

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
Олександр Дідик
«___» _____ 20__ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
**«Система автоматичного керування роботою електричного крану у
виробничих цехах»**

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу, групи АК-23М-2
ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
_____ Степаненко Є.О.
«___» _____ 20__ р.

Керівник роботи
доцент, к.т.н.
_____ Роман ЖЕСАН
«___» _____ 20__ р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“___” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Степаненку Євгенію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Система автоматичного керування роботою електричного крану у виробничих цехах»

2. Керівник роботи

Жесан Роман Володимирович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 25.12.2024 року

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи дослідження та визначення параметрів асинхронного електроприводу виробничого механізму – переміщення візка типового мостового електричного крана

5. Перелік графічного матеріалу функціональна схема електропривода, моделювання роботи асинхронного електроприводу, сімейства вольт-частотних характеристик, результати моделювання.

6. Консультанти розділів роботи_____

Розділ (Додатки)	Прізвище, ініціали консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Дата видачі завдання

«___» _____ 20__р.

Підпис керівника

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 20__р.

Підпис здобувача

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота містить ключові слова: механізм пересування, асинхронний двигун, перетворювач частоти, імітаційна модель, структурна схема, компенсація, корекція, ІР-компенсація.

Об'єктом дослідження є регульований електропривод частоти механізму пересування візка мостового крана.

Мета роботи – виконати проектування асинхронного регульованого електроприводу частоти механізму пересування візка мостового крана.

Магістерська робота виконана в текстовому редакторі Microsoft Word з використанням пакетів прикладних програм Mathcad, Matlab Simulink.

ANNOTATION

The master's thesis contains keywords: movement mechanism, asynchronous motor, frequency converter, simulation model, structural diagram, compensation, correction, IR compensation.

The object of the study is an adjustable electric frequency drive of the overhead crane carriage movement mechanism.

The purpose of the work is to perform the design of an asynchronous frequency-regulated electric drive of the bridge crane carriage movement mechanism.

The master's thesis was made in the Microsoft Word text editor using Mathcad, Matlab Simulink application programs.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО КРАНУ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	6
1.1. Аналіз роботи електричних кранів.....	6
1.2. Кінематична схема механізму руху електричного крану.....	10
1.3 Постановка задачі.....	11
1.4. Висновки до розділу.....	13
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО КРАНУ.....	14
2.1. Обґрунтування вибору регульованого електропривода частоти.....	14
2.2. Розрахунок параметрів для схеми заміщення електродвигуна...	18
2.3. Аналіз перетворювачів частоти та його вибір.....	26
2.4. Висновки до розділу.....	28
3 ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	29
3.1. Визначення механічних характеристик.....	29
3.2. Побудова робочої області.....	32
3.3. Висновки до розділу.....	39
4 ПОБУДОВА СХЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ.....	40
4.1. Асинхронний електропривод. Функціональна схема.....	40
4.2. Дослідження параметрів для моделювання роботи системи.....	41

4.3. Висновки до розділу.....	46
5 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	47
5.1. Базова схема.....	47
5.2. Режими роботи.....	50
5.3. Висновки до розділу.....	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТКИ.....	64

ВСТУП

Актуальність теми.

У більшості всі промислові підприємства, як правило, застосовують електричні вантажо-підіймальні крани, але при цьому зустрічають проблему, що підйомне обладнання не відповідає іноді до сучасних технічних вимог. У кранах, що виготовляються серійно і що знаходяться в експлуатації, привід головного підйому здійснюється двигунами постійного струму із системою регулювання від напівпровідникових перетворювачів або асинхронними двигунами з короткозамкненим або фазним ротором з параметричним регулюванням за рахунок зміни опору резисторів, що підключаються до контактних кільців [5]. Реостатне регулювання, що використовується для зміни швидкості, відрізняється вкрай низькою енергетичною ефективністю. За деякими оцінками в електроприводах механізмів підйому до 70 % споживаної електричної енергії використовується для обігріву повітря, як під час спускання, так і під час піднімання вантажу [1-3].

Дослідженнями [1-4] встановлено, що більшість автокранів обладнані недорогою та простою в обслуговуванні системою керування електродвигуном з релейною контактною панеллю. Ця система характеризується швидкістю розвантаження, що залежить від ваги, і не є довговічною. Це має значний вплив на механічну частину ресурсів роботи крана та вимагає значного обслуговування.

Сучасний електропривод змінного струму включає в себе приводний перетворювач частоти зі ланкою постійного струму і інвертором з широтно-імпульсною модуляцією. Наразі найширше використовуються перетворювачі із автономних інверторів напруги. Так як джерелом живлення є трьох-фазна мережа зі змінним струмом, то необхідно щоб перетворювач частоти складався з трьох-фазного керованого/некерованого випрямляча. В перетворювачі вбудовано систему керування електроприводом з мікроконтролерним керуванням, а також наявність зовнішнього інтерфейсу [7].

Набір наявних апаратних засобів у поєднанні із вбудованим програмним забезпеченням дозволяє реалізувати різні конфігурації електроприводу від найпростіших розімкнених систем до складних замкнутих систем регулювання швидкості та положення. У цій системі застосовується закон регулювання U/f (регулювання за різних співвідношеннях частоти). В подальшому в кваліфікаційній роботі буде досліджуватись робота типового мостового електричного крана, який є розповсюдженим на споживчому ринку [1-4]

Мета кваліфікаційної роботи.

Дослідження та визначення параметрів асинхронного електроприводу виробничого механізму – переміщення візка типового мостового електричного крана.

Об'єкт дослідження.

Процеси регулювання електроприводом частоти механізмом пересування візка мостовим краном.

Предмет дослідження.

Мостовий кран та його електропривод.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити параметри схеми заміщення електродвигуна;
- проаналізувати перетворювачі частоти;
- побудувати робочі області механічних характеристик;
- провести імітаційне моделювання роботи системи.

Методи дослідження.

Теорії автоматичного керування, теорії електричних кіл, комп'ютерного моделювання, графічного моделювання, статистичної обробки даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

Набуло поширення застосування електропривода мостового крана регульованого за частотою для частотно-регульованого привода механізму пересування візка мостового крана.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновані схеми заміщення електродвигуна, які дозволяють здійснити вибір перетворювача частоти.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки і рекомендації, обґрунтовано посиланнями на джерела інформації, спеціальним використанням математичних методів та пакетів прикладних програм.

Апробація результатів досліджень.

Прийнято участь у Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (13-14 листопада 2024 року, м. Кропивницький, ЦНТУ). Секція - Автоматизація процесів керування та комп'ютерно-інтегровані технології.

Публікації.

За темою магістерської роботи опубліковано 1 наукову працю у збірнику тез доповідей до Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції «Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» на тему «Justification of the development and research of an asynchronous electric drive of a production mechanism».

Структура та обсяг магістерської роботи.

Магістерська робота складається з п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 90 сторінок.

1. ОГЛЯД ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО

КРАНУ, ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1. Аналіз роботи електричних кранів

Електричні мостові крани складаються з великої сталевий балки (міст), яка підтримується з обох кінців сталевими колонами. Як правило, міст оснащено візком, який ходить уздовж моста на рейках, а також підйомними механізмами, які можна опускати або піднімати, з метою виконання збору та переміщення вантажів [2-5].

В порівнянні іншими кранами, крани мостові електричні є економічно ефективнішими, оскільки у них менші експлуатаційні витрати і потребують менше щорічного обслуговування, мають триваліший строк служби.

Задля безпеки крани мостові електричні мають відповідні пристрої.

Кінцеві вимикачі, що встановлені на візку крану. Вони призначені для запобігання переміщення спрямованого шляху. При відключенні живлення двигуна, у разі виявлення наближення крану до кінця свого ходу, запобігають зіткненню візка з вантажем з кінцевими стопорами. Також присутній захист від перевантаження та кнопки аварійного зупинення [18].

Найпоширеніше використовують крани мостові електричні у виробництві для переміщення важких матеріалів та продуктів. Склади використовують такі крани для зберігання продукції, завантаженні та розвантаженні вантажівок й різних транспортних засобів (автомобільних, морських, повітряних суден тощо).

Але для їх ефективної роботи необхідні регулярні перевірки, які повинні проводити відповідні фахівці, що повинні перевіряти знос та пошкодження на критичних частинах (троси, ланцюги, гаки, гальма, двигуни та інше). Також належним має бути змащення, яке допомагає зменшити тертя між рухомими частинами, що може призвести до передчасного зносу [1-3].

Електропривод - це електронна система, яка управляє робочим процесом робочої машини і керує цими діями для здійснення технічних процесів, тому його розробка є важливим завданням у роботі з будь-яким краном. У всіх

галузях економіки країни, на транспорті і в будівництві, перевезення вантажів, пов'язаних з підйомно-транспортною діяльністю, здійснюється за допомогою різних типів ліфтів. Навантажувачі використовуються для вантажно-розвантажувальних робіт, транспортування вантажів на виробничих і будівельних технологічних лініях, ремонту і монтажу великогабаритного обладнання. Електричні навантажувачі мають дуже широкий спектр застосування, від кількох сотень Вт до 1000 кВт. До вантажопідйомного обладнання відносяться крани балкові, крани та підйомні крани [23].

Його основним механізмом є механізм штовхання та витягування. Кран - це підйомний пристрій, який використовується для вертикального або горизонтального переміщення матеріалів на великі відстані. Залежно від конструктивних особливостей, пов'язаних з призначенням і умовами експлуатації, крани поділяються на платформні, мостові, мостові і баштові. Крани широко застосовуються в лабораторіях електротехнічних підприємств для підйому і опускання важких деталей, вузлів і вузлів, а також для їх транспортування по цехах. Вантажівники поділяються на малі (маса 5-10 т), середні (10-25 т) і великі (більше 50 т) категорії. Застосування подовжених кранів дозволяє багатьом заводам і будівельним компаніям опускати, піднімати, навантажувати, монтувати горизонтальні операції та механізувати інші технічні операції. Розмір робочого діапазону мостового крана залежить від конструктивних параметрів, таких як висота підйому підйомного обладнання, довжина ходу та вага крана [19, 32].

Основними механізмами мостового крана є підйомно-транспортний механізм і візок. Оскільки робоча швидкість механізму крана становить від 0,5 до 2 м/с, загальний момент інерції електродвигуна в основному визначається моментом інерції двигуна [18]. Тому для приводу механізму крана використовується електродвигун з малим моментом інерції.

За графіком навантаження робочого циклу крановий механізм можна розділити на дві групи [5, 7, 9, 18]:

1) підйомний механізм. Навантажувач складається з чотирьох частин. Підйом і опускання вантажу, підйом і опускання ненавантаженого затискного пристрою.

2) програма завантаження – це робочий механізм, що складається з двох частин: завантаженої та вивантаженої.

Крановий механізм виготовляється за допомогою спеціальних кранів і металургійних електродвигунів, які працюють в короткочасному режимі з використанням кількох приводів одночасно, іноді в суворих атмосферних умовах, завдяки чому знижується надлишкова вантажопідйомність, механічний опір і інерція обертання.

Основними вимогами до електроприводу кранових механізмів є [5, 7, 9, 18]:

1. Забезпечує певний діапазон крутного моменту двигуна (як при підйомі, так і при опусканні вантажу).

2. Визначення конкретних зон регулювання швидкості. Діапазон встановлення швидкості головного механізму підйому визначається, з одного боку, номінальною швидкістю підйому і опускання, а з іншого боку, швидкістю опускання і опускання монтажних робіт. Діапазон швидкостей атмосферних механізмів може змінюватися в найширшому діапазоні.

3. Плавність регулювання швидкості знижує ударне навантаження на підйомний пристрій при гальмуванні в кінці спуску або підйому.

4. Забезпечення високої жорсткості механічних властивостей особливо важливо для вантажопідйомних механізмів з великими змінами статичного крутного моменту і при низькій швидкості роботи. В іншому випадку величина приведеної швидкості буде сильно залежати від навантаження на механізм.

5. Граничні динамічні навантаження (прискорення, момент) елементів механічних вузлів. Якщо напруга на клемі двигуна падає до 90% від номінального значення після запуску навантаження, можливість зниження номінального навантаження слід виключити.

Електродвигуни, елементи стартера та вимикача На електроталі встановлюються електромагніти гальмівні, контролери, запобіжні, стартерні, сигналізаційні, запірні та освітлювальні пристрої, кінцеві вимикачі, струмознімні пристрої.

Електродвигун крана, аксесуари та електрична система мають бути розроблені відповідно до умов роботи на будівельному майданчику

Рух крана впливає на кріплення. Прискорення і гальмування поїздів і при завантаженні техніки Рух сталевих конструкцій викликає дуже сильні механічні напруги в електронних пристроях. Міст з краном і трамваєм Хоча мало шансів, що граничні умови будуть виконані. Але ці вимоги повинні бути дотримані, щоб електрообладнання мало необхідну надійність.

При діапазоні температур від -40 до $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відносній вологості повітря $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносна вологість в середньому становить 95% [5, 7, 9, 18].

Умови повітря для конкретного обладнання: концентрація сірки 10 мг/м^3 , концентрація CO_2 -0,8% (за масою). Електрична трансмісія більшості автобусів характеризується короткочасною динамікою - постійні режими роботи, високі швидкісні регулювання та великі навантаження під час високих швидкостей і механічних операцій. Відсутність специфікацій на використання електродвигунів у будівельних машинах послужила основою для розробки спеціальних серій електродвигунів і кранового обладнання.

Система керування крановою машиною складається з [5, 7, 9, 18]:

- контролю вібрації;
- регулювання швидкості на певних швидкостях;
- електромеханічне гальмування під час гальмування;
- легке гальмування при зниженні навантаження;
- межа руху вгору з обох боків лебідки та автомобіля;
- нульове та екстрене гальма;
- захист від контакту короткого замикання з переднім двигуном і захист від надмірного контакту з двигуном.

Ліфти мають обмежувальні замки, які запобігають підйому підйомного обладнання. Електричні кола складаються з поверхневих електричних провідників, а не з теплових провідників. Шкала повинна доходити до нуля. Усі аксесуари крана повинні бути прикріплені до металевих гальм, а вага має бути прикріплена до металевої гусениці крана.

В даний час електричне керування краном включає в себе крановий контролер із змінною швидкістю, 10 контролерів, командні контролери, кнопки, перемикачі, гальмівні та електронні елементи керування, елементи гальмівного стартера та багато інших контролерів, які завершують електричний привід крана.

В електричних кранах знайшли широке застосування різні способи тиристорного регулювання і дистанційного керування за допомогою бездротового або однопровідного проводу. Сьогодні переважну більшість усіх систем керування складають комп'ютери: чи то мікроконтролери, чи промислові комп'ютери, чи персональні комп'ютери[5, 7, 9, 18]:.

Така система, крім основної функції управління установкою, також виконує кілька функцій: збирає, обробляє і зберігає інформацію про контролер, передає цю інформацію в інші частини системи. Також існує потреба у вдосконаленні системи керування, яка забезпечує рівень енергозбереження, підвищену надійність і, звичайно, гнучкість агропромисловості, обмеженої за обсягом та ефективністю керування.

1.2. Кінематична схема механізму руху електричного крану

Кінематичну схему механізму показано рис. 1.1. Візок крану мостового здійснює операцію з переміщенням щоб піднятий вантаж міг вздовж ферми крану рухатися від майданчика завантажувального до майданчик а вивантажувального. На завантажувальному майданчику вантаж зачіпляють за допомогою механізма з підйомом, який сприяє підйому вантажу.

Потім треба включити двигун візка, а потім здійснювати переміщення візка разом з вантажем відповідно до робочої швидкості V_p . Як вантаж прибув на вивантажувальний майданчик, то двигун загальмовують, шляхом зменшення швидкості для того щоб забезпечити точність зупинки. Перемістившись на довжину L візок буде зупинено у необхідному місці. Потім вантаж спускають, відчіплюють, а порожній гак піднімають [5, 7, 9, 18]. У зворотний бік з швидкістю V_v повертається візок (при цьому двигун повинен знову увімкнутися) відповідно до відстані L в зону завантаження знову.

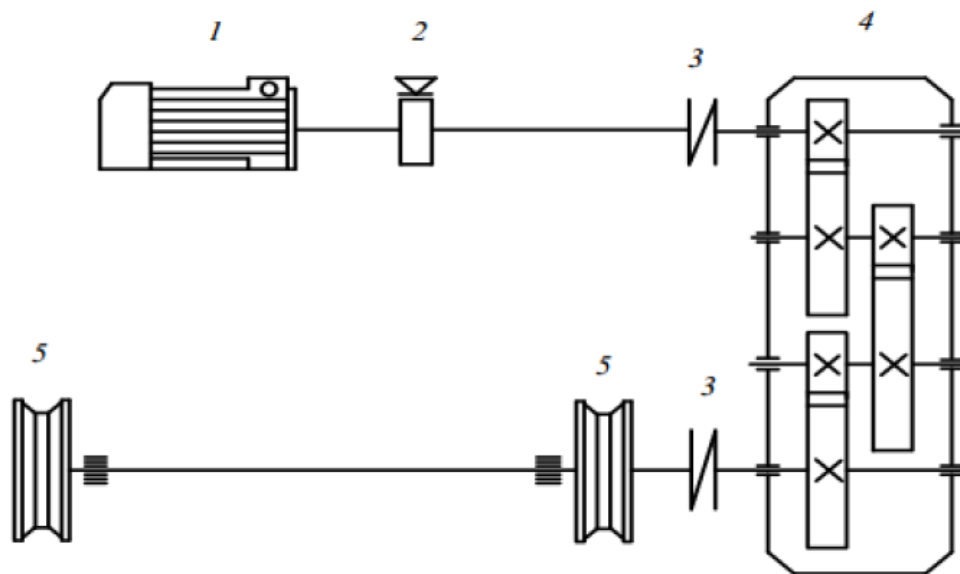


Рисунок 1.1 - Кінематична схема механізму пересування:

1 – електродвигун; 2 – гальмівний шків; 3 – муфта;

4 – редуктор; 5 – ходові колеса

Отже, візок здійснює зворотно-поступальний рух завдовжки L з однієї точки в іншу. Робочий цикл візка включає час пауз, коли візок стоїть, причеплення вантажу, підйом, опускання, відчеплення, підйом і опускання порожнього гака.

1.3. Постановка задачі

Область роботи електроприводу (рис. 1.2) задана у 4-х квадрантах площині координат. Область тривалої роботи обмежена максимальною швидкістю

електроприводу $\omega_{EP.макс}=83,3$ рад/с та інтервалом зміни моменту корисного навантаження у тривалому режимі $M_{с.мін} \div M_{с.макс}$, Н·м [5, 7, 9, 18].

Область короткочасної роботи обмежена максимальною швидкістю електроприводу $\omega_{EP.макс}=83,3$ рад/с та значенням максимального моменту електроприводу у пуско-гальмівних режимах $M_{EP.макс}=68,7$ Н·м [5, 7, 9, 18].

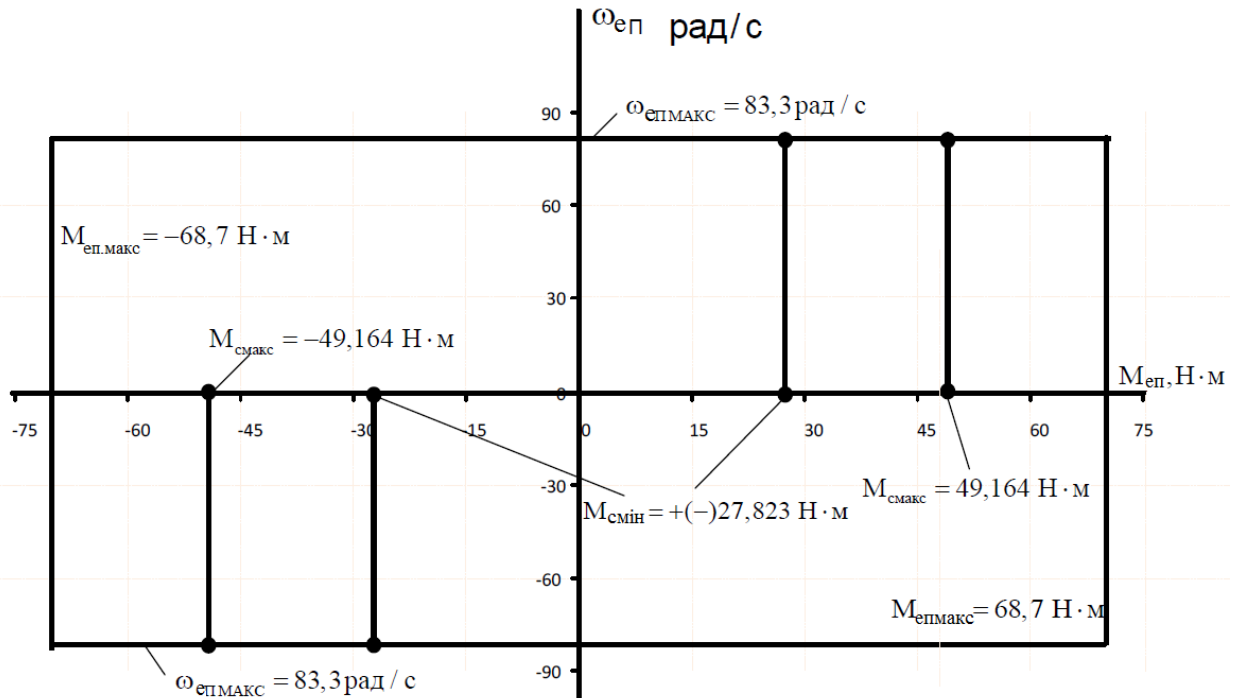


Рисунок 1.2 – Задана зона роботи електроприводу

Регульований електропривод переміщення візка повинен відповідати таким технічним вимогам [5, 7-11, 18, 29]:

1. Електропривод реверсивний.
2. Навантаження – постійне, реактивне, змінюється не більше $0,4 \div 0,8 M_{дв.ном}$.
3. Діапазон робочих швидкостей приводного двигуна від мінімальної робочої швидкості $n_{р.мін}=79,5$ об/хв до максимальної швидкості $n_{р.макс}=795,8$ об/хв.
4. Електропривод повинен забезпечувати кратність пускового моменту щонайменше $k_{П.ЕП}=3,5$.

5. Похибка підтримки заданої швидкості трохи більше 10% на нижньої робочої характеристики.

6. Управління електроприводом – ручне.

7. Електродвигун працює в умовах підвищеної температури та запиленості, повинен мати захист виконання зі ступенем захисту не нижче за IP44.

8. Мережа трифазна, $380 \pm 10\%$, 50 ± 1 Гц.

Виходячи з вище зазначеного, у кваліфікаційній роботі пропонується розглянути та визначити електропривод (регульований за частотною) механізму переміщення візка мостового крана. Для цього необхідно побудувати механічні та електро-механічні характеристики області роботи електроприводу. І на основі отриманих даних виконати імітаційне моделювання роботи вузла, що обмежує струм та захищає електродвигун від перевантажень по струму. Отримана модель асинхронного електричного приводу з частотно-скалярним керуванням (двофазний асинхронний електродвигун) у системі нерухомих координат, повинна містити датчики струмів, IR-компенсацією (компенсація активного опору), регулятор обмеження струму (для забезпечення високих пускових моментів), і бути більш жорсткішою при відпрацюваннях завдання на низьких частотах.

1.4. Висновки до розділу

В даному розділі здійснено огляд та аналіз роботи електричних кранів, типи кранових механізмів та вимоги до електроприводу цих механізмів. Розглянуто системи керування крановою машиною та їх схеми.

В результаті запропоновано технічні вимоги за якими в подальшому в роботі будуть проводитись дослідження.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРИЧНОГО КРАНУ

2.1. Обґрунтування вибору регульованого електропривода частоти

Схема регульованого за частотою електроприводу показана рис. 2.1 [10].

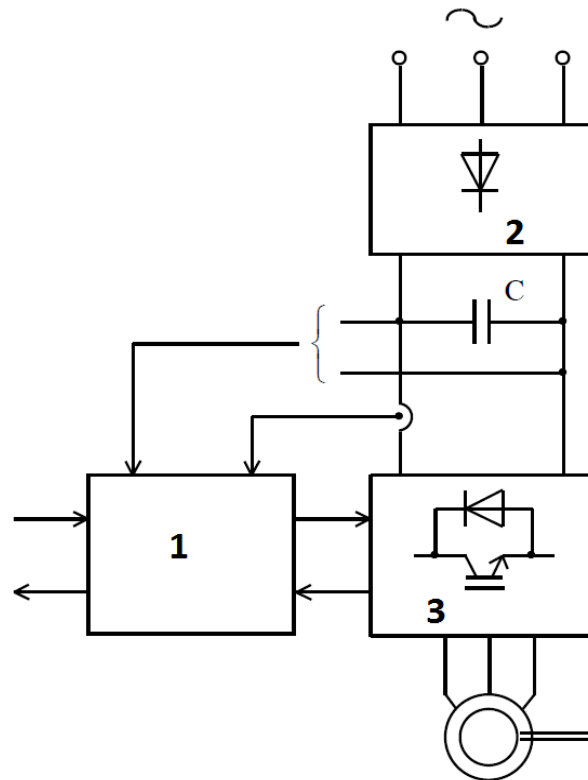


Рисунок 2.1 - Регульований за частотою асинхронний електропривод:

1 - система інформації та керування; 2 - випрямляч; 3 - інвертор

Оскільки робоча швидкість обертання двигуна змінюється в широкому діапазоні від 795 до 7958 об/хв. то, залежно від необхідної продуктивності, роботу доцільно проводити з будь-якою швидкістю цього діапазону протягом тривалого або короткого часу, залежно від переміщуваного вантажу [11, 14].

Режим роботи носять циклічно повторний та короткочасний режим, це допускає часті пуски та зупинки. Жорстких вимог до динаміки електроприводу не наводяться, не накладається також обмежень на характер перехідних процесів при пуску, гальмуванні та переході з однієї швидкості на іншу, однак перехідні процеси доцільно щоб були плавними.

Таким чином можна зробити висновок, що найбільш раціонально оптимальним буде перехід до використання асинхронних електроприводів з частотним регулюванням, які за функціональними можливостями та

експлуатаційними характеристиками будуть відповідати певним технічним вимогам [10, 11, 14, 32-34]:

- діапазон регулювання сучасних асинхронних електроприводів з перетворювачами частоти при найпростішому скалярному управлінні достатньо щоб був не менше 1: (5-10).
- асинхронні короткозамкнуті електродвигуни мають широкий ряд ступенів захисту та переваги (істотне до 60% зменшення енергоспоживання);
- підвищення точності та якості регулювання швидкості;
- плавність пуску та гальмування збільшують термін служби всіх механічних елементів, підвищують комфортність управління та забезпечують збереження вантажу.

Доцільний спосіб керування двигуном залежить від технічних вимог до системи електроприводу. В електроприводах з обмеженим діапазоном регулювання та відсутністю динамічних режимів роботи застосовується частотно-параметричний спосіб, при якому регулюється частота та діюче значення вихідної напруги перетворювача частота-напруга відповідно до заданої швидкості.

У електроприводах з великим діапазоном регулювання швидкості та високими вимогами до динамічних характеристик застосовується регулювання миттєвих значень трифазної системи напруги живлення та струмів з використанням векторного принципу регулювання. В електроприводах для керування механізмів з вентиляторним характером навантаження та для механізмів з постійним навантаженням з малим діапазоном регулювання доцільно застосування скалярного способу керування [10, 14, 32].

Оскільки діапазон швидкості приводу невеликий, то його можна було б досягнути за допомогою найпоширенішого методу керування - це використання скалярного керування відповідно до закону $U_1 / f_1 = const$. Крім того, дотримання цього закону дасть можливість забезпечити постійність критичного моменту, який необхідний для певного механізму та навантаження. Способи керування в системі перетворювач частоти-асинхронний двигун та їх показники

приведені в табл. 2.1. Також необхідно врахувати, що даний механізм повинен забезпечувати досить високий коефіцієнт кратності пускового моменту k_{II} . У типових застосуваннях, залежно від конкретного виконання, $k_{II}=1\div3,5$ [11, 14, 32].

Таблиця 2.1 – Способи керування в системі перетворювач частоти-асинхронний двигун та їх показники

Діапазон регулювання швидкості	Спосіб керування	
	Скалярне	Векторне
100-120		без датчика швидкості
1000		з датчиком швидкості
до 120	замкнена система зі зворотнім зв'язком за швидкістю	
більше 10	Замкнена система зі зворотнім зв'язком за струмом статора та компенсацією падіння напруги на активному опорі обмоток статора та підвищення жорсткості статистичних характеристик (IR-компенсація та компенсація ковзання)	
менше 10	розімкнена система, в тому числі з корекцією вольт-частотної характеристики	
10	замкнена система зі зворотнім зв'язком по струму статора та компенсацією падіння напруги на активному опорі обмоток статора (IR-компенсація або компенсація навантаження)	

Відповідно до завдання для даного асинхронного електроприводу доцільно використання перетворювача серії G120 моделі PM240 (Siemens AG, Німеччина) та асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором кранової серії MTKF-112-6 [21].

Як було зазначено вище далі буде реалізовано скалярний спосіб керування з діапазоном регулювання 1:10.

Частотні перетворювачі використовуються з асинхронними електродвигунами із короткозамкненим ротором. Найчастіше розробники чи виробники кранів, модернізуючи крановий електропривод, застосовують для частотно-регульованого електроприводу традиційні електродвигуни кранової серії, що мають ротори спеціального виконання, залиті сплавом підвищеного опору. Це продиктовано насамперед вимогами забезпечення підвищеного моменту в процесі частих пусків. Для створення задовільного теплового режиму вживаються спеціальні заходи щодо зниження кратності пускових струмів. З урахуванням вищесказаного, для електроприводу механізму переміщення візка мостового крана вибрано асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором кранової серії типу МТКФ 112-6. Технічні дані електродвигуна наведено у табл. 2.2 [21].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики електродвигуна МТКФ-112-6

$n_0, \text{об/хв}$	1000
$U_{1H}, \text{В}$	380
$P_{ДВ.Н.}, \text{кВт}$	5
$s_H, \%$	0.105
$\cos\varphi_H$	0.74
$\eta_H, \%$	74
$s_k, \%$	95
$J_{ДВ}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	0.065
$m_{II} = M_{\text{пуск}} / M_H$	3.28
$m_K = M_{\text{макс}} / M_H$	3.28
$k_{IDB} = I_{\text{пуск}} / I_H$	3.83
Степінь захисту	IP44

2.2. Розрахунок параметрів для схеми заміщення електродвигуна

Синхронну кутову частоту обертання двигуна визначаємо, рад/с

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104.72$$

Визначаємо номінальна частота обертання двигуна, об/хв

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot n_0 = (1 - 0,105) \cdot 1000 = 895$$

або в рад/с

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,105) \cdot 104,712 = 93,717$$

Знаходимо номінальний момент двигуна, Н·м

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{5 \cdot 10^3}{93,717} = 53,206$$

Номінальну фазну напругу і номінальний фазний струм статора знаходять за допомогою схеми з'єднання статора обмоток. У разі коли цю схему невідомо, то для визначення необхідно приймати з'єднання Y [19, 23, 29, 30, 31].

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

Приймаємо $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$

Визначаємо струм фази статора при частковому завантаженні, А

$$I_{1\text{р}^*} = \frac{P^* \cdot P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{р}^*} \cdot \eta_{\text{р}^*}} = \frac{0,75 \cdot 5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,691 \cdot 0,74} = 11,116$$

де: $\cos \varphi_{\text{р}^*} = 0,691$ - коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

$\eta_{\text{р}^*} = 0,74$ - коефіцієнт корисної дії при частковому завантаженні;

$\text{р}^* = 0,75$ - коефіцієнт завантаження двигуна [30, 31].

Знаходимо струм холостого ходу асинхронного двигуна, А

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - \left[p^* \cdot I_{1*} \cdot \frac{(1-s_H)}{(1-p^* \cdot s_H)} \right]^2}{1 - \left[p^* \cdot \frac{(1-s_H)}{(1-p^* \cdot s_H)} \right]^2}} = \sqrt{\frac{11.116^2 \cdot \left[0.75 \cdot 13.834 \cdot \frac{(1-0.105)}{(1-0.75 \cdot 0.105)} \right]^2}{1 - \left[0.75 \cdot \frac{(1-0.105)}{(1-0.75 \cdot 0.105)} \right]^2}} = 6.841$$

Далі максимальний струм двигуна при прямому пуску, А

$$I_{1\text{макс}} = I_{1\text{лн}} \cdot K_{i\text{дв}} = 13,8 \cdot 3,831 = 52,86$$

А також критичний момент двигуна на природній характеристиці, Н·м

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1н}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2})} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot (1,351 + \sqrt{1,351^2 + 1,947^2})} = 186,275$$

Також необхідно знайти пусковий момент двигуна при прямому пуску, Н·м

$$M_{\text{двпуск}} = m_{\Pi} \cdot M_{\text{двн}} = 3,28 \cdot 53,352 = 175$$

Знаходимо приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора в номінальному режимі, Ом

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1}$$

де C_1 - коефіцієнт, який показує співвідношення $\frac{X_{\mu} + X_{1\sigma}}{X_{\mu}}$

$$C_1 = 1 + \left(\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} \right) = 1 + \frac{6.841}{2 \cdot 3.831 \cdot 13.834} = 1.065$$

$$A_1 = m \cdot U_{1H}^2 \cdot \frac{(1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{(1 - 0.105)}{2 \cdot 1.065 \cdot 3.28 \cdot 5 \cdot 10^3} = 3.722$$

Шукаємо критичне ковзання:

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

$$= 0.105 \cdot \frac{3.28 + \sqrt{3.28^2 - [1 - 2 \cdot 0.105 \cdot 0.6 \cdot (3.28 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0.105 \cdot 0.6 \cdot (3.28 - 1)} = 0.95$$

β - коефіцієнт, який показує співвідношення активних опорів статора та ротора, його значення в діапазоні від 0,6 до 2,5 [19, 29].

Тепер приведений до обмотки статора активний опір обмотки ротора визначаємо в номінальному режимі

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{3.722}{\left(0.6 + \frac{1}{0.95} \right) \cdot 1.065} = 2.116$$

активний опір обмотки статора, Ом

$$R_1 = R_2' \cdot \beta \cdot C_1 = 2.116 \cdot 0.6 \cdot 1.065 = 1.351$$

В номінальному режимі індуктивний опір короткого замикання, Ом

$$X_{кн} = R_2' \cdot \gamma \cdot C_1 = 2.116 \cdot 0.865 \cdot 1.065 = 1.947$$

де γ - коефіцієнт, що показує співвідношення приведенного активного опору ротора до індуктивного опору короткого замикання.

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.95}\right)^2 - 0.6^2} = 0.865$$

В номінальному режимі індуктивний опір розсіювання обмотки статора, Ом

$$X_{1\sigma} = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0.42 \cdot 1.947 = 0.818$$

Визначаємо у номінальному режимі індуктивність обмотки статора, яка зумовлена потіком розсіювання, Гн

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0.818}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.002604,$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора в номінальному режимі приведений до обмотки статора, Ом

$$X'_{2\sigma} = 0.58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0.58 \cdot \frac{1.947}{1.065} = 1.061$$

Шукаємо приведену індуктивність обмотки ротора в номінальному режимі, Гн

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{1.061}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.003377$$

Головний індуктивний опір, Ом

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{214.8}{6.841} = 31.397$$

де

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

$$= \sqrt{(220 \cdot 0.74 - 13.834 \cdot 1.351)^2 + (220 \cdot 0.673 - 13.834 \cdot 0.818)^2} = 214.8$$

- ЕРС гілки намагнічування у номінальному режимі, наведена потоком повітряного зазору, В.

Результуюча індуктивність, обумовлена магнітним потоком у повітряному зазорі, Гн

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{31.397}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.1$$

Параметри для схеми заміщення електричного двигуна в табл. 2.3.

Природна механічна характеристика $M(s)$ електричного двигуна для частоти $f_{1\text{н}}=50$ Гц шукається за виразом:

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

де: M – електромагнітний момент двигуна, Н·м

Таблиця 2.3 - Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	X_{μ} , Ом	L_{μ} , Гн	R_2' , Ом	$X_{2\sigma}'$, Ом	$L_{2\sigma}'$, Гн	$X_{\text{кн}}$, Ом
1.351	0.818	$2,604 \cdot 10^{-3}$	31.397	0.1	2.116	1.061	$3,377 \cdot 10^{-3}$	1.947

По результатам розрахунку будують механічну характеристику $\omega(M)$ (рис. 2.2а), значення кутової швидкості обертання двигуна визначають так:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Параметри відповідних точок на природній механічній характеристиці двигуна [19, 23, 29, 30, 31]:

– значення показника електромагнітного номінального моменту при номінальному ковзанні s_H

$$\begin{aligned} M_{\text{ем}}(s_H) &= M_{\text{ем.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi\text{н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 2,116}{104,712 \cdot 0,105 \cdot \left[1,947^2 + \left(1,351 + \frac{2,116}{0,105} \right)^2 + \left(\frac{1,351 \cdot 2,116}{0,105 \cdot 31,397} \right)^2 \right]} = 59,834, \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

- значення показника критичного ковзання

$$s_K = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,065 \cdot 2,116}{1,351 \cdot 1,947} = 0,95$$

Значення природних електромеханічних характеристик $I_1(s)$ та $I_2'(s)$ і електродвигуна шукають для частоти $f_{IH}=50$ Гц за виразом

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

де: $I_1 = I_{1\phi}$ – значення фазного струму двигуна, А;

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi_H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}}\right)^2}}$$

- показник приведенного до обмотки статора струм ротора, А;

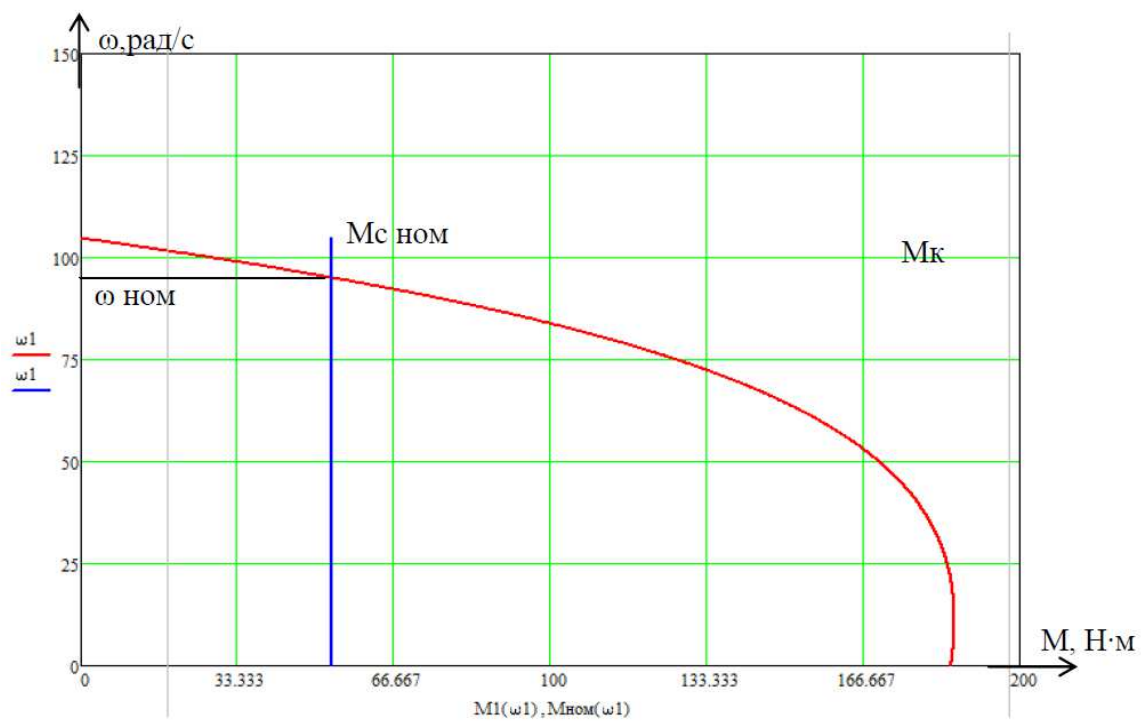
$$I_0 = \frac{U_{1\phi_H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{\mu})^2}}$$

- дійсне значення показника струму холостого ходу, А;

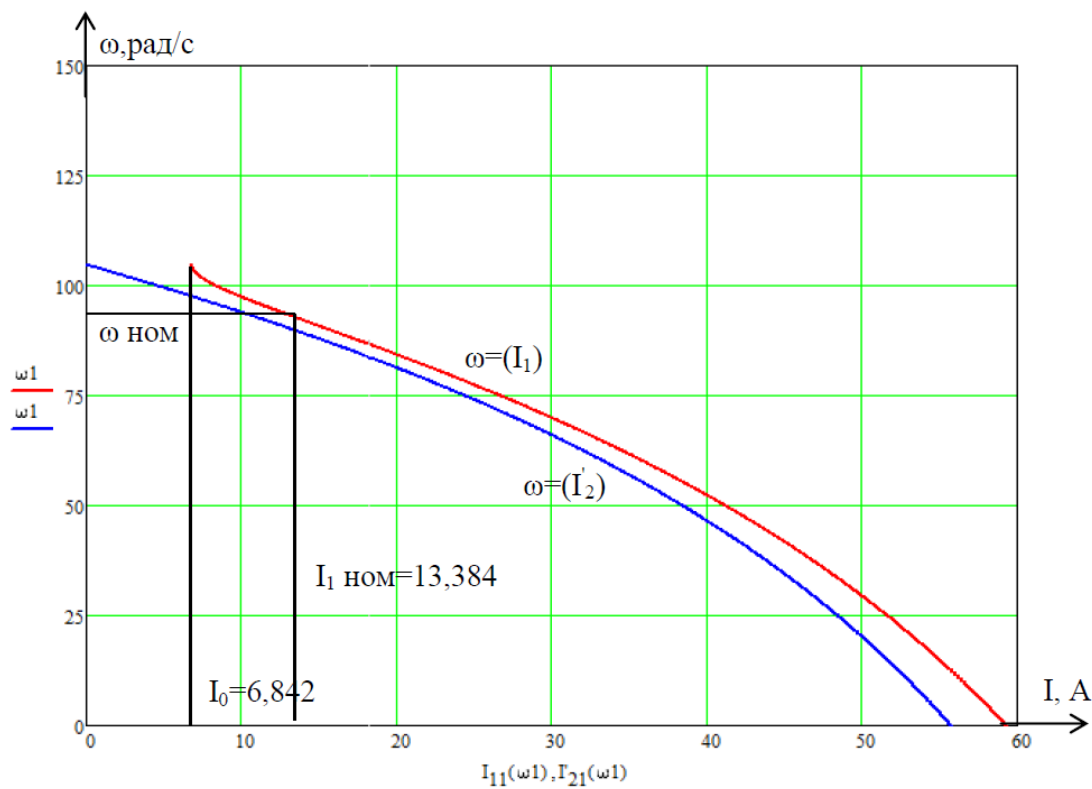
$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\text{кн}})^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}}\right)^2}}$$

Будують електромеханічні характеристики $\omega(I_1)$ та $\omega(I_2')$ (рис. 2.2б) по результатам розрахунку. Значення показника кутової швидкості обертання двигуна шукають так [19, 23, 29, 30, 31]

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$



а



б

Рисунок 2.2 – Графіки характеристик двигуна:

а – природна механічна характеристика двигуна, б – електромеханічна характеристика двигуна

2.3. Аналіз перетворювачів частоти та його вибір

Для частотно-регульованого електроприводу крана необхідні перетворювачі частоти, спеціально адаптовані для використання в вантажопідійомних кранах з необхідними функціональними характеристиками [19, 23, 29, 30, 31-34]:

- Функція керування гальмами призначена для видачі сигналу про відкриття гальм, коли двигун досягає необхідного крутного моменту, і сигналу про застосування гальм, коли швидкість знижується до мінімального рівня. Відпускання гальм можна регулювати за допомогою функції вимірювання ваги.

- Функція підйому на підвищеній швидкості. Максимальна швидкість підйому визначається автоматично відповідно до ваги вантажу.

- Функція обмеження крутного моменту електродвигуна при розробці бажаних механічних властивостей під час приводу та роботи генератора.

- функція формування певного прискорення та гальмування.

- Функція гальмування електроприводу гальмівним резистором або блоком рекуперації. Економічний ефект від впровадження рекупераційних модулів зростає: при збільшенні продуктивності електроприводу, раптовому гальмуванні інерційних механізмів, а також при опусканні вантажу на велику глибину (ліфти, ліфти шахт).

1. Параметри електромережі: трифазна мережа 380/220 В, 50 Гц.

2. Вихідні параметри перетворювача частоти:

- 3 фази;

- Максимальна вихідна напруга (мережева напруга) 380 В;

- максимальна вихідна частота інвертора, Гц

$$f_{\Pi \text{ макс}} > 50 \cdot \frac{\omega_{\text{ЕПМАКС}}}{\omega_0 \cdot (1 - s_K)} = 50 \cdot \frac{83,333}{104,72 \cdot (1 - 0,95)} = 795,77$$

- мінімальна вихідна частота перетворювача, Гц

$$f_{\Pi \text{ min}} < 50 \cdot \frac{\omega_{\text{ЕП min}}}{\omega_0} = 50 \cdot \frac{8,33}{104,72} = 3,98$$

3. Вибираємо перетворювач за номінальним (довго допустимим) струмом $I_{ін}$ та максимальним (короткочасно допустимим) струмом $I_{МАКС}=I_{ін} \cdot k_{ii}$, де k_{ii} – коефіцієнт допустимого навантаження інвертора за струмом, за такими умовами:

в однозонному електроприводі, А

$$I_{ін} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{смакс}}{M_{двн}} \geq 13,834 \cdot \frac{49,164}{53,206} = 12,783$$

4. Перетворювач повинен забезпечувати необхідний діапазон регулювання вихідної частоти:

$$f_{i \min} < f_{П \min}; \quad f_{i \max} > f_{П \max}$$

Параметри вибраного перетворювача частоти наведено в табл. 2.4.

**Таблиця 2.4 - Параметри перетворювача частоти G120 PM240
(Siemens)**

Параметри мережі живлення		Вихідна напруга U_n , В	Вихідна частота f_n , Гц	Вихідний струм		Рекомендована потужність P_2 , кВт
$U_{1л.}, В$	$f_c, Гц$			$I_{VLT.H}, А$	$I_{VLT.max}, А$	
3x380...408	50	380	0-650	18	26,4	5,5

Для визначення діапазону, в якому можна вибирати $f_{ШИМ}$ для нашого інвертора, розрахуємо величину його завантаженості:

$$\frac{I_{1лн} \cdot \frac{M_{смакс}}{M_{двн}}}{I_{ін}} \cdot 100 = \frac{13,834 \cdot \frac{49,164}{53,206}}{13,2} \cdot 100 = 96,8\%$$

Приймаємо несучу частоту інвертора $f_{ШИМ}=4$ кГц.

2.4. Висновки до розділу

1. В даному розділі обґрунтовано застосування електропривода регульованого за частотою та наведено особливості частотно-регульованого привода механізму пересування. Для асинхронного електропривода запропоновано використання перетворювача серії G120 моделі PM240 (Siemens, Німеччина).

2. Здійснено вибір приводного двигуна для механізму пересування та визначено параметри схеми заміщення електродвигуна.

3. Побудовано електромеханічні характеристики електродвигуна та здійснено вибір перетворювача частоти і розраховано його параметри. В результаті обрано несучу частоту інвертора, яка становить 4 кГц.

3. ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Визначення механічних характеристик

При скалярному управлінні потрібно розрахувати та побудувати сімейство механічних характеристик електродвигуна в діапазоні частот від f_{lmin} до f_{lmax} . Мінімальне значення частоти приймаємо 5 Гц, а максимальну частоту визначається частотою мережі живлення 50 Гц [11, 19, 29, 30-34].

Штучну механічну характеристику $M(s)$ електродвигуна для частоти f_l визначають так

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2 \cdot R_2'}{(\omega_0 \cdot f^*) \cdot s \cdot \left[(X_{\Sigma H} \cdot f^*)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot f^*} \right)^2 \right]}$$

де $f^* = f_{li} / f_{lH}$ - відносне значення напруги живлення.

В результаті отриманих значень розрахунку треба побудувати сімейство механічних характеристик $\omega(M)$ для частоти f_l , де значення кутової швидкості обертання двигуна знаходяться за виразом [11, 19, 29, 30-34]:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s) \cdot \frac{rad}{c}$$

Залежність моменту від частоти показана на рис. 3.1.

Для частот $f^*_l / f_{lH} = (1; 0,92; 0,88; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1)$ штучні електромеханічні характеристики $I_l(s)$ та $I'_2(s)$ знаходять наступним чином:

$$I_l(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}$$

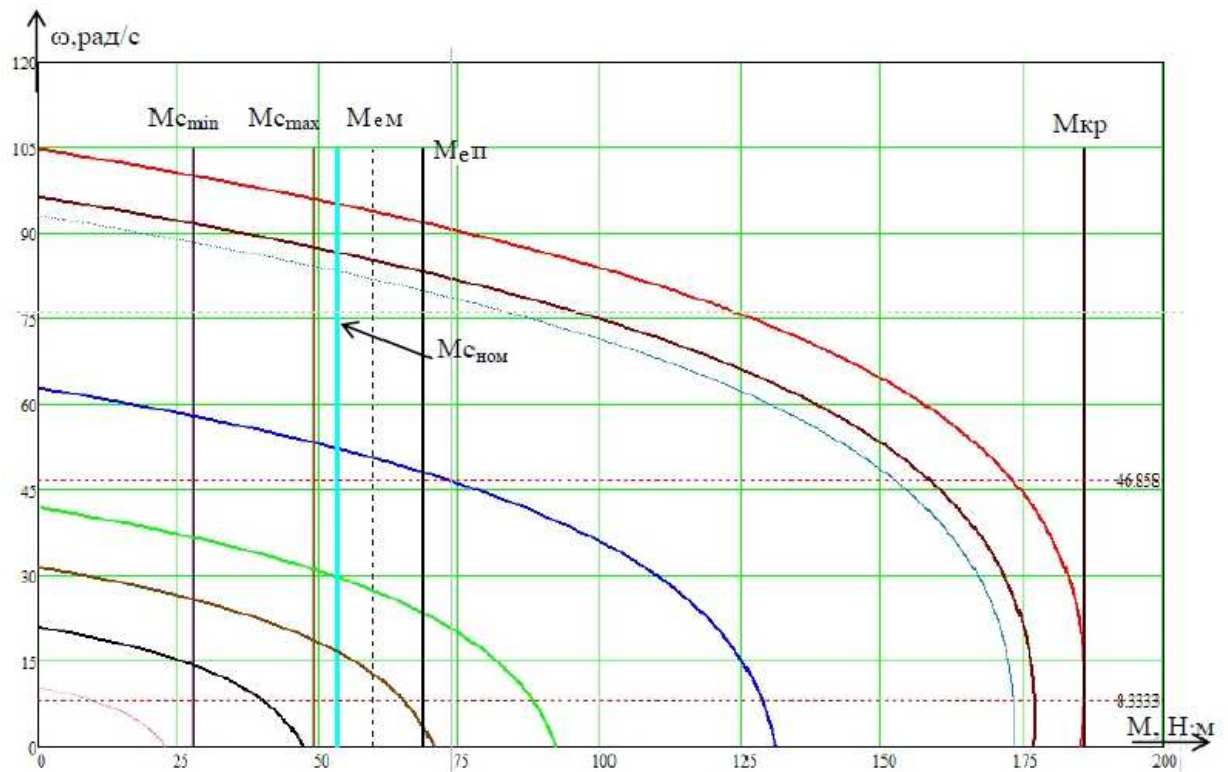


Рисунок 3.1 – Штучна механічна характеристика електродвигуна

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi_n} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{\kappa n}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_\mu} \cdot \frac{f_{1H}}{f_1} \right)^2}}$$

Приведений до обмотки статора струм ротора, А буде:

$$I_0 = \frac{U_{1\phi_n}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2}}$$

Дійсне значення струму холостого ходу, А:

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{\text{кн}} \cdot \frac{f_1}{f_{1\text{н}}}\right)^2}}$$

За результатами обчислень необхідно побудувати електромеханічну характеристику $\omega(I_1)$ для частоти f_1 (як показано на рис. 3.2) де значення кутової швидкості обертання двигуна визначають так [11, 19, 29, 30-34]

$$\omega = \omega_0 \cdot (1-s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

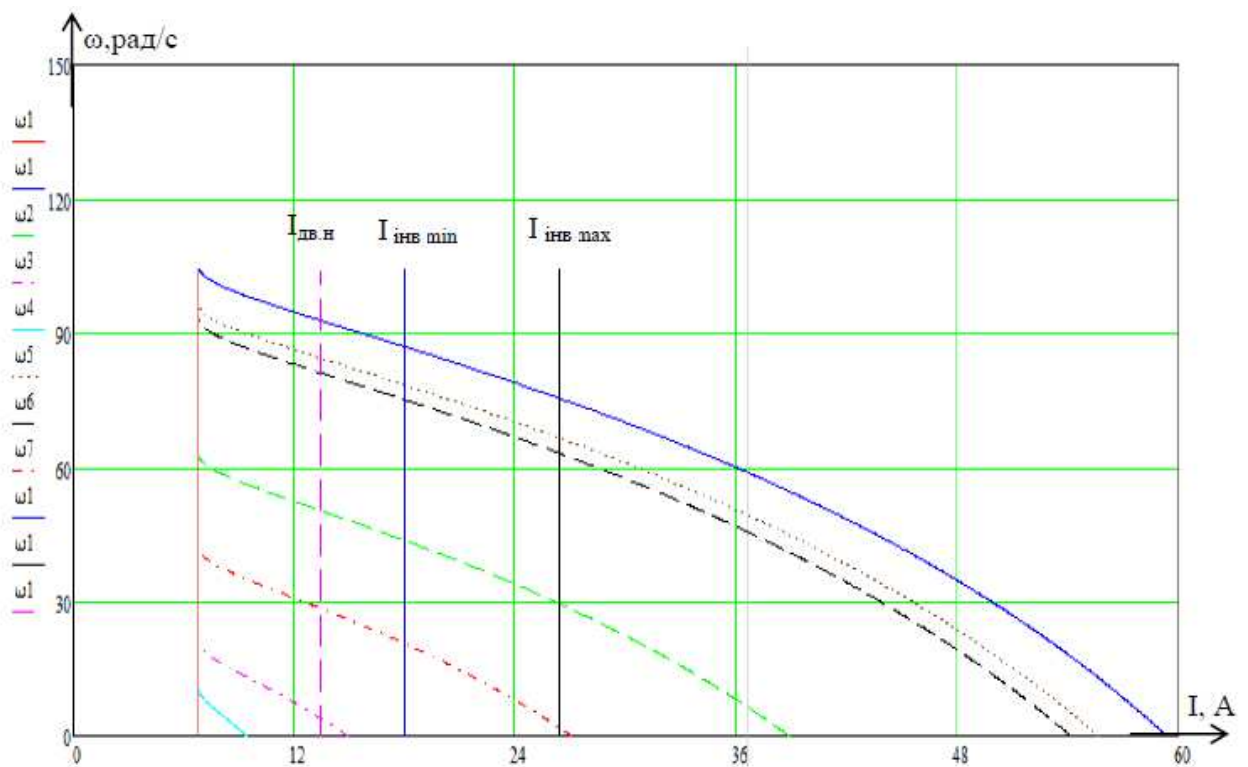


Рисунок 3.2 - Електромеханічні характеристики електродвигуна

3.2. Побудова робочої області

На отримані сімейства механічних характеристик $\omega(M)$ потім необхідно нанести граничні характеристики навантаження для тривалого та короточасних режимів роботи [11, 19, 29, 30-34]:

- $M_{с\text{МІН}}(\omega)=\text{const}$
- $M_{с\text{МАКС}}(\omega)=\text{const}$
- $M_{\text{ЕПМАКС}}(\omega)=\text{const}$

Залежність механічних характеристик показана на рис. 3.3.

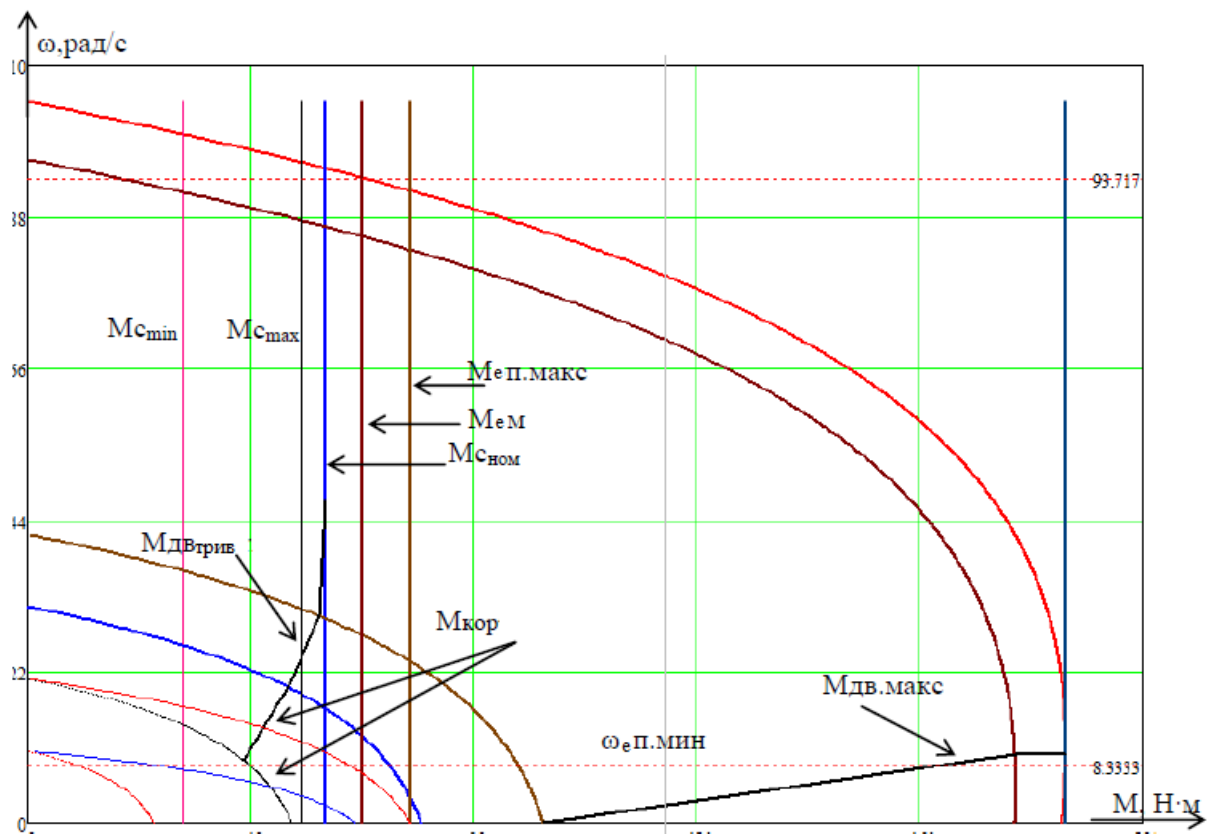


Рисунок 3.3 - Механічні характеристики електропривода та навантаження при скалярному керуванні

На сімейство електромеханічних характеристик $\omega(I_1)$ також наносять залежність тривалого допустимого струму двигуна від швидкості $I_{\text{дв.трив.доп}}(\omega)$:

$$I_{\text{дв.трив.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \cdot \left(0,5 \cdot \frac{\omega}{0,5 \cdot \omega_{\text{двн}}} \right), \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{двн}};$$

$$I_{\text{дв.трив.доп}}(\omega) = I_{\text{двн}} \quad \text{при} \quad \omega > \omega_{\text{двн}}$$

На рис. 3.4 показані ці електромеханічні залежності.

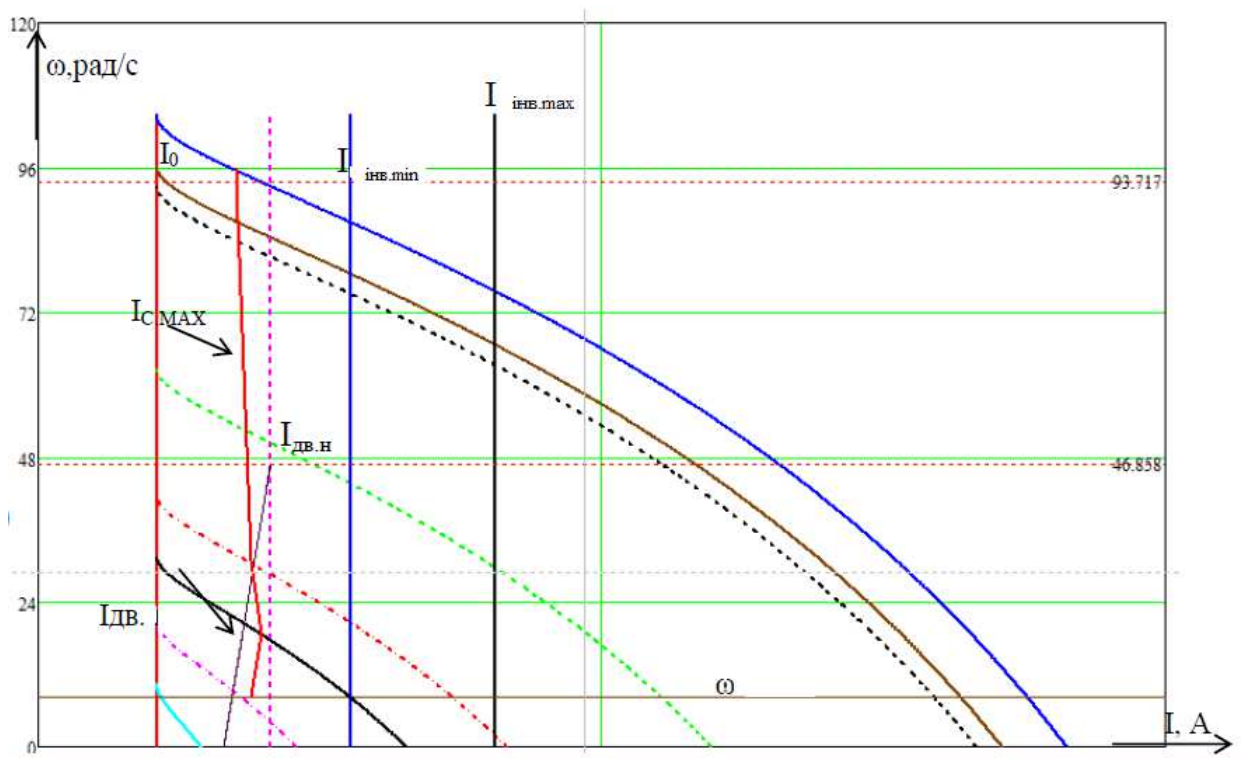


Рисунок 3.4 - Електромеханічна характеристика електропривода

Далі треба розрахувати та нанести на сімейство механічних характеристик $\omega(M)$ залежність допустимого моменту електродвигуна по тривалості від швидкості $M_{\text{дв.трив.доп}}(\omega)$, що відповідає характеристиці $I_{\text{дв.трив.доп}}(\omega)$:

- при $\omega \leq 0,5 \cdot \omega_{дв.н}$ треба для значень відносно $f_1^* = \frac{f_{п.мін}}{f_{1н}} \div 0,5$ знайти

значення ковзання s , яке відповідатиме розв'язку рівняння системи нелінійних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1(s) = I_{дв.н} \cdot \left(0,5 + f_1^* \cdot \frac{1-s}{1-s_H} \right) \\ I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} \end{cases}$$

де

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi_H} \cdot f^*}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f^{*2} + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot f^*}\right)^2}}$$

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{кн} \cdot f^*}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{кн})^2 \cdot f^{*2}}}$$

$$I_0 = \frac{U_{1\phi_H} \cdot f^*}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot f^{*2}}}$$

Для знайдених значень ковзання s за формулою нижче [11, 19, 29, 30-34]:

$$M_{EM}(s) = \frac{3 \cdot \left(U_{1\phi_H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \cdot R_2'}{\left(\omega_0 \cdot f_1^* \right) \cdot s \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot f_1^* \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot f_1^*} \right)^2 \right]}$$

Тепер можна визначити значення моменту:

$$M_{ДВ.ТРИВ.ДОП}(\omega) = M_{ЕМН} , \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{ДВ.Н} < \omega \leq \omega_{ДВ.Н} ;$$

$$M_{ДВ.ТРИВ.ДОП}(\omega) = M_{ДВ.Н} \cdot \left(\frac{\omega_{ДВ.Н}}{\omega} \right) \text{ при } \omega > \omega_{ДВ.Н}$$

та швидкості $\omega = \omega_0 \cdot f_1^* \cdot (1-s)$.

В табл. 3.1 представлені результати розрахунку моменту.

Таблиця 3.1 - Результати розрахунку залежності $M_{ДВ.ТРИВ.ДОП}(\omega)$

f^*	s	$\omega, \text{ рад/с}$	$M_{ДВ.ТРИВ.ДОП}(\omega), \text{ Н}\cdot\text{м}$
0,4	0,282	30,1	52,17
0,3	0,376	20,3	47
0,2	0,565	9,1	38,66

Четвертим кроком слід розрахувати та нанести на сімейство механічних характеристик $\omega(M)$ залежність максимального допустимого моменту електродвигуна $M_{ДВ.МАКС}(\omega) = M_K(\omega_K)$. В силу того, що здійснюється скалярне управління, характеристики при частотах нижче 46 Гц не матимуть яскраво вираженого критичного моменту, він перебуватиме на осі x , розрахунок проводиться для характеристик із частотами 50 і 46 Гц [11, 19, 29, 30-34].

Для ряду значень частоти f_1^* визначаються значення критичного моменту [8]:

- у першій зоні ($f_1 \leq f_{1Н}$):

$$M_K(f_1^*) = \frac{3 \cdot (U_{1ФН}^2 \cdot f_1^*)^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot f_1^* \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{[(R_1^2 + (X_{КН}^2 \cdot f_1^*)^2)] \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1'}{X_{\mu} \cdot f_1^*} \right)^2 \right]} \right\}}$$

- у другій зоні ($f_1 > f_{1H}$ та $U_1 = U_{1H}$)

$$M_K(f_1^*) = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot f_1^* \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{\left[(R_1^2 + (X_{KH}^2 \cdot f_1^*)^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1'}{X_\mu \cdot f_1^*} \right)^2 \right] \right]} \right\}}$$

- для критичного ковзання:

$$s_K(f_1^*) = R_1^2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1'}{X_\mu \cdot f_1^*} \right)^2}{R_1^2 + (X_{KH}^2 \cdot f_1^*)^2}}$$

- для швидкості

$$\omega_K(f_1^*) = \omega_0 \cdot \left| 1 - s_K \cdot (f_1^*) \right|$$

В табл. 3.2 показані результати розрахунків.

Таблиця 3.2 - Результати розрахунку залежності $M_{ДВ.МАКС}(\omega)$

f^*	s	$\omega, \text{рад/с}$	$M_{ДВ.МАКС}(\omega), \text{Н}\cdot\text{м}$
1	0,905	10	186,275
0,92	0,896	10	177,092
92,482	1	0	92,4816

Розраховується та наноситься на сімейство електромеханічних характеристик $\omega(I_1)$ залежність $I_{K.МАКС}(\omega)$, що відповідає тривалому максимальному навантаженню $M_{K.МАКС}(\omega) = \text{const}$.

Для цього необхідно для низки значень частоти $f_1^* = f_{П.мін}/f_{1H} \div f_{П.мін}/f_{1H}$ визначити відповідні $M_{K.МАКС}$ значення ковзання, вирішивши щодо s рівняння:

$$M_{C.МАКС} = \frac{3 \cdot U_{1\Phi нї} \cdot R_2'}{(\omega_0 \cdot f_1^*) \cdot s \cdot \left[(X_{KH} \cdot f_1^*)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu} \cdot f_1^*} \right)^2 \right]}$$

Відповідно до виразу $I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)}$ для отриманих значень ковзання s розраховувати треба значення струму $I_{к.макс}$ та значення швидкості $\omega = \omega_0 \cdot f_1^* \cdot (1-s)$, результати приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати визначення залежності $I_{к.макс}(\omega)$

f^*	s	$\omega, рад/с$	$I_{к.макс}, А$
0,1	0,084	95,9	11,448
0,92	0,092	87,5	11,464
0,4	0,262	30,9	12,255
0,3	0,408	18,6	12,857
0,2(корект)	0,427	12	12,313

Оскільки при частотах, що становлять 10 Гц і менше двигун не буде запускатися при великому навантаженні і при частотах менше 20 Гц двигун не може працювати тривалий час, оскільки він перегрівається. Причина цього полягає у падінні напруги $I_l \cdot R_l$ в статорному ланцюзі. Щоб уникнути цього, потрібно збільшити напругу відповідно до вольт-частотної характеристики, як показано на рис. 3.5. У роботі запропоновано використати спосіб корекції напруги для частот 5 та 10 Гц.

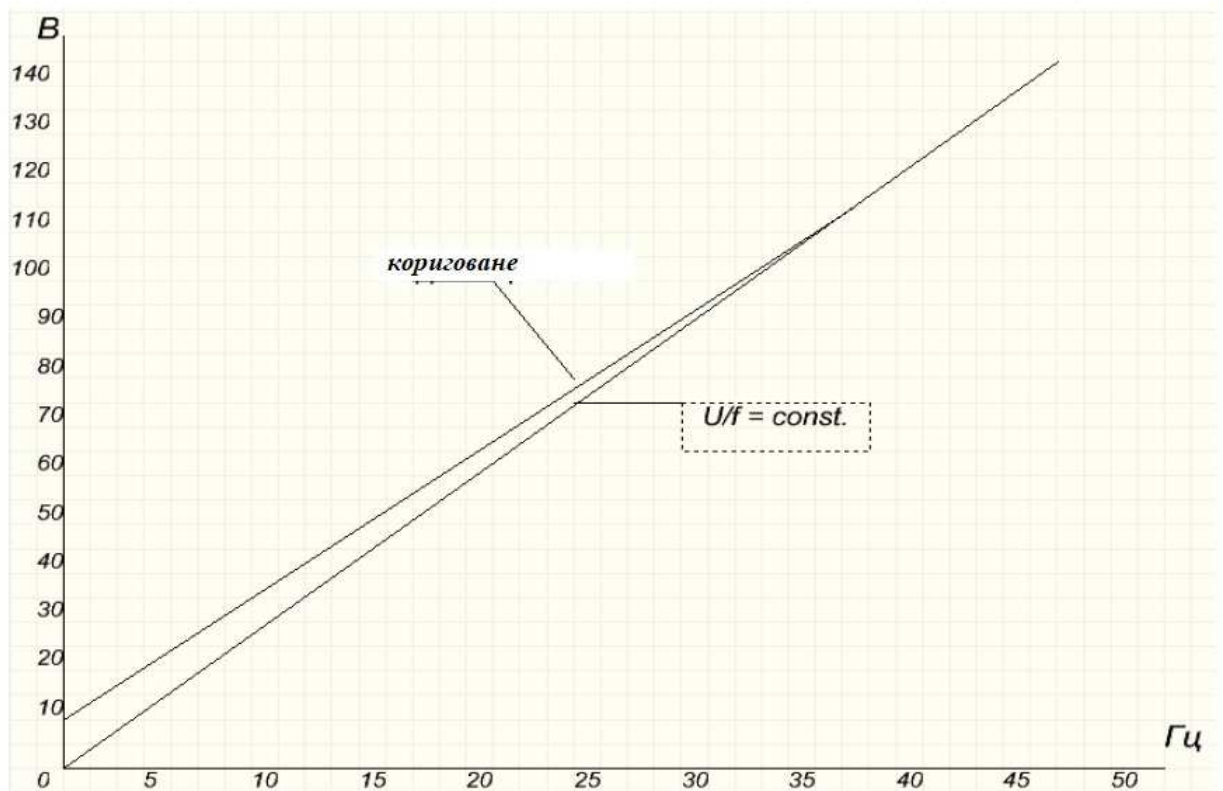


Рисунок 3.5 – Вольт-частотна характеристика

За результатами побудови механічних характеристик електроприводу $\omega(M)$ та навантаження $M(\omega)$ перевіряють правильність вибору двигуна за моментом. Маємо:

$$M_{\text{ДВ.ТРИВ.ДОП}}(\omega) \geq M_{\text{к.макс}}$$

$$53,352 \text{ Н}\cdot\text{м} \geq 49,164 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$M_K \geq M_{\text{ЕПмакс}}$$

$$186,272 \text{ Н}\cdot\text{м} \geq 68,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Отже робимо висновок, що за моментом двигун обрано правильно.

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу $\omega(I_1)$ перевіряють правильність вибору двигуна за струмом.

Маємо:

$$I_{\text{ДВ.ТРИВ.ДОП}}(\omega) \geq I_{\text{к.макс}}$$

$$11,187 \text{ А} \geq 12,4 \text{ А}$$

Внаслідок того, що була зроблена корекція напруги характеристика $I_{\text{к.макс}}$ має велике значення. Двигун за струмом обраний правильно.

3.3. Висновки до розділу

При керуванні асинхронними електроприводами, які працюють по законам регулювання класу U_1/f_1 максимальний момент двигуна при зменшенні швидкості суттєво зменшується, а здатність перевантаження знижується, що в свою чергу призводить до обмеження діапазону регулювання швидкості.

В роботі цей недолік було виправлено тим, шляхом виконання корекції напруги на частотах, що менше 20 Гц. Це дозволить зберегти перевантажувальну здатність та діапазон регулювання, а також оптимальну роботу перетворювача. Обраний перетворювач повністю відповідає вимогам завдання.

4. ПОБУДОВА СХЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВОГО КАНАЛУ

4.1. Асинхронний електропривод. Функціональна схема

У найпростішому випадку частотно-регульовані асинхронні електроприводи зі скалярним керуванням можуть бути реалізовані за розімкнутою структурою. Закон частотного регулювання $U_1/f_1 = \text{const}$ при скалярному управлінні вибирається залежно від характеру навантаження виробничого механізму. Для механізмів з постійним навантаженням вибирається закон керування $U_1/f_1 = \text{const}$, для механізмів з вентиляторним навантаженням доцільно вибрати закон керування $U_1/f_1^2 = \text{const}$. У першому випадку при діапазоні регулювання швидкості більш ніж 1/2 доцільно вибрати двигун із примусовою вентиляцією, а в другому при будь-якому діапазоні регулювання достатньо вибрати двигун із самовентиляцією. Функціональна схема асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням представлена на рис. 4.1.

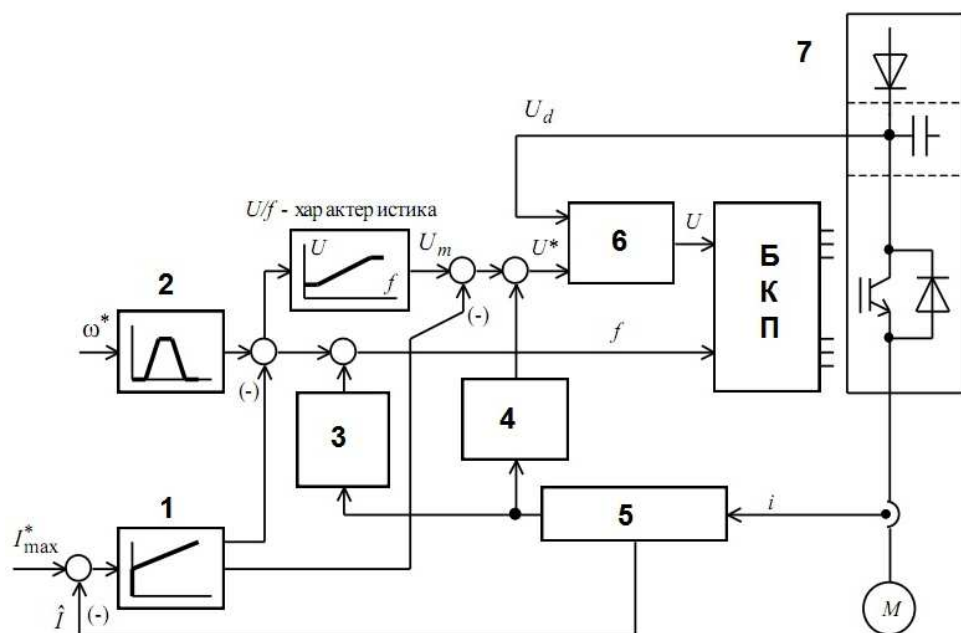


Рисунок 4.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу зі скалярним частотним керуванням без датчика швидкості:

*1-регулятор обмеження струму; 2-задавач інтенсивності швидкості;
3-компенсація ковзання; 4-IR-компенсація; 5-оцінка дійсного значення струму;*

6-Уd-коректор; 7-перетворювач частоти; БКП-блок керування перетворювачем

4.2. Дослідження параметрів для моделювання роботи системи

До складу силового каналу електроприводу входять:

- перетворювач частоти, який виконує функцію електричного перетворювача;
- електродвигун, який виконує функцію електромеханічного перетворювача;
- механічна система, яка виконує функцію механічного перетворювача.

Модель двофазного асинхронного електродвигуна у нерухомій системі координат статора α, β , показана на рис. 4.2. [8]

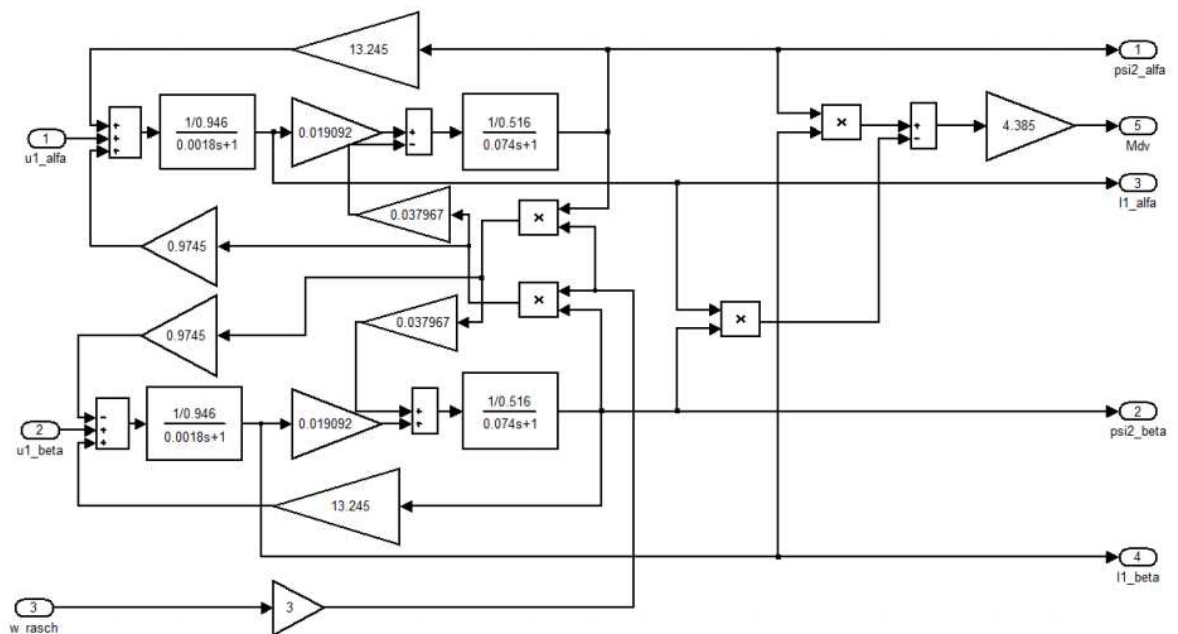


Рисунок 4.2 - Схема моделі для імітаційного моделювання роботи асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат статора α, β

При вирішенні завдань аналізу та синтезу регульованих асинхронних електроприводів зазвичай застосовуються моделі електродвигуна, складені на базі узагальненої електричної машини і виконані в нерухомій або двофазній системі координат (x, y) , що обертається. На рис. 4.3 представлена структурна схема асинхронного двигуна в нерухомій системі координат статора α, β .

Момент інерції механізму визначається за формулою:

вихідної напруги і на зниження частоти перетворювача. В такому випадку доцільно одночасно понижувати як напругу так і частоту перетворювача, при цьому необхідно підтримувати сталий стан магнітного потоку та моменту двигуна.

Параметри контуру обмеження струму.

Введемо такі вхідні та вихідні параметри:

$T_{\mu CP} = T_{PK.C} + T_{ЗК.I}$ - мала постійна часу в прямому каналі контуру струму;

$T_{\mu CO} = T_{ЗЗ.C} + T_{\phi.OS}$ - мала постійна часу ланцюга зворотного зв'язку контуру струму;

$T_{PK.C}$ - інтервал квантування керування в прямому каналі контуру струму, с;

$T_{ЗК.I}$ - інтервал часу затримки подачі керування від регулятора струму до ключів інвертора, с;

$T_{ЗЗ.C}$ - інтервал квантування сигналів у ланцюгу зворотного зв'язку контура струму, с;

$T_{\phi.OS}$ - постійна часу аналогового фільтра в ланцюгу вимірювання струму, с;

$k_C = k_{ДС} * k_{ЗЗ.C}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

$k_{ДС} = (0,5 * 2^n_{АЦП_{ДС}}) / (\sigma_T * (\sqrt{2} * I_{ЕП.МАКС}))$ - коефіцієнт передачі датчика струму, 1/А, де

σ_T - коефіцієнт, який враховує можливість перерегулювання струму;

$n_{АЦП_{ДС}}$ - розрядність АЦП датчика струму;

$k_{ЗЗ.C}$ - коефіцієнт узгодження сигналів зворотного зв'язку та завдання на вході контура струму;

$N_{ЗС.МАКС}$ - максимальне значення задання на вході контура струму, яке відповідає максимальному значенню струму привода $I_{ЕП.МАКС}$.

Максимальну швидкодію контуру струму можна досягти при виборі таких параметрів:

$$T_{ЗЗ.C} = T_{PK.C} = T_{ЗК.I} = T_{ШИМ}, T_{\phi.OS}$$

Параметри для розрахунку налаштувань контуру обмеження струму.
 Передаточна функція ПІ-регулятора обмеження струму має вигляд:

$$W(p)_{\text{pos}} = k_{\text{pos}} \cdot \frac{T_{\text{pos}} p + 1}{T_{\text{pos}} p} = 7,804 \cdot \frac{0,001756 p + 1}{0,001756 p}$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму:

- при регулюванні за каналом керування частотою інвертора:

$$k_{\text{pos } f} = \frac{T_{1E}}{k_{if} k_C \alpha_C T_{\mu CE}} = \frac{0,001756}{1,32 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,000375} = 1,77$$

- при регулюванні за каналом керування напругою інвертора

$$k_{\text{pos } U} = \frac{T_{1E}}{k_{iu} k_C \alpha_C T_{\mu CE}} = \frac{0,001756}{0,3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,000375} = 7,804$$

де

$$k_{if} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} \cdot \frac{1}{R_{1E}} = \frac{220}{50} \cdot \frac{1}{3,331} = 1,32 \text{ A/Гц} \quad - \text{ коефіцієнт передачі через}$$

канал керування частотою;

$$k_{iu} = \frac{1}{R_{1E}} = \frac{1}{3,331} = 0,3 \text{ A/B} \quad - \text{ коефіцієнт передачі через канал керування}$$

напругою;

$k_C = 1$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом, 1/A;

$$T_{\mu CE} = \frac{T_{33.C}}{n_C} + T_{3K.I} + T_{\Phi.3C} = \frac{0,00025}{2} + 0,00025 + 0 = 0,000375 \text{ c} \quad -$$

еквівалентна мала постійна часу контуру, після оптимізації;

$n_T = 1/3$ - коефіцієнт апроксимації ланки чистого запізнення аперіодичною ланкою;

$\alpha_T = 2$ - коефіцієнт типового налаштування контуру струму по модульному оптимуму (МО).

Постійна часу регулятора струму визначається так: $T_{POC}=T_{IE}=0,001756$ с.

4.3. Висновки до розділу

За умови одночасного керування за каналами напруги та частоти, контур обмеження струму слід налагоджувати таким чином, щоб відбувалось регулювання напругою.

Налаштування контуру струму близьке до типового налагодження, МО досягається за умови вибору коефіцієнта $n_T=2$. Головним режимом роботи контуру обмеження струму є реакція на впливи збурюючих діянь, в результаті яких струм двигуна може досягати значень перевищення заданого допустимого значення.

Контур забезпечує нульову статичну помилку стабілізації струму в режимі стопоріння двигуна $I_{в.ст.}=0$. У перехідних режимах, коли швидкість обертання двигуна змінюється, з'являється динамічна помилка збурення, величина якої залежить від похідної швидкості.

5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

5.1. Базова схема

На рис. 5.1 наведено функціональну схему моделі асинхронного електропривода.

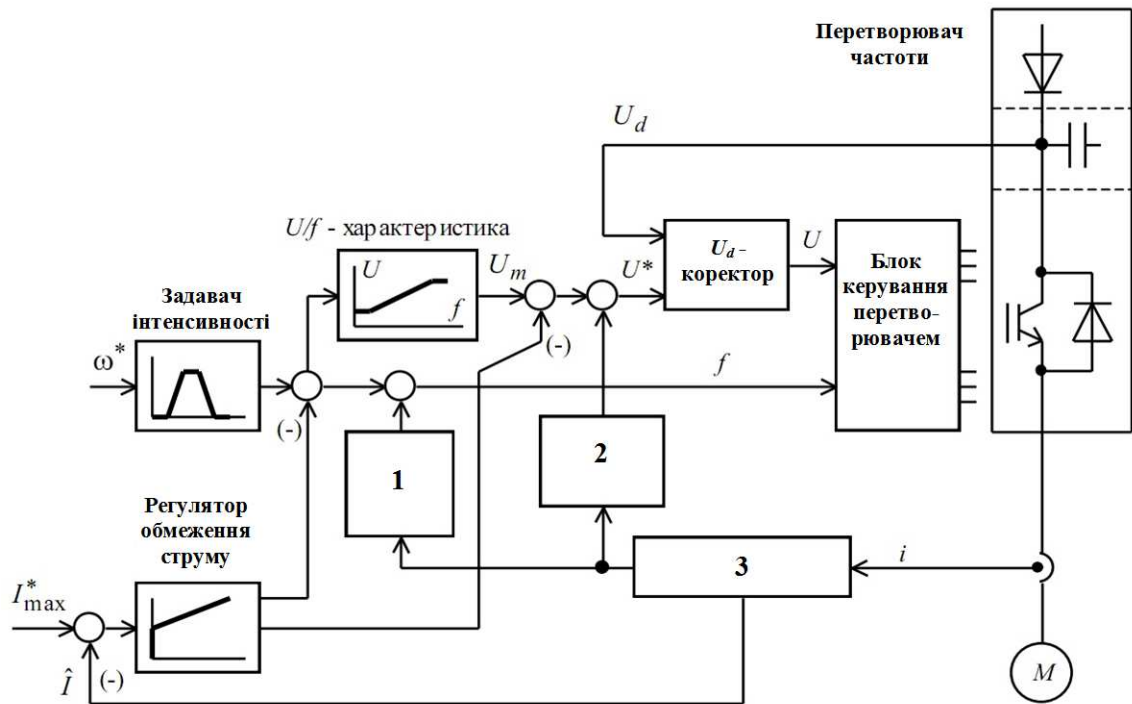


Рисунок 5.1 – Функціональна схема електропривода:

1 – компенсація ковзання; 2 – IR-компенсація;

3 – оцінювання дійсного значення струму

На функціональній схемі символом * позначені сигнали завдання та управління. ω – фактичне значення кутової швидкості обертання електродвигуна (ротора двигуна). Присутній задавач інтенсивності швидкості з лінійною або S-подібною характеристикою, а також формувач напруги керування двофазним асинхронним двигуном, який формує дві напруги змінного струму u_α і u_β . Δf_{1k}^* та ΔU_{1k}^* - компенсаційні сигнали керування відповідно в каналі регулювання частоти та напруги.

Перевірка адекватності системи проводиться для зіставлення теоретичних і практичних розрахункових результатів. Дослідження проводяться в програмному середовищі Matlab Simulink, під час виконання роботи будуть досліджені дві моделі:

Перша - модель однозонного регульованого асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням на базі моделі двофазного асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат α, β , з датчиками струмів $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$, наведена на малюнку 5.2.

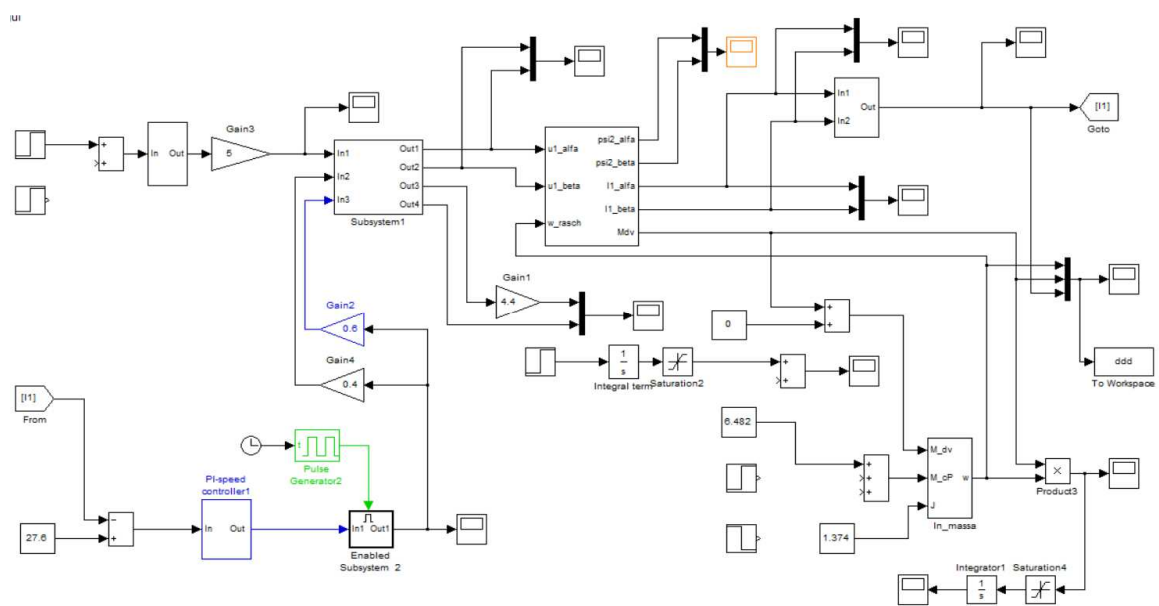


Рисунок 5.2 – Імітаційна модель асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням на базі моделі двофазного електродвигуна у нерухомій системі координат α, β , з корекцією вольт-частотної характеристики та датчиками струмів $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$.

Друга - модель однозонного регульованого асинхронного електроприводу з частотним скалярним керуванням на базі моделі двофазного асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат α, β , з датчиками струмів $i_{1\alpha}, i_{1\beta}$, ІР-компенсацією, компенсацією ковзання та регулятором обмеження, показана на рис. 5.3.

Таблиця 5.1 – Результати дослідження

Прогнозовані		Отримані	
ω_0	I_0	ω_0	I_0
104,7	6.85	103,91	6,87

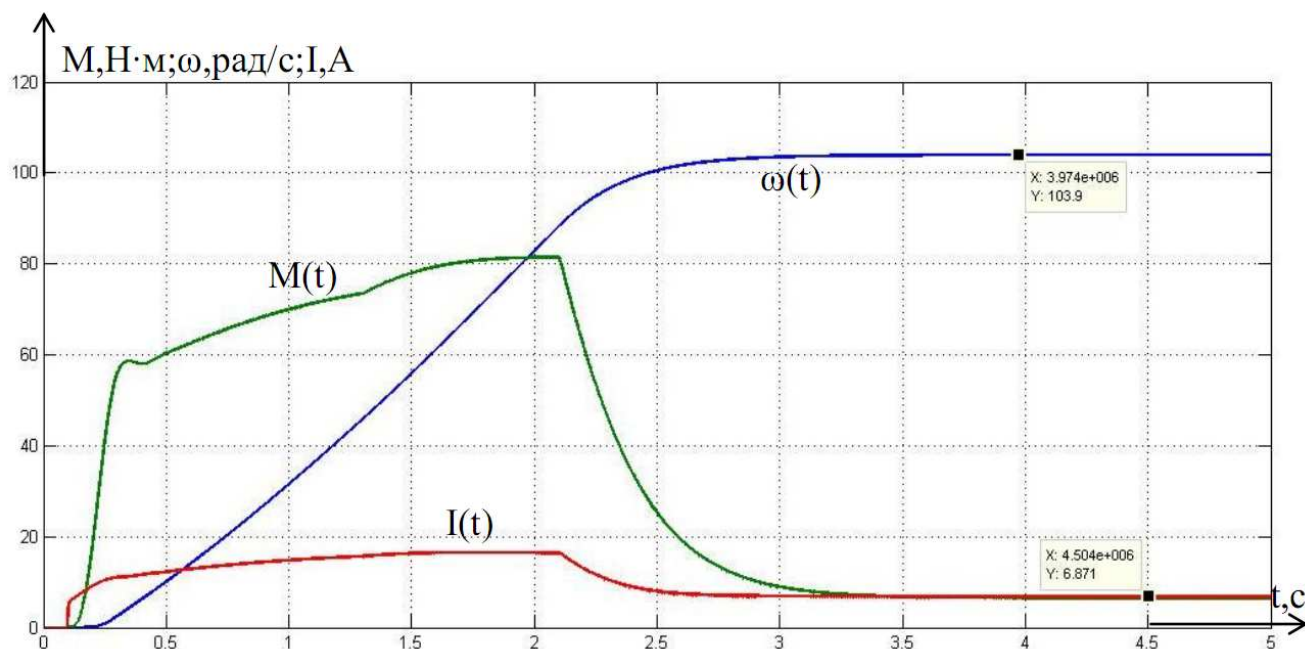


Рисунок 5.4 – Пуск на холостому ході

Під час пуску навантаження $U_{zc\ max} = 10$ В маємо результати наведені в таблиці нижче та на рис. 5.5.

Таблиця 5.2– Результати дослідження

Прогнозовані				Отримані			
ω_0	I_0	ω_H	I_H	ω_H	I_H	ω_0	I_0
104,71	6.84	93, 72	13,38	93,47	12,54	103,9	6,87

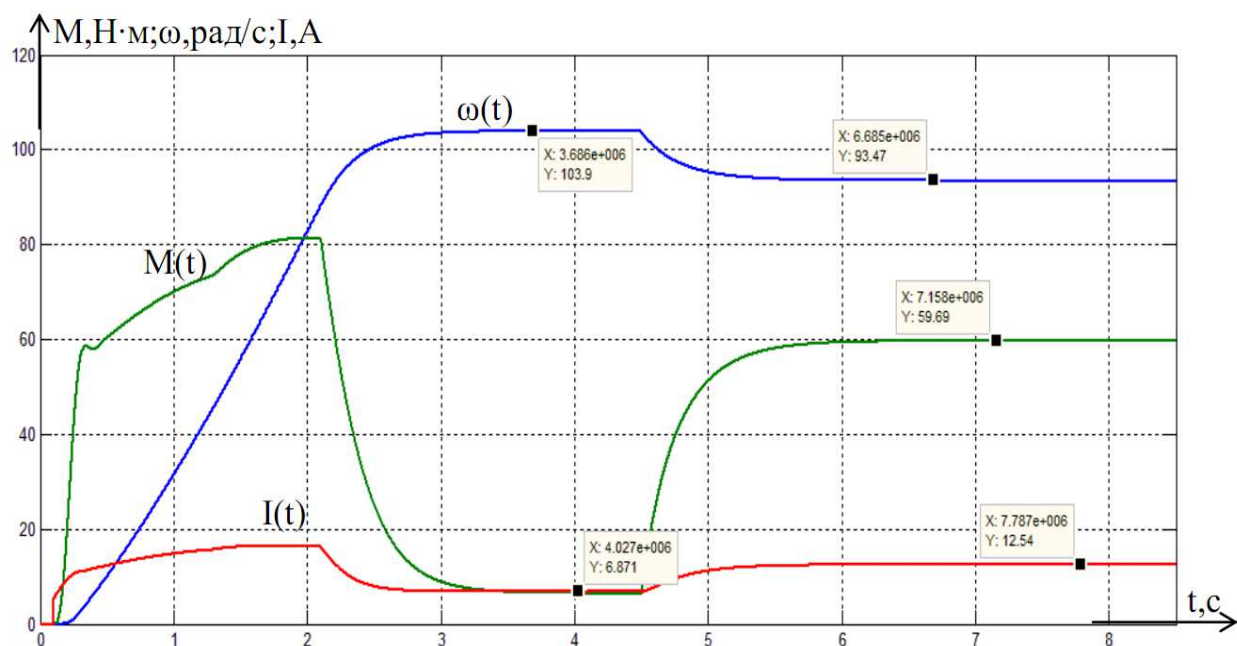
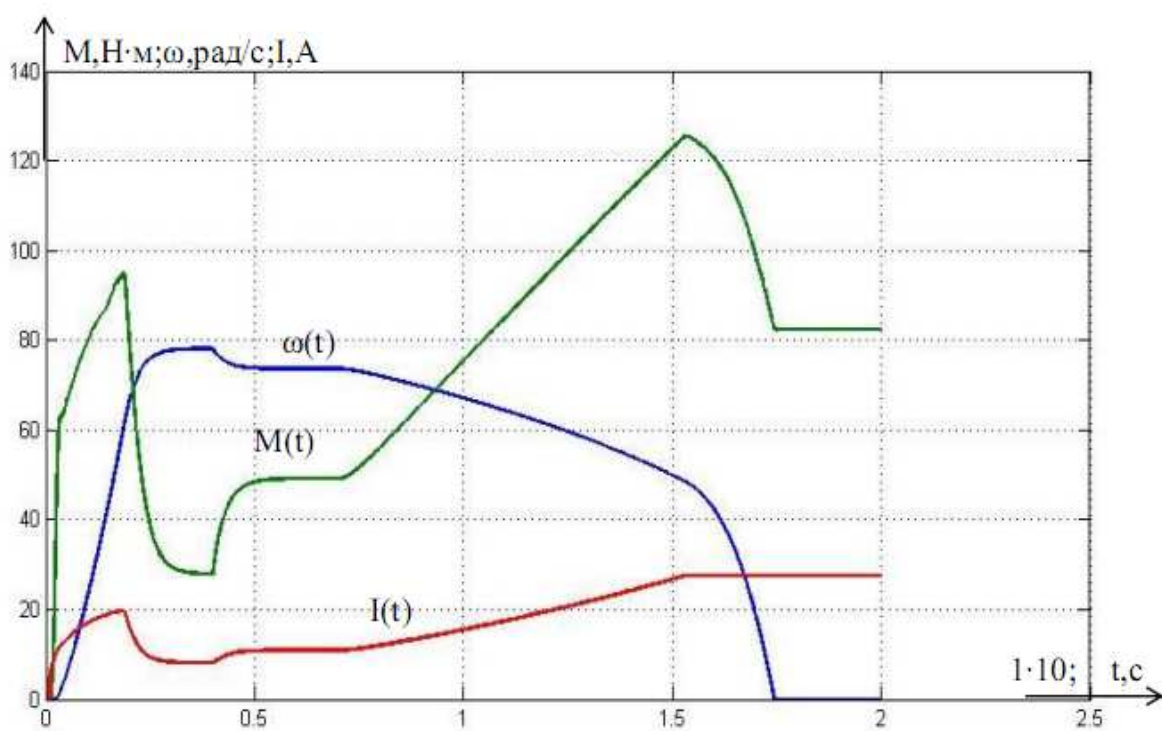
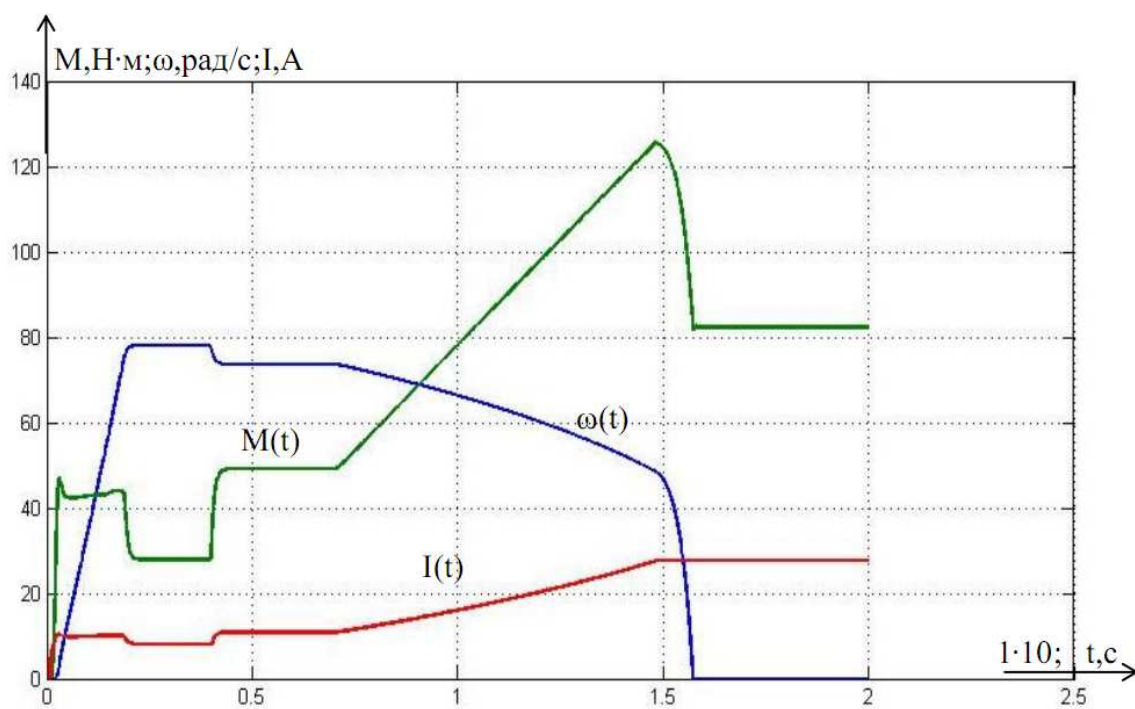


Рисунок 5.4 – Пуск та накид навантаження

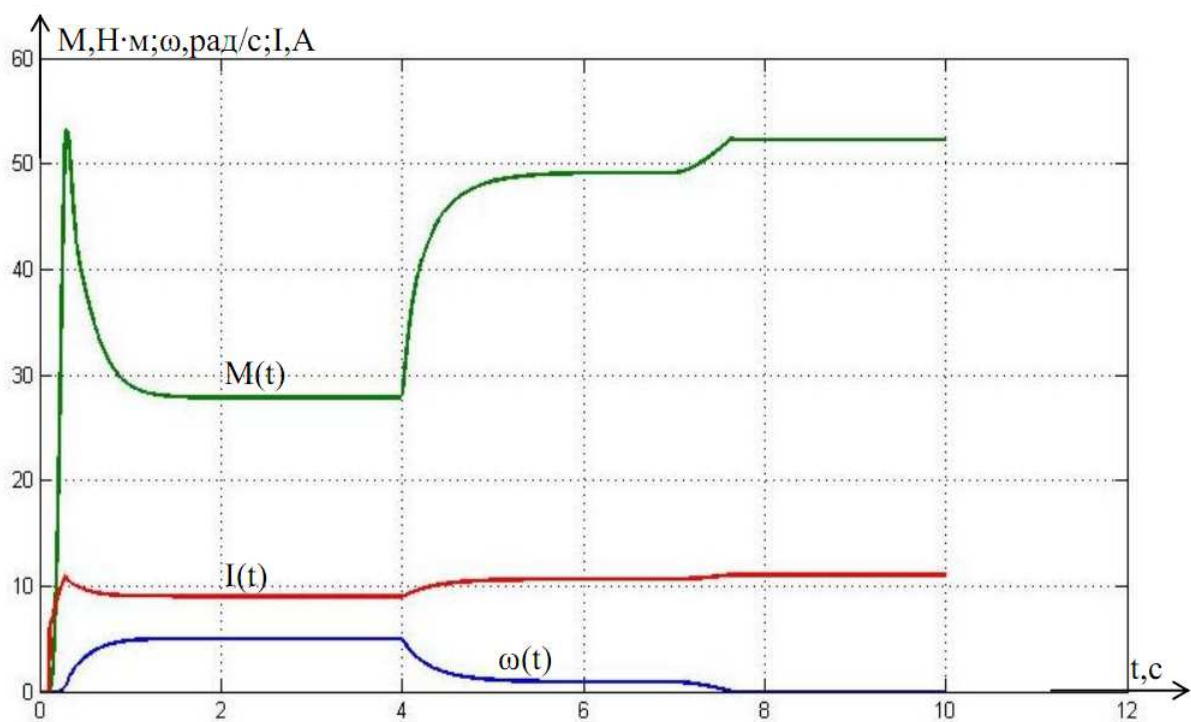
Модель 1.



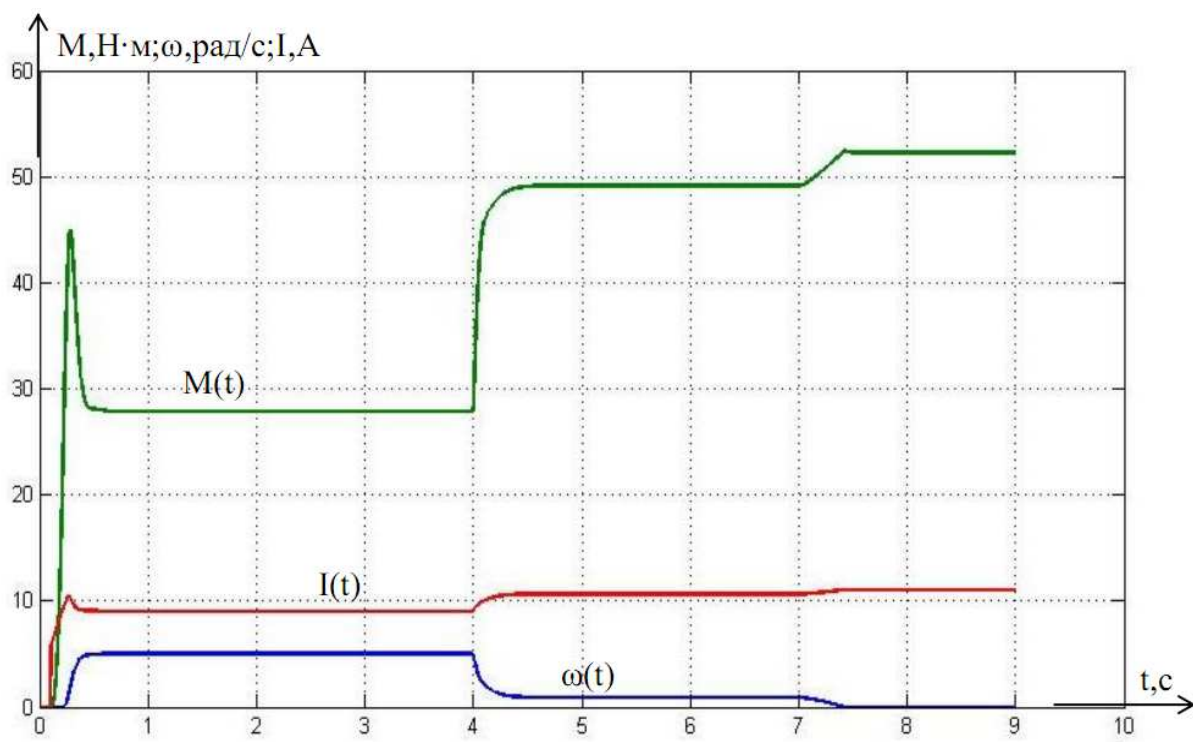
A)



Б)



В)

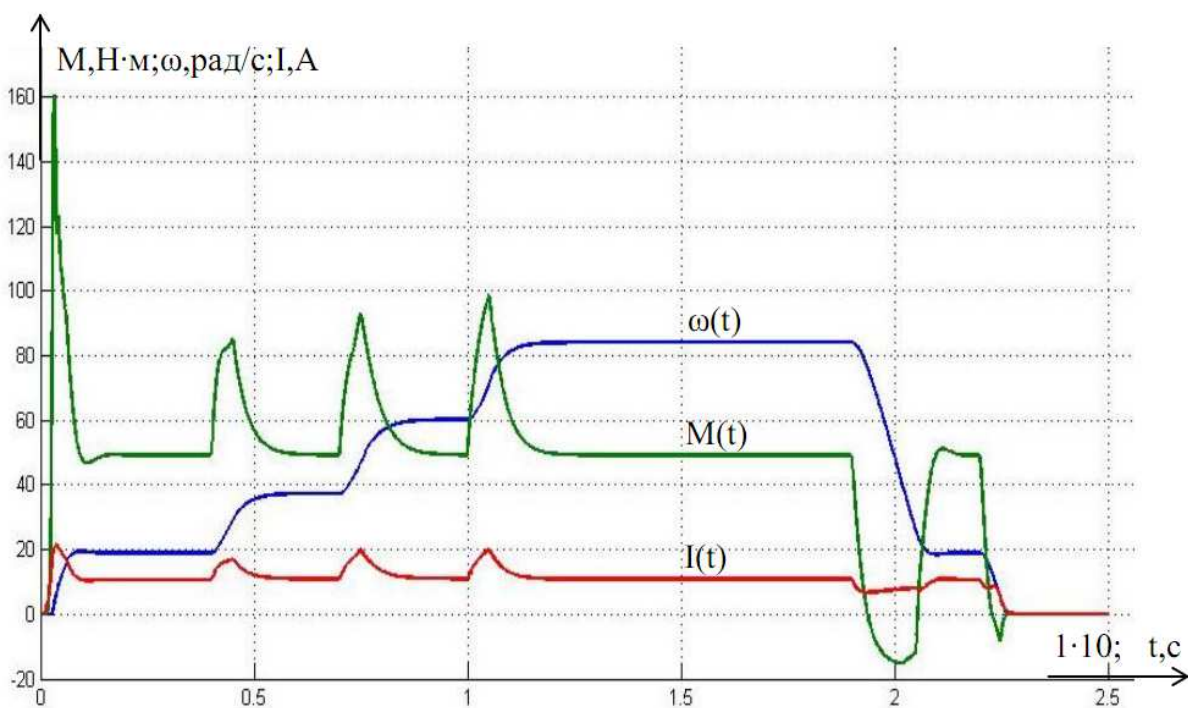


Г)

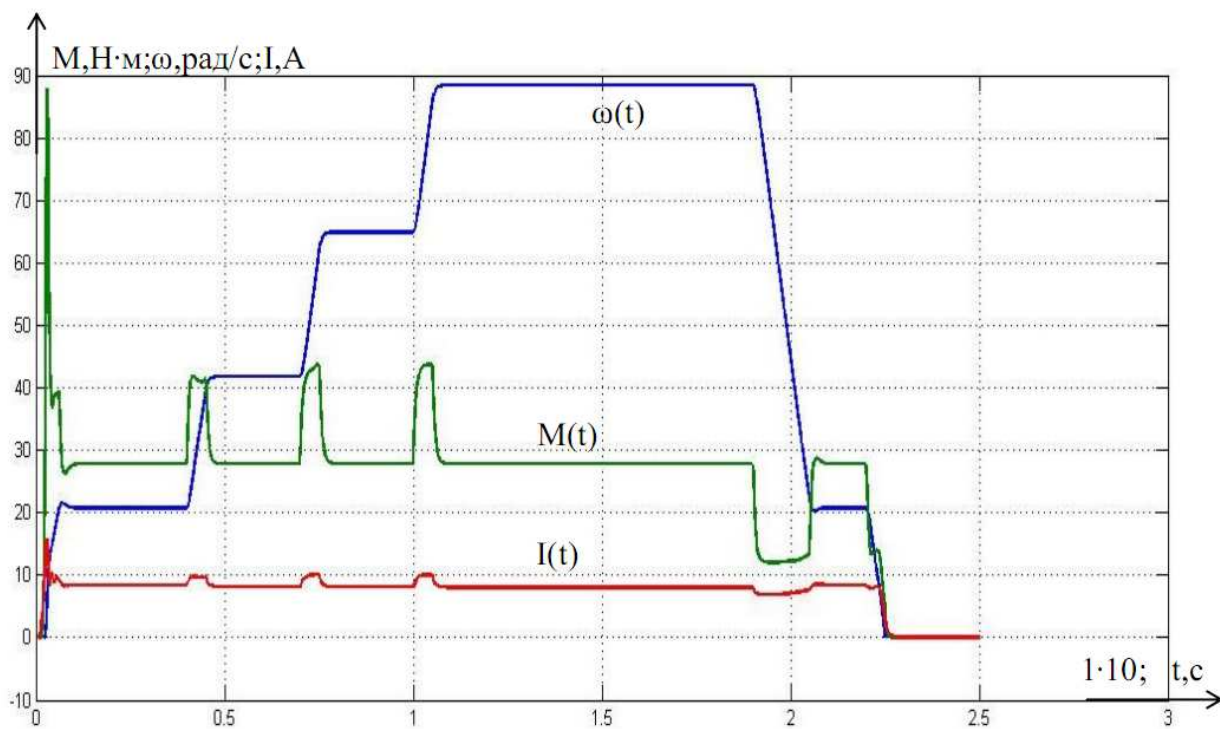
Рисунок 5.5 – Відпрацювання завдання:

А) ПРИ $U_{3C\ MAX}=8,9\ В$, $J_{MAX}=1,374\ КГ\cdot М^2$; Б) ПРИ $U_{3C\ MAX}=8,9\ В$, $J_{MIN}=0,337\ КГ\cdot М^2$;

В) ПРИ $U_{3C\ MIN}=0,89\ В$, $J_{MAX}=1,374\ КГ\cdot М^2$; Г) ПРИ $U_{3C\ MIN}=0,89\ В$, $J_{MIN}=0,337\ КГ\cdot М^2$



А)

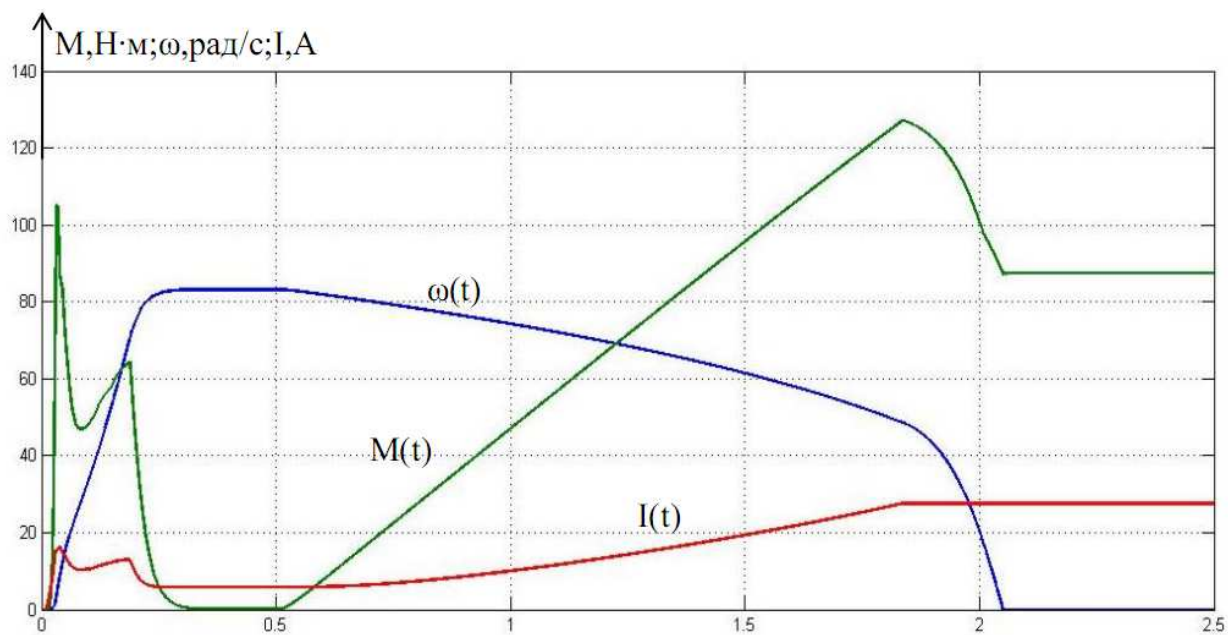


Б)

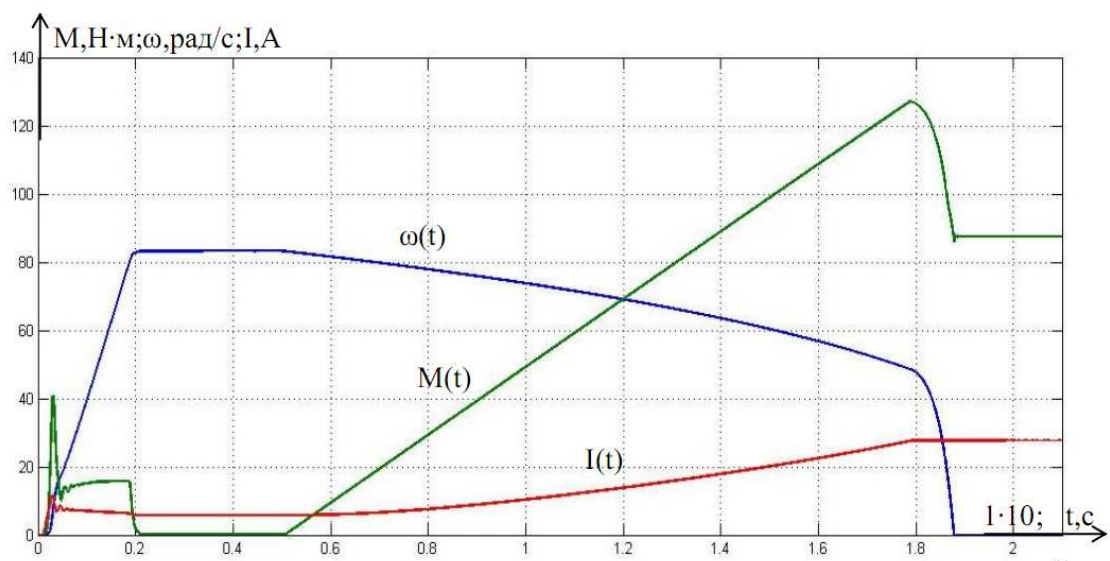
Рисунок 5.6 – Імітація робочого циклу:

А) ПРИ $M_{СМАХ}$, $J_{МАХ}$; Б) ПРИ $M_{СМІН}$, $J_{МІН}$

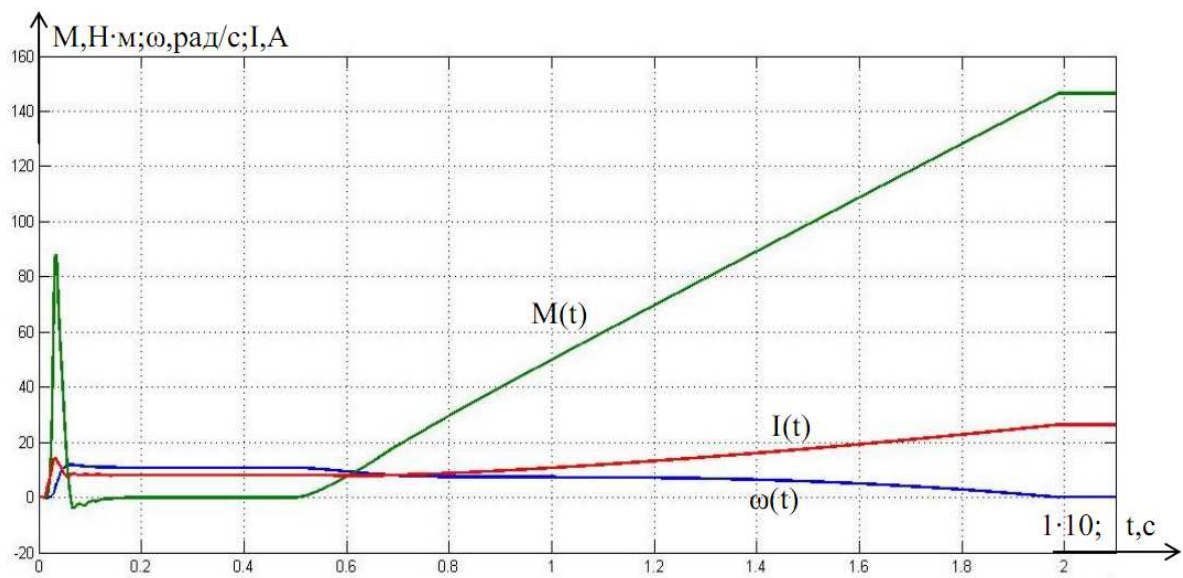
МОДЕЛЬ 2.



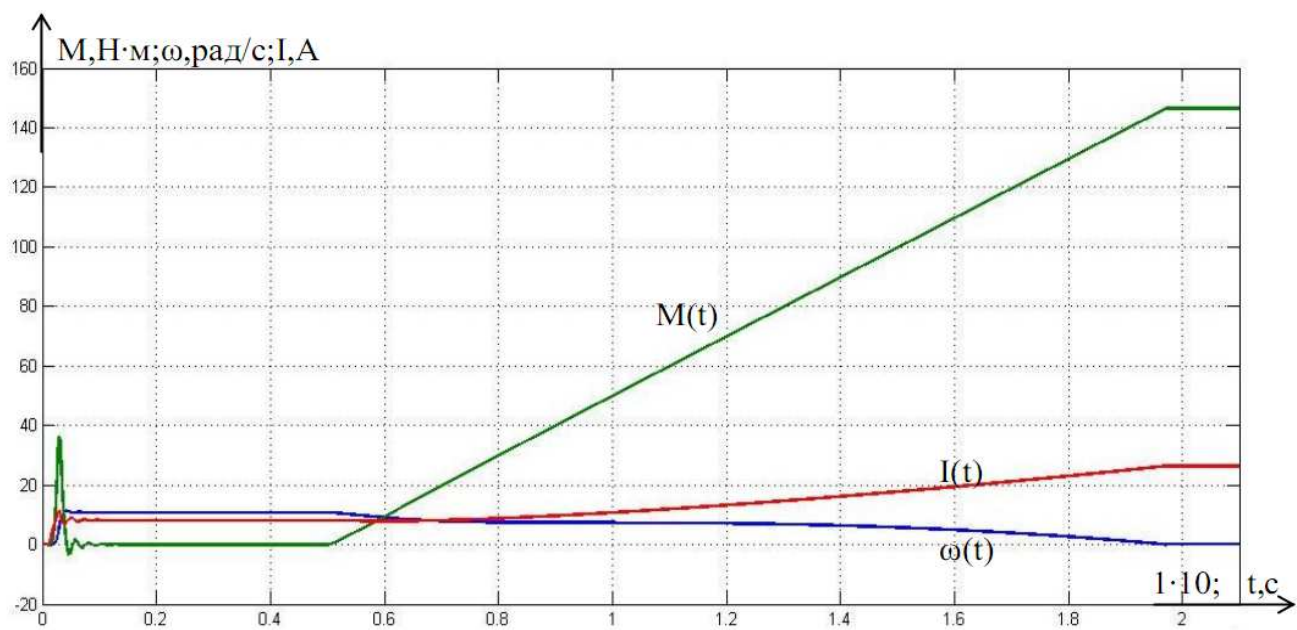
А)



Б)



В)

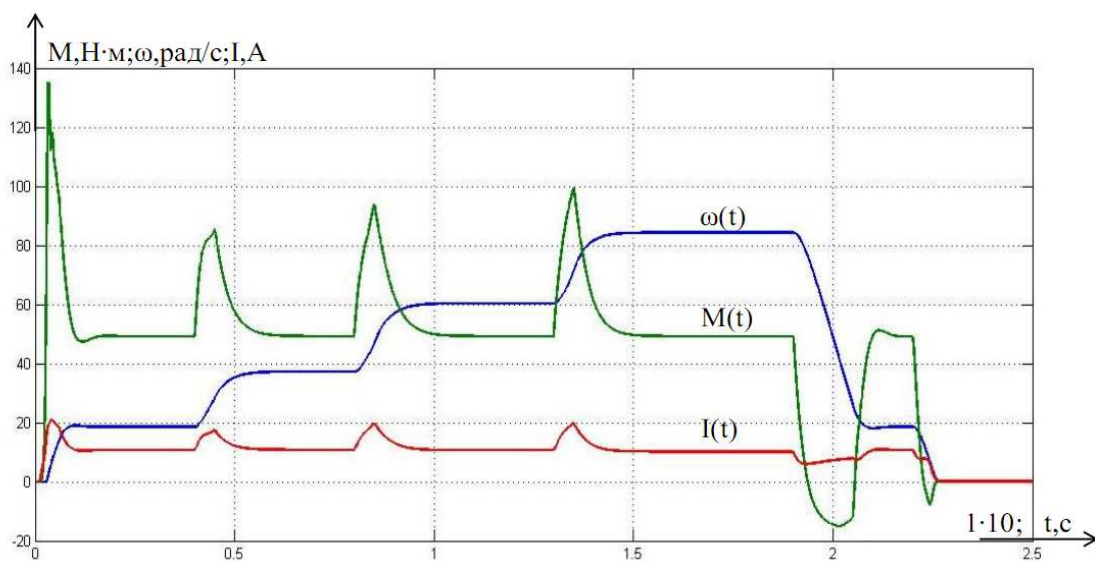


Г)

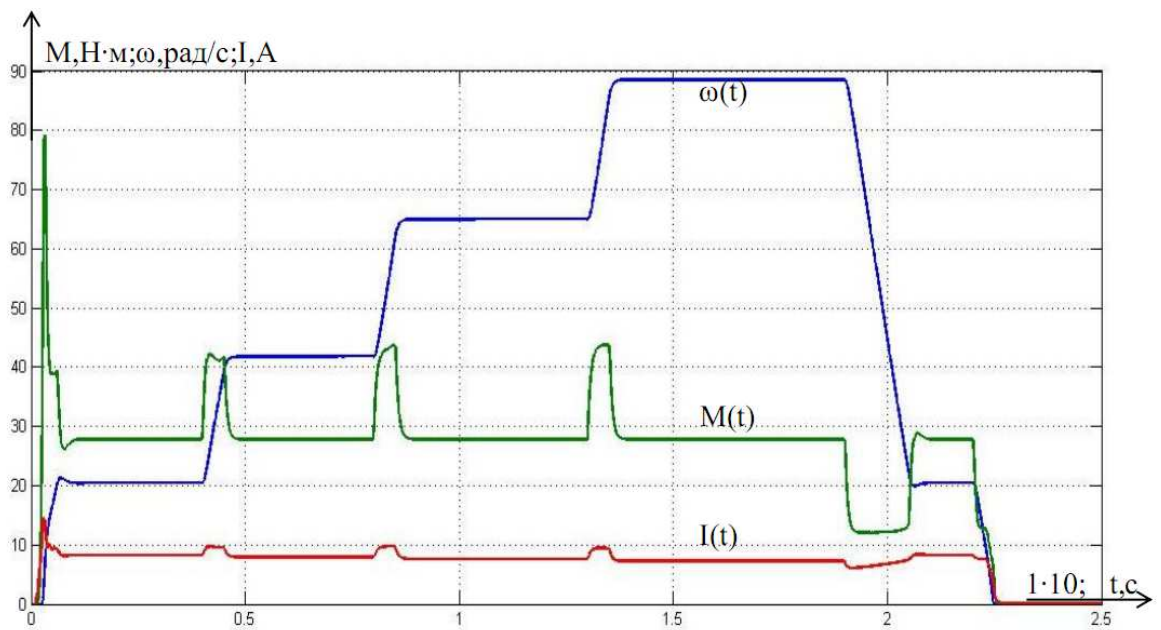
Рисунок 5.7 – Відпрацювання завдання:

А) ПРИ $U_{3C\ MAX} = 8,9\ В$, $J_{MAX} = 1,374\ КГ \cdot М^2$; Б) ПРИ $U_{3C\ MAX} = 8,9\ В$, $J_{MIN} = 0,337\ КГ \cdot М^2$;

В) ПРИ $U_{3C\ MAX} = 0,89\ В$, $J_{MAX} = 1,374\ КГ \cdot М^2$; Г) ПРИ $U_{3C\ MAX} = 0,89\ В$, $J_{MAX} = 0,337\ КГ \cdot М^2$



А)



Б)

Рисунок 5.8 – Імітація робочого циклу:

А) ПРИ $M_{C\text{MAX}}$, J_{MAX} ; Б) ПРИ $M_{C\text{MIN}}$, J_{MIN}

5.3. Висновки до розділу

В результаті аналізу результатів імітаційного моделювання роботи електроприводу можна зробити висновок, що асинхронний електропривод зі частотно-скалярним керуванням та компенсацією вольт-частотної характеристики, а також з ІР-компенсацією та компенсацією ковзання здатний забезпечувати необхідний діапазон регулювання швидкості механізму переміщення візка мостового крана. Перехідні процеси в електроприводі мають плавний характер, а коливання моменту відсутні. При цьому вузол, що обмежує струм, повинен забезпечувати властивість обмеження струму та моменту двигуна при перевантаженнях.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській кваліфікаційній роботі отримано наступні результати:

1. Здійснено огляд та аналіз роботи електричних кранів, типи кранових механізмів та вимоги до електроприводу цих механізмів. Розглянуто системи керування крановою машиною та їх схеми. В результаті запропоновано технічні вимоги за якими в подальшому в роботі будуть проводитись дослідження.

2. Обґрунтовано застосування електропривода регульованого за частотою та наведено особливості частотно-регульованого привода механізму пересування. Для асинхронного електропривода запропоновано використання перетворювача серії G120 моделі PM240 (Siemens, Німеччина).

3. Здійснено вибір приводного двигуна для механізму пересування та визначено параметри схеми заміщення електродвигуна. Побудовано електромеханічні характеристики електродвигуна та здійснено вибір перетворювача частоти і розраховано його параметри. В результаті обрано несучу частоту інвертора, яка становить 4 кГц.

4. Доведено, що при керуванні асинхронними електроприводами, які працюють по законам регулювання класу U_1/f_1 максимальний момент двигуна при зменшенні швидкості суттєво зменшується, а здатність перевантаження знижується, що в свою чергу призводить до обмеження діапазону регулювання швидкості. Запропоновано усунути цей недолік шляхом виконання корекції напруги на частотах, що менше 20 Гц, що дозволить зберегти перевантажувальну здатність та діапазон регулювання, а також оптимальну роботу перетворювача.

5. Дослідження показали, що за умови одночасного керування за каналами напруги та частоти, контур обмеження струму слід налагоджувати таким чином, щоб відбувалось регулювання напругою. Налаштування контуру струму близьке до типового налагодження. Головним режимом роботи контуру обмеження струму є реакція на впливи збурюючих діянь, в результаті яких

струм двигуна може досягати значень перевищення заданого допустимого значення. Контур забезпечує нульову статичну помилку стабілізації струму в режимі стопоріння двигуна $I_{в.ст.}=0$. У перехідних режимах, коли швидкість обертання двигуна змінюється, з'являється динамічна помилка збурення, величина якої залежить від похідної швидкості.

6. В результаті аналізу результатів імітаційного моделювання роботи електроприводу можна зробити висновок, що асинхронний електропривод зі частотно-скалярним керуванням та компенсацією вольт-частотної характеристики, а також з IR-компенсацією та компенсацією ковзання здатний забезпечувати необхідний діапазон регулювання швидкості механізму переміщення візка мостового крана. Перехідні процеси в електроприводі мають плавний характер, а коливання моменту відсутні. При цьому вузол, що обмежує струм, повинен забезпечувати властивість обмеження струму та моменту двигуна при перевантаженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. https://kzpto.com.ua/uk/mostovi-krani/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=S_KZPTO_Ukrain&utm_term=%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9%20%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%BD&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9IC6BhA3EiwAsbltOLxBEEUa9q4s-1l3jd7bOg6JB45y159kK3CdnUYEY4qTBoCeWPUNyxoCiKwQAvD_BwE
2. Overview of Electric Overhead Traveling (EOT) Cranes. *An Online Continuing Education Provider for Professional Engineers*. URL: [https://www.cedengineering.com/userfiles/D06-003%20-%20Overview%20of%20Electric%20Overhead%20Traveling%20\(EOT\)%20Cranes%20-%20US.pdf](https://www.cedengineering.com/userfiles/D06-003%20-%20Overview%20of%20Electric%20Overhead%20Traveling%20(EOT)%20Cranes%20-%20US.pdf).
3. Special electric overhead crane - VSI Engineering. *VSI Engineering*. URL: <https://intermash.ua/en/product/kran-mostovoj-s-povorotnoj-telezhkoj/> (date of access: 22.11.2024).
4. What is an Overhead Crane?: Types, Components, and Terminology | Blog. *American Equipment*. URL: <https://amquipinc.com/what-is-an-overhead-crane/#:~:text=Simply%20put,%20an%20overhead%20crane,to%20control%20the%20crane's%20motion.> (date of access: 22.11.2024).
5. Бондарєв В.С. Підйомно-транспортні машини / В.С. Бондарєв, О.І. Дубинець, М.П. Колісник, С.В. Бондарєв, Ю.П. Горбатенко, В.Я. Баранов. – К. : Вища школа, 2009. – 734 с.
6. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
7. Григоров О.В. Вантажопідйомні машини / О.В. Григоров, Н.О. Петренко. –Харків: НТУ «ХП», 2006. – 300 с.
8. Динаміка та оптимальне керування рухом мостових кранів : монографія. Київ: ЦП „КОМПРІНТ”, 2019. 460с. URL:

https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/monografiya_loveykin_romasevich_goldun_krushelnickiy.pdf.

9. Електричні мостові крани: економічно вигідно та безпечно. *Dafang Crane*. URL: <https://www.hndfcrane.com/uk/posts/electric-overhead-cranes-cost-effective-and-safe/> (дата звернення: 21.11.2024).

10. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика) / За редакцією М.Г.Поповича, В.В.Кострицького: навчальний посібник. – К.:КНУТД, 2008. – 408 с.

11. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посіб. для студентів вищ. техн. навч. закл., які навчаються за напрямом "Е. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

12. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці: підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів: УАД, 2006. 336 с.

13. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів: Афіша, 2000. 352 с.

14. Закладний О. О., Прокопенко В. В. Узагальнений показник енергетичної ефективності електропривода. *Power Engineering: economics, technique, ecology*. 2017. № 4. С. 95–101. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.127552> (дата звернення: 21.11.2024).

15. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 13.11.2024).

16. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 16.11.2024).

17. Конституція України: від 28.06.1996 № 254к/96-ВР: станом на 1 січ. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text> (дата звернення: 20.11.2024).

18. Кран-балка опорна - OZPTU. UZPTU. URL: https://www.ozptu.com/ua/tovary/kran-balka-oporna/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA9IC6BhA3EiwAsbItOKEfMy18HMT

Qf4Xoyn0hcRTIG5zgrAVL2qP3VM7v8YQj2ZCzc9cwdhoCuWAQAvD_BwE

(дата звернення: 22.11.2024).

19. Ловейкін В.С. Теоретичні основи розрахунку віброгасителів коливань механізмів підйому вантажу промисловими роботами-маніпуляторами та вантажопідйомними (мостовими) кранами / В.С. Ловейкін, Ю.В. Човнюк, М.Г. Діктерук // – Дніпропетровськ: Підйомно-транспортна техніка, 2003. – № 3. – С. 5–19.

20. Міненерговугілля України. Правила Улаштування Електроустановок. *Ок.Закон.*

URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.

21. Модульний багатофункціональний перетворювач частоти. *Siemens*. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/tekhnohiiyi-pryvodiv/sinamics/peretvoryuvachi-nyzkoyi-napruhy-sinamics/standartni-peretvoryuvachi-chastoty-sinamics/sinamics-g120.html>.

22. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 18.11.2024).

23. Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів: ДНАОП 0.00–1.03–02. – Х. : Форт, 2002. – 416 с.

24. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Від 25.07.2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (дата звернення: 15.11.2024).

25. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 19.11.2024).

26. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 17.11.2024).

27. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 06.11.2024).

28. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 12.11.2024).
29. Розрахунки механізмів кранів мостового типу / С.В. Ракша, В.В. Мелашевич, М.П. Колесник – Днепропетровск: Пороги. 2006. – 147 с.
30. Слепужніков Є.Д. Визначення динамічних навантажень при пересуванні вантажного візка мостового крана / Є.Д. Слепужніков // Машинобудування :зб. наук. пр. – Х. : Укр. інж.-пед. акад., 2015. – Вип. 16. – С. 34–37.
31. Слепужніков Є., Фідровська Н., Варченко І. Механізми пересування мостових кранів : монографія. Харків : НУЦЗУ, 2019. 124 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8646/1/krane%20monogr%202019.pdf>.
32. Смирнітський Б.В. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів/Б.В. Смирнітський. - Харків, ХДПУ, 1998. - 380 с.
33. Теорія електропривода / За ред. М.Г. Поповича. -К.: Вища школа, 1993. 494 с.
34. Теорія електроприводу : навч. посіб. Нац. гірн. ун-т, 2011. 540 с. URL: <https://elprivod.nmu.org.ua/ua/student/disciplines/tep/Колб%20ТЕП%202011.pdf>.

ДОДАТКИ