ, 2007. - 227с.

12. Купчик М.П., Гандзюк М.П, Степанець І Ф, Вендичанський В.М., Литвиненко О.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. – К.: Основа, 2000. – 416 с.

13.<https://zavod-slemz.com.ua/ua/p323939661-elektrodivigatel-4mtkm22516-kvt.html>