

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, -
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ”

_____ 2021 р

**Кваліфікаційна робота
бакалавра**

на тему Розробка електромеханічної системи мостового крана з
перетворювачем частоти

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕЛКЗп-18
(шифр групи)

напряму підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

та електромеханіка»

_____ Міленко Віталій Володимирович

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник асистент кафедри Кардаш Д. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент канд. техн. наук, доц., доц. каф.

 АТ Поцєпаєв В. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ Любименко О. М.

(підпис)

_____ 02.06.2021

(дата)

Засвідчую, що у цій випускній
кваліфікаційній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент

_____ (підпис)

_____ 02.06.2021

(дата)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Міленку Віталію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: _____
«Розробка електромеханічної системи мостового крана з
перетворювачем частоти»

керівник роботи _____
асистент кафедри Кардаш Д. О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 2 червня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

Вантажопідйомність крану _____

Тип приводного двигуна: асинхронний із короткозамкненим ротором

Режим роботи: повторно-короткочасний

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

1. Загальні відомості про мостові крани

2. Розрахунок електроприводу мостового крану

3. Моделювання електроприводу мостового крана

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Кардаш Д. О.		
Охорона праці	Біла Н. С.		
Нормоконтроль	Любименко О. М.		

7. Дата видачі завдання 05 травня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	03.05.21 – 12.05.21	
2.	Розділ 2	13.05.21 – 23.05.21	
3.	Розділ 3	24.05.21 – 27.05.21	
4.	Охорона праці	28.05.21 – 31.05.21	
5.			
6.			

Студент _____ Міленко В. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Кардаш Д. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Міленко Віталій Володимирович. Розробка електромеханічної системи мостового крана з перетворювачем частоти / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає три розділи, висновків, переліку джерел посилання та додатку.

У першому розділі розглядалися основні поняття про мостові крани, електричне обладнання кранів, технічні вимоги до електрообладнання, кранові електричні двигуни.

У другому розділі представлений розрахунок параметрів заміщення асинхронного двигуна, розраховані природні механічні та електромеханічні характеристики двигуна, синтезована система керування, налаштовані контури регулювання струму, потокозчеплення та швидкості.

У третьому розділі проведені дослідження імітаційної моделі кранового асинхронного електроприводу із частотним керуванням, отримані графіки відпрацювання впливів.

Ключові слова: система керування, мостовий кран, асинхронний двигун, електропривод, схема заміщення, математична модель, регулятор, напруга.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОСТОВІ КРАНИ	7
1.1 Основні поняття про мостові крани	7
1.2 Електричне обладнання кранів	9
1.3 Технічні вимоги до електрообладнання.....	10
1.4 Кранові електричні двигуни	11
2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНУ	15
2.1 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна.....	15
2.2 Розрахунок природних характеристик.....	20
2.3 Статичні характеристики двигуна.....	23
2.4 Перевірка коректності вибору двигуна	25
2.5 Синтез системи керування	27
2.5.1 Параметри ланок структурної схеми двигуна.....	27
2.5.2 Параметри перетворювача	28
2.5.3 Налаштування контуру струму	29
2.5.4 Оптимізація контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором	33
2.5.5 Оптимізація контуру швидкості з ПІ-регулятором	36
3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНА	41
3.1 Пуск на холостому ході.....	44
3.2 Пуск та збільшення навантаження	45
ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55
ДОДАТОК А ОХОРОНА ПРАЦІ.....	56

ВСТУП

На багатьох промислових підприємствах, які використовують електричні вантажопідйомні крани, виникають проблеми з невідповідністю підйомного обладнання сучасним технічним вимогам. У кранових механізмів, що виготовляються серійно та знаходяться в експлуатації, привод головного підйому заснований на двигунах постійного струму з системою керування від напівпровідникових перетворювачів або ж асинхронними двигунами з фазним ротором з регулюванням за рахунок зміни опору резисторів, що під'єднуються до контактних кілець фазного ротора. Використовуване для керування швидкістю реостатне регулювання має вкрай низьку енергетичну ефективність. Деякі розрахунки показують, що в електроприводах механізмів підйому до 70% електроенергії спожитої системою може йти на теплові втрати, причому як в режимі спуску, так і при підйомі вантажу.

Відчутна більшість вантажопідіймальних кранів обладнана недорогими і звичними для обслуговування системами керування електроприводом на базі релейно-контакторних схем, які далекі від досконалості, для них характерна залежність швидкості опускання вантажу від його маси, що має негативний вплив на строк роботи механічної частини крана та потребує значних витрат з підтримки працездатності.

Метою роботи є розробка та моделювання електромеханічної системи мостового крана з перетворювачем частоти.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОСТОВІ КРАНИ

1.1 Основні поняття про мостові крани

Мостовий кран –це вантажопідйомна машина, яка переміщується по рейках на деякій відстані від основи та забезпечує переміщення вантажу в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 1). Мостові крани є серед одних з найбільш розповсюджених засобів механізації виробництв, вантажно-розвантажувальних і складських робіт. Пересуваючись по шляхах, що розташовані над землею, мостові крани не займають корисну площу цеху або складу, в той же час забезпечуючи обслуговування практично будь-якої їх точки.

До мостових кранів загального призначення відносять крани, призначені для роботи з різноманітними вантажами і мають вантажні гаки в якості вантажозахватних органів. Іноді такі крани, на відміну від кранів, зі спеціальними вантажозахоплювальними пристроями (магнітами, грейферами і т.д.), називають крюковими, які відповідно до статистичних досліджень складають близько 2/3 усіх експлуатованих мостових кранів. Штучні вантажі, що призначаються для підймання та переміщення таким краном, навішують на гак за допомогою канатні або ланцюгові стропи або різних спеціальних захоплень.

Спостереження за роботою кранів показує, що за останній час інтенсивність використання кранів не зменшується. До речі, час роботи механізмів без вантажу дорівнює часу роботи їх з вантажами, а час підвішування вантажу та звільнення гака, складає при строповці вручну від 30 до 50% часу повного циклу. У зв'язку з чим число циклів роботи цих кранів в межах до 15-20 на годину. Оскільки крани загального призначення знайшли застосування на виробництвах і складах з вантажами різних видів, їх продуктивність в такому випадку значно зростає, в разі обладнання автоматичними вантажозахватними пристроями. За необхідності переміщення сипучих матеріалів, дрібних штучних вантажів або рідин на гак вішають контейнери, ящики, ковші і т. п.[1]

Мостові крани за типами мостів діляться на двобалкові і однобалкові.

Мостові крани загального призначення використовують також в складальних цехах (в якості монтажних), в машинних залах, в котельних і димососним відділеннях електростанцій.

Основними параметрами крана є його вантажопідйомність, проліт, база, гранична висота підйому гака, швидкість підймання вантажу, швидкість переміщення крана та візка, колія та база візка, режим роботи, маса крана та візка.

Вантажопідйомність – гранично допустима маса вантажу, що піднімається краном. У неї входить також маса вантажозахоплювального пристрою, що чіпляється на гак або тари. Вантажопідйомність як параметр грає визначальну роль для монтажних кранів і кранів, які застосовуються в ремонтних і складальних цехах. Для кранів, що призначені для вантажно-розвантажувальних робіт або для обслуговування технологічних процесів, визначальний параметр, крім того, також продуктивність. Вантажопідйомність крана розраховується відповідно до ГОСТ 1575-75.

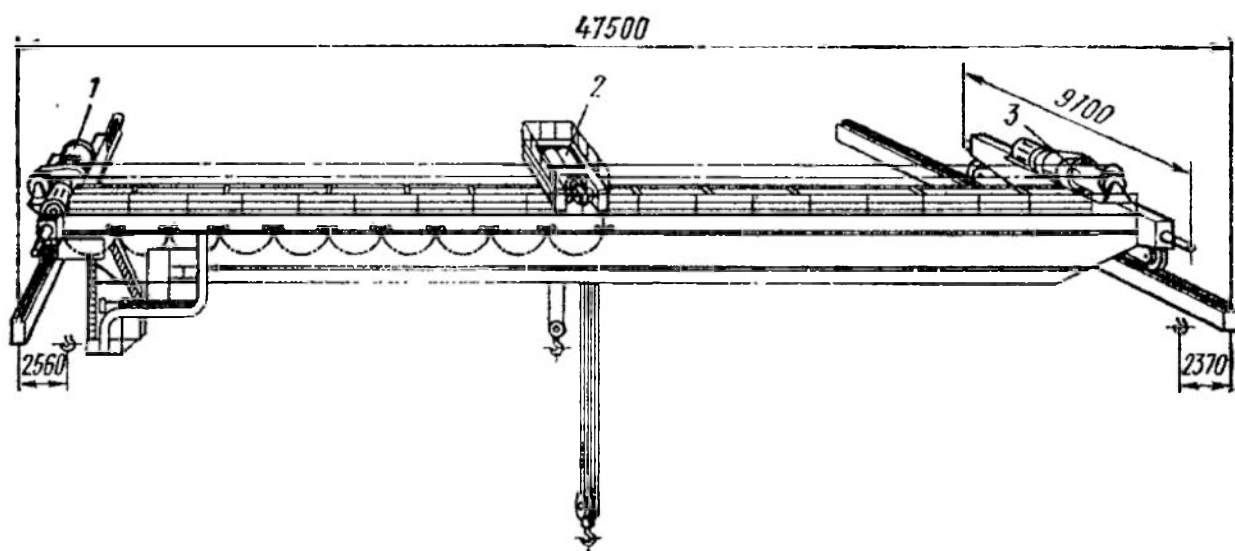


Рисунок 1 – Загальний вигляд однобалкового крану зі стаціонарними механізмами підйому

Проліт крана – це відстань між діаметральними площинами, що проходять через середини його коліс (або між осями рейок). Розміри прольотів визначені ГОСТ 534-69 «Крани мостові. Прольоти ». У візків ця ж відстань має назву «колія».

База крана або візка – відстань між осями коліс з одного боку моста (або візка).

Висота підйому – це відстань між нижнім і верхнім положенням гака.

Основні розміри і параметри кранів визначені ГОСТ 6711-70 «Крани мостові електричні загального призначення із вантажопідйомністю від 80 до 320 т». Окрім цього, крани мають задовольняти вимогам Правил будови і безпечної експлуатації вантажопідіймальних кранів.

1.2 Електричне обладнання кранів

Надійне та безаварійне функціонування кранів у значній мірі залежить від надійності роботи електроприводу. Саме тому кожен хто безпосередньо стикається з кранами повинен добре володіти основами електротехніки, мати чітке уявлення про процеси, які протікають в електричних машинах і апаратах.

Останні призначені для вмикання (вимикання), реверсування, регулювання швидкості електричних двигунів, обмеження робочих рухів механізмів крана у визначених межах, захисту персоналу від уражень електричним струмом, забезпечення умов зручного керування, обслуговування. Кожний апарат має маркування: літерне позначення вказує назву, а цифри після неї – основну технічну характеристику та модифікацію.

Електротехнічна промисловість випускає спеціальні серії устаткування для кранів, куди входять кранові електродвигуни змінного та постійного струму, силові магнітні контролери, кінцеві вимикачі, командоапарати, кнопкові пости (станції), пускорегулюючі резистори (опори), гальмові електромагніти і

електрогідравлічні штовхачі та інші апарати, комплектуючі різні кранові електроприводи.

Кранове електричне обладнання в залежності від призначення ділять на основне – сам електропривод і допоміжне - звукова сигналізація, обладнання робочого та ремонтного освітлення, опалення (кондиціонери) і ін.

В сучасних кранових електроприводах знайшли застосування електродвигуни змінного (більше 90%) і постійного струму. Двигуни постійного струму серії Д з послідовним або незалежним збудженням розраховані на велику кількість включень приводу на годину з можливістю плавного та широкого діапазону регулювання частоти обертання ротора. Живлення таких двигунів передбачає необхідність мережі постійного струму (підстанції) або використання спеціальних перетворювачів. Також їм потрібно висококваліфіковане обслуговування і ремонт.

Крім того, маса двигуна постійного струму в 2,2-3 рази більша за масу асинхронного двигуна змінного струму тієї ж потужності. Двигуни постійного струму коштовні у виготовленні та експлуатації, через це вони застосовуються тільки в приводах спеціальних кранів, як то металургійні крани.

За рядом економічних чинників застосування двигунів змінного струму в якості приводних для механізмів кранів загального призначення є більш економічним.

1.3 Технічні вимоги до електрообладнання

Для електроприводів кранових механізмів характерним є повторно-короткочасний режим роботи при високій частоті включень, великий діапазон регулювання швидкостей, змінювані за величиною та напрямком робочі навантаження, істотні, перевантаження при розгоні (гальмуванні) механізмів та часті реверси.

Вантажопідйомні крани розміщують не тільки у виробничих приміщеннях, а також і на відкритих майданчиках, де кранове електрообладнання піддається впливу вологи, пилу і перепадам температури, що руйнівним чином впливає на електроізоляцію і знижує її діелектричні властивості. Крани, які працюють в приміщеннях, часто піддаються впливу підвищених температур, високої концентрації промислового пилу, парів кислот і лугів, що негативно впливають на електрообладнання. Кранове електрообладнання загального призначення виробляють в кліматичному виконанні категорій У1 і У2.

Враховуючи специфічні умови експлуатації, кранове електрообладнання розраховане на підвищену механічну міцність, стійке до різних навантажень і забезпечує зручність та легкість обслуговування та ремонту в складних умовах експлуатації кранових механізмів.[2]

Кранові електроприводи найчастіше розраховані на живлення від трифазних мереж змінного струму з частотою 50 Гц і напругою 380 В або від мереж постійного струму напругою 220 В.

1.4 Кранові електричні двигуни

Електричний двигун – це електрична машина, яка перетворює електричну енергію мережі в механічну енергію обертання ротора.

Принцип дії електродвигуна. Електродвигун складається з чотирьох складальних одиниць: нерухомою - статора, рухомий - ротора і двох підшипникових щитів, на підшипники яких спираються кінці вала ротора. Підшипникові щити болтами кріплять до торців статора.

У найпростішому випадку обмотка статора являє собою три котушки, зміщені по колу на кути 120 градусів і під'єднується до мережі змінного трифазного струму, що наводить в обмотці статора обертове магнітне поле.

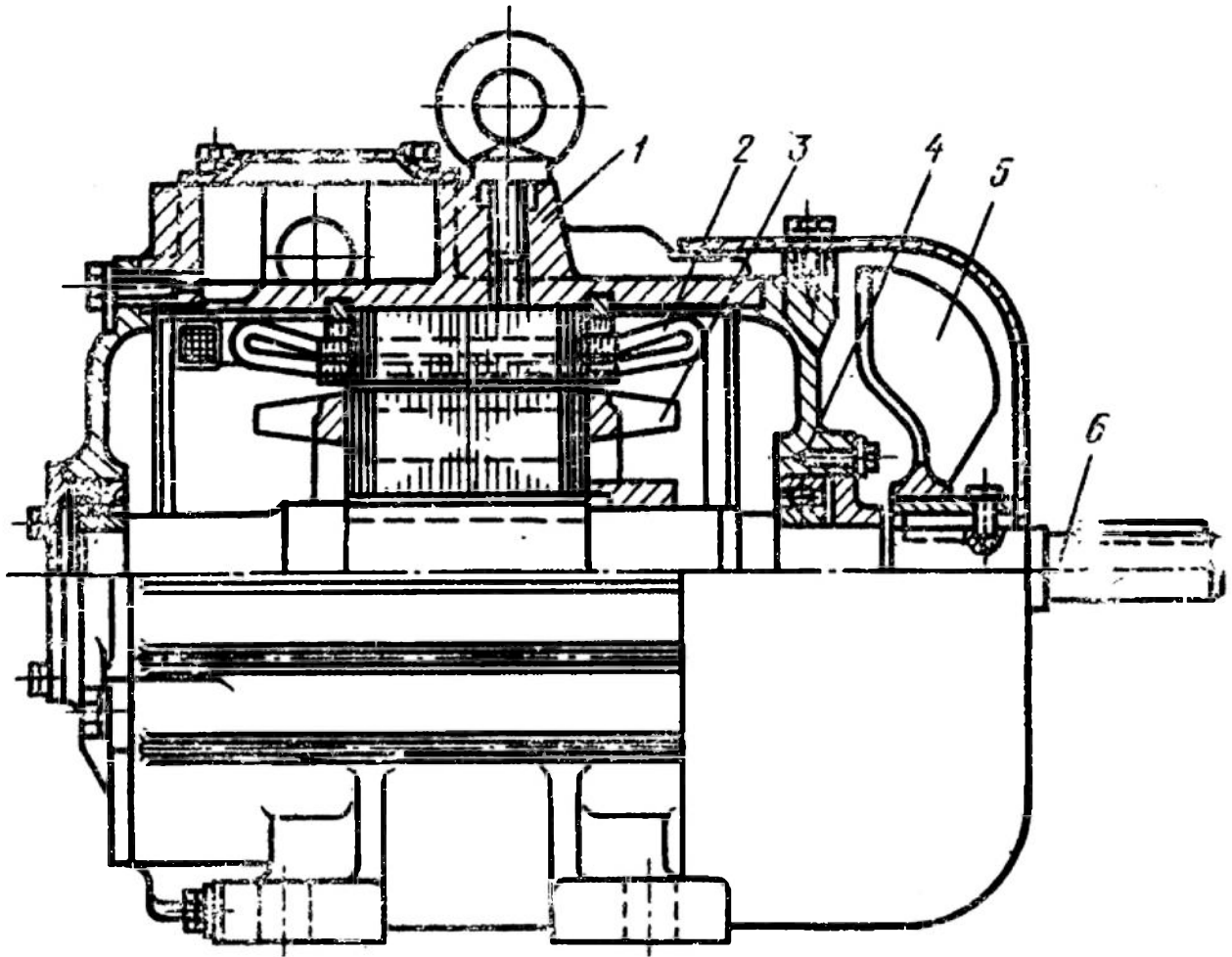


Рисунок 2 – Асинхронний крановий двигун з короткозамкненою обмоткою ротора

Кутова частота обертання магнітного поля статора є в прямій залежності від частоти коливань змінного струму і числа пар полюсів.

Кранові електродвигуни вітчизняних виробництв мають 3,4 і 5 пар полюсів, що, відповідно, забезпечує частоту обертання магнітного поля 16.6, 12.5 та 10 рад/с. Така частота обертання магнітного поля статора називається синхронною. Обертове магнітне поле статора перетинає обмотку нерухомого ротора з максимальною швидкістю і наводить електрорушійну силу, величина якої пропорційна кількості провідників в обмотці, з'єднаних послідовно, і частоті обертання магнітного поля відносно провідників. Очевидно те, що при нерухомому роторі величина ЕРС є максимальною. При замиканні обмотки

ротора через опір або накоротко по ній протікає струм, прямо пропорційний величині індукованої ЕРС і обернено пропорційний опору кола.

Струм в роторній обмотці створює власне магнітне поле ротора, яке вступає у взаємодію із обертовим магнітним полем статора, в результаті чого ротор починає обертатися у сторону обертання магнітного поля статора, долаючи прикладений до валу ротора момент опору навантаження.

У міру збільшення частоти обертання ротора, який «наздоганяє» магнітне поле статора, швидкість перетину провідників ротора обертовим магнітним полем зменшується і відповідно знижується наведена в обмотці ротора ЕРС, струм в колі.

Струм в обмотці ротора створює власне магнітне поле ротора, яке взаємодіє з обертовим магнітним полем статора, в результаті чого ротор починає обертатися в сторону обертання магнітного поля статора, долаючи прикладений до валу ротора момент опору навантаження.

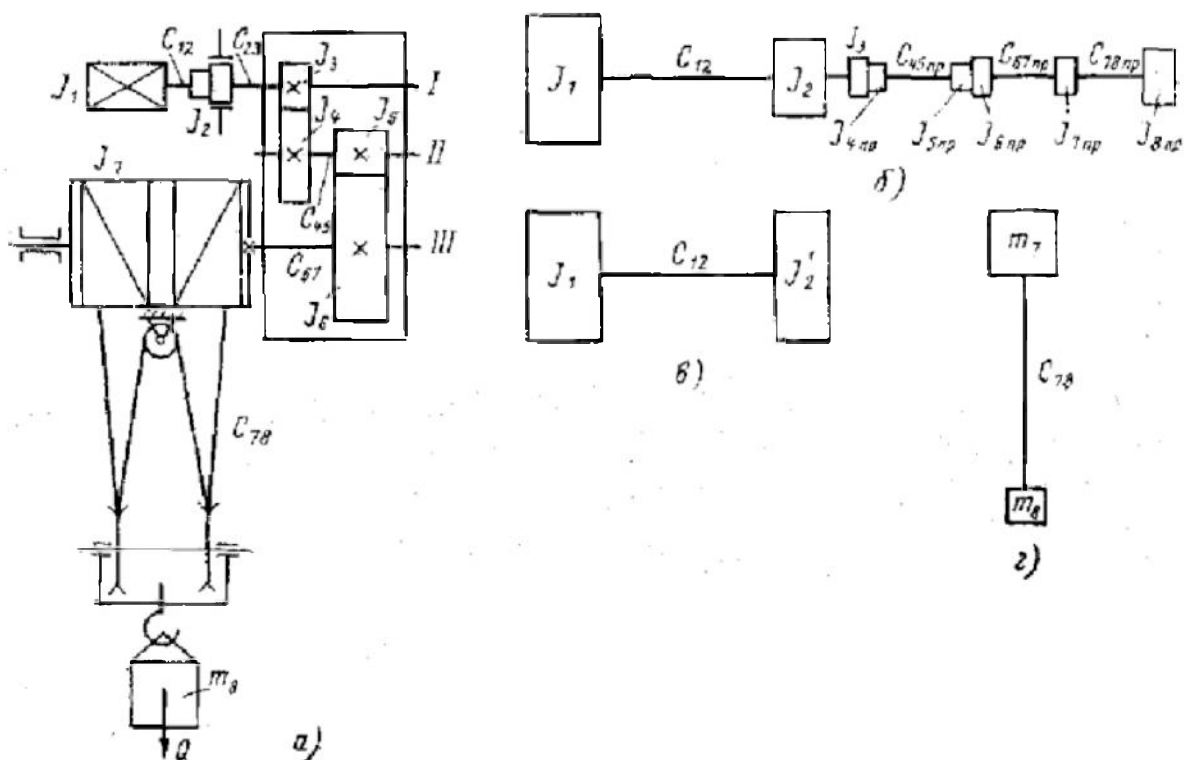


Рисунок 3 – Розрахункові схеми кранового механізму підйому

У міру збільшення частоти обертання ротора, який «доганяє» магнітне поле статора, зменшується швидкість перетину провідників ротора обертовим магнітним полем і відповідно зменшуються індукована в роторі ЕРС, струм в ланцюзі. Струм в обмотці ротора створює власне магнітне поле ротора, яке взаємодіє з обертовим магнітним полем статора, в результаті чого ротор починає обертатися в сторону обертання магнітного поля статора, долаючи прикладений до валу ротора момент опору навантаження.

При холостому (без прикладення навантаження) обертанні ротора частина роботи витрачається на подолання опору сил тертя в підшипниках і ротора об повітря, через це ротор не досягає частоти обертання магнітного поля статора. Відставання частоти обертання ротора від обертового поля статора називається ковзанням. Через це електродвигуни такої конструкції називаються асинхронними. У кранових електродвигунів величина ковзання, зазвичай, дорівнює 3-12%, примітним є те, що двигунам більшої потужності відповідають менші значення.

2 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНУ

2.1 Визначення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Довідкові джерела не містять жодних параметрів програми заміни двигуна.[3] Для того, щоб визначити параметри, ми використовуємо найпростіший та найзручніший інженерний розрахунок Т-образного варіанту асинхронного двигуна, як показано на рисунку 2.

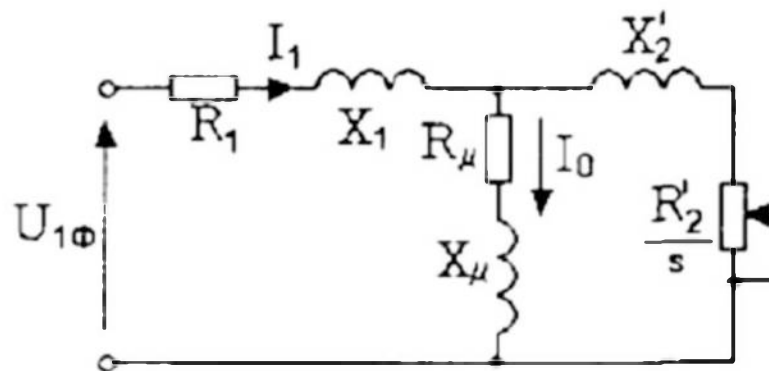


Рисунок 4 – Схема заміщення фази асинхронного двигуна

Рівняння асинхронного двигуна, відповідні схемі заміщення:

$$\overline{U}_{1\phi} - \overline{E}_1 - j \cdot x_{1\sigma} \cdot \overline{I}_1 - \overline{R}_1 \cdot \overline{I}_1 = 0;$$

$$\overline{E}_1 - j \cdot x'_{2\sigma} \cdot \overline{I}_2' + \frac{\overline{R}_2'}{s} \cdot \overline{I}_2' = 0;$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2' + \overline{I}_0 = 0$$

де $U_{1\phi}$ – напруга обмотки фази статора двигуна;

E_1 – електрорушійна сила обмотки статора;

$x_{1\sigma}$ – індуктивний опір розсіяння статорної обмотки;

R_1 – активний опір обмотки статора;

$x_{2\sigma}$ – індуктивний опір розсіяння обмотки статора;

R'_2 – активний опір обмотки ротора;

I_1 – струм обмотки статора;

I_2 – струм обмотки ротора;

I_0 – струм холостого ходу обмотки статора.

Треба зауважити, що всі параметри роторної обмотки приведені до параметрів обмотки статора.

Знайдемо кутову синхронну швидкість:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\max}}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1000}{60} = 104.72, \text{ рад / с}$$

Знайдемо номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = \frac{104,72 - 94,248}{104,72} = 0,1$$

Струм, що протікає в статорі двигуна при холостому ході:

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

де I_{11} – струм у статорі при частковому завантаженні;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0.75 \cdot 7500}{3 \cdot 220 \cdot 0.84 \cdot 0.87} = 11.007 \text{ A}$$

p_* – коефіцієнт завантаження

$$p_* = \frac{P}{P_n} = 0.75$$

З формули Клосса отримаємо, яке необхідно для обчислення критичного ковзання:

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = 0.542$$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1n}} = 1 + \frac{1.552}{2 \cdot 4.2 \cdot 15.013} = 1.012$$

Приведений до обмотки статора активний опір ротора:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_n^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot C_1^2 \cdot m_k \cdot P_n \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0.1)}{2 \cdot 1.012^2 \cdot 2.2 \cdot 7500 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.542} \right)} = 1.358 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора в такому випадку:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1.012 \cdot 1.358 \cdot 2 = 1.375 \text{ Ом}$$

Для того, щоб відокремити від індукційного опору фаз статора та ротора, слід використовувати коефіцієнт, придатний для серійного асинхронного двигуна.

Приведений індуктивний опір обмотки ротора:

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{\kappa\mu}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 2,132}{1,012} = 1,222 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір статорної обмотки визначається за виразом:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\kappa\mu} = 0,42 \cdot 1,222 = 0,896 \text{ Ом}$$

ЕРС вітки намагнічування E_1 , яка наводиться потоком повітряного зазору в статорній обмотці в номінальному режимі:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_n \cdot \cos \varphi_n - R_1 I_n)^2 + (U_{1n} \cdot \sin \varphi_n + X_{1n} I_{1n})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,87 - 1,375 \cdot 15,013)^2 + (220 \cdot 0,493 - 0,896 \cdot 15,013)^2} = 195,42 \text{ В} \end{aligned}$$

В такому випадку намагнічувальний індуктивний опір:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{195,42}{1,552} = 125,891 \text{ Ом}$$

Знаючи індуктивні опору розрахуємо індуктивності обмоток статора, ротора та вітки намагнічування:

$$L_1 = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{0,896}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,851 \text{ мГн}$$

$$L_2 = \frac{X_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1,222}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,889 \text{ мГн}$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{125,891}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,4 \text{ мГн}$$

Номінальне потозчеплення:

$$\Psi_{2n} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 1,552 \cdot 0,4 = 0,88 \text{ Вб}$$

За визначеними параметрами обчислимо величину номінального електромагнітного моменту:

$$\begin{aligned} M_{\text{ем.н}}^* &= \frac{3 \cdot U_{1\phi\text{н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 1,358}{104,72 \cdot 0,1 \cdot \left[2,132^2 + \left(1,375 + \frac{1,358}{0,1} \right)^2 + \left(\frac{1,375 \cdot 1,358}{0,1 \cdot 125,891} \right)^2 \right]} = 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{ем.н}}^{**} &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma}') } \cdot \Psi_{2n} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1n}^2 - I_0^2} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,4}{(0,4 + 3,889 \cdot 10^{-3})} \cdot 0,88 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{15,013^2 - 1,552^2} = 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Перевіримо чи виконуються умови:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{дв.н}} &< M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}}; \\
 M_{\text{ем.н}}^{**} &\cong M_{\text{ем.н}}^* \\
 79,577 \text{ Н} \cdot \text{м} &< 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} \leq 87,535 \text{ Н} \cdot \text{м} \\
 82,509 \text{ Н} \cdot \text{м} &\cong 82,797 \text{ Н} \cdot \text{м}
 \end{aligned}$$

Таким чином визначимо величину моменту сил тертя двигуна:

$$\Delta M_{\text{с.дв}} = M_{\text{ем.н}} - M_{\text{дв.н}} = 82,509 - 79,577 = 2,932 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Дуже важливо правильно вибрати інвертор. З цього залежить ефективність та термін служби інвертора та приводу в цілому. Якщо потужність інвертора занадто висока, він не зможе нормально захистити двигун. З іншого боку, якщо потужність перетворювача занадто мала, він не зможе забезпечити надзвичайно динамічний режим роботи та може вийти з ладу через перевантаження.[4]

Правильна робота також має великий вплив на термін служби інвертора. При виборі перетворювача частоти як орієнтир слід використовувати не тільки потужність підключеного двигуна, а й діапазон робочих швидкостей двигуна, діапазон робочого моменту, характер навантаження та робочий цикл.

2.2 Розрахунок природних характеристик

Розрахунок природних характеристик полягає в оцінці ступеня узгодження основних характеристичних точкових параметрів розрахованих природних характеристик двигуна та параметрів двигуна, визначених вибраним двигуном з посиланням на технічні дані.

При векторному керуванні обчислюються та будуються лише природні механічні та електромеханічні характеристики двигуна при номінальному тиску та частоті.

Природна механічна характеристика електродвигуна для номінальній частоти живлення визначається:

$$M_{em}(s) = \frac{3 \cdot U_{1n}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\kappa n}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}$$

За обчисленими результатами будується механічна характеристика, де кутова швидкість визначається через ковзання.

Природну механічну характеристику приведено на рисунку 3.

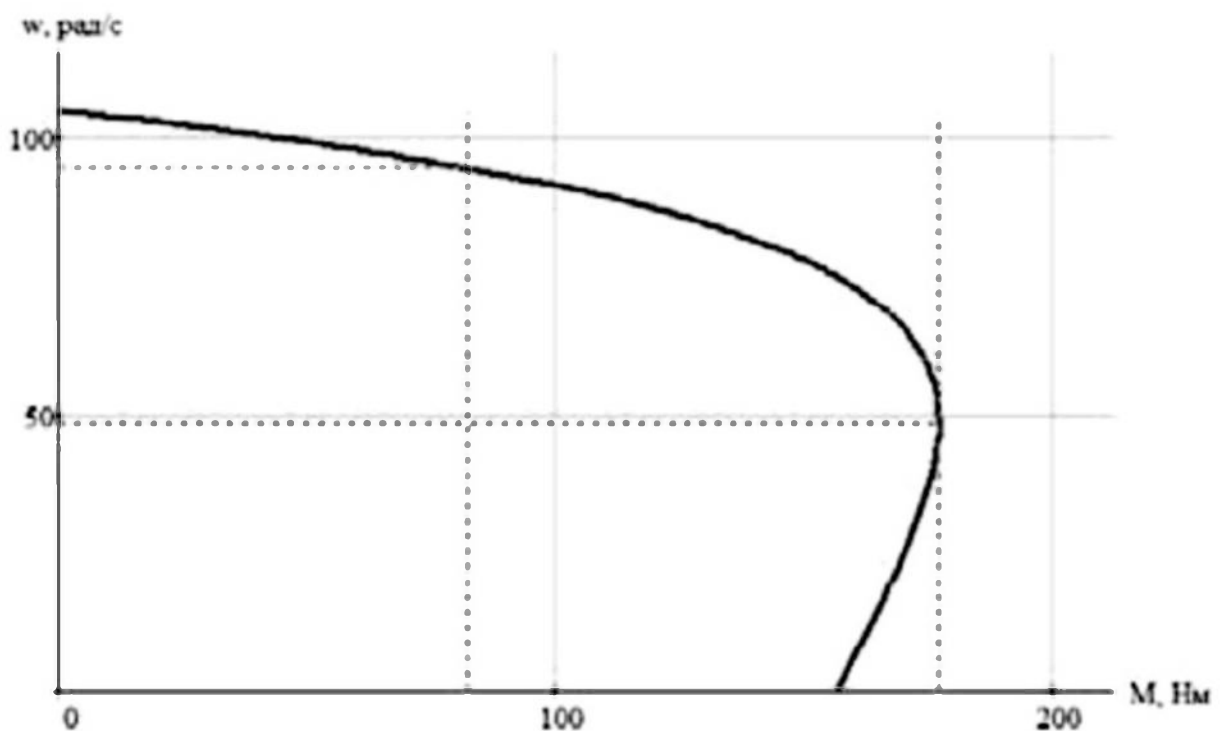


Рисунок 5 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Природна електромеханічна характеристика електродвигуна обчислюється для номінальної частоти живлення 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 $I_1 = I_{1н}$ – фазний струм двигуна;

I_2' – приведений до статорної обмотки струм ротора;

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

I_0 – струм холостого ходу;

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

В результаті можемо побудувати електромеханічні характеристики:

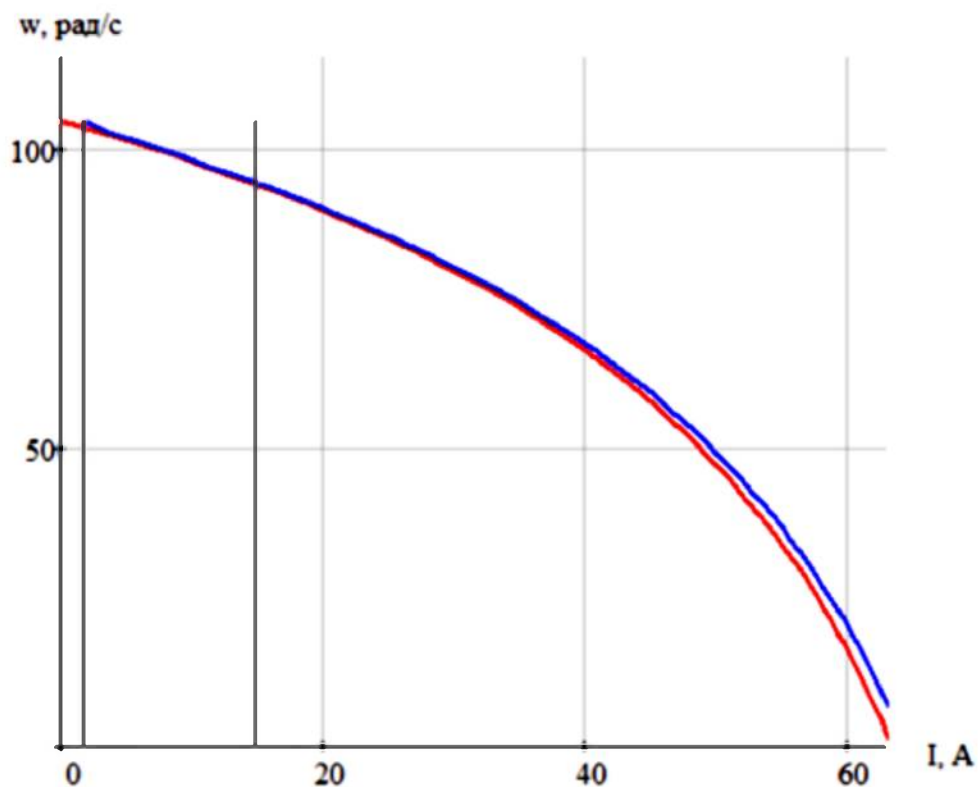


Рисунок 6 – Природні електромеханічні характеристики асинхронного двигуна МТКФ 211 В6

2.3 Статичні характеристики двигуна

При векторному керуванні потрібно розрахувати і побудувати тільки природні механічну і електромеханічну характеристики електродвигуна при номінальному значенні напруги і частоти за наведеними вище виразами.

На отриману механічну характеристику рисунку 6 наносяться граничні характеристики для тривалого і короткочасного режимів роботи:

$$M_{\text{ем. макс}} = 130,4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с.прив. мин}} = 10,9 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{с.прив. макс}} = 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{ем. н}} = 82,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{к}} = 177,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{трив. доп}} = 74,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

На рисунку 7 в площині механічних характеристик побудовані характеристики АД та характеристики навантаження.

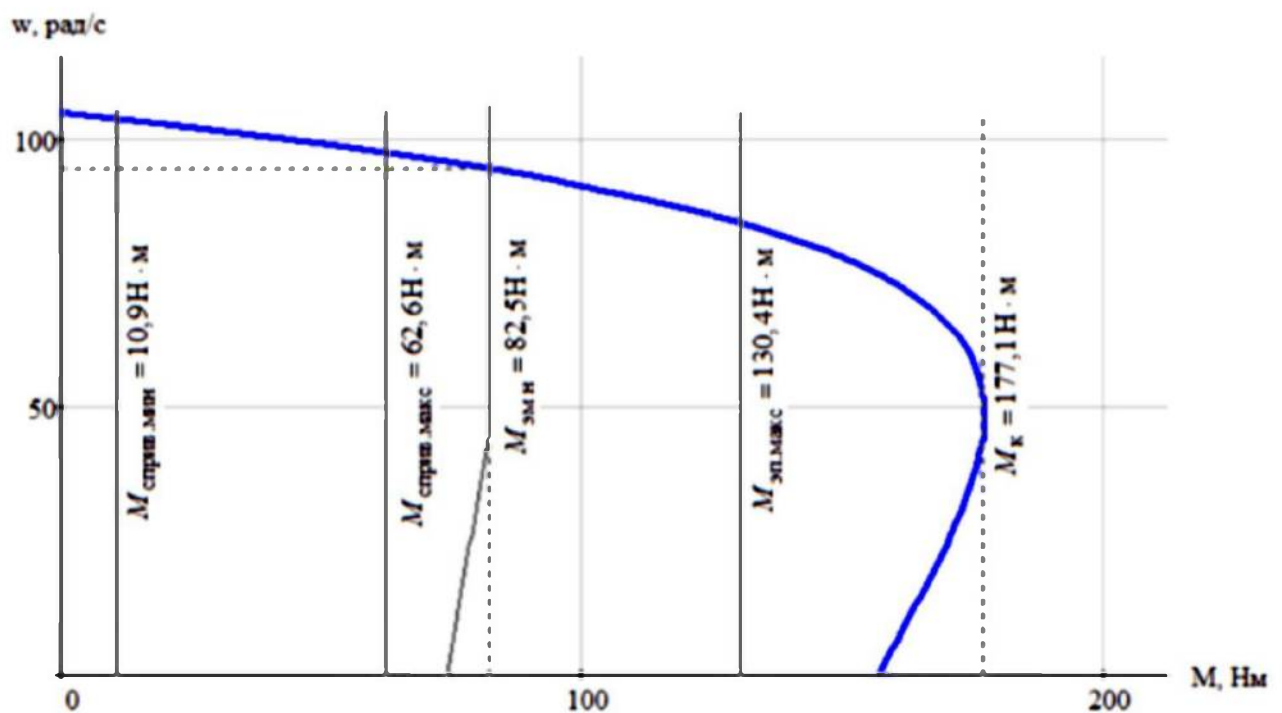


Рисунок 7 – Механічні характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження

На рисунку 8 в площині електромеханічних характеристик побудовані характеристики АД і характеристики навантаження.

$$I_0 = 1,552 \text{ A};$$

$$I_{с.мін} = 2,469 \text{ A};$$

$$I_{с.макс} = 10,251 \text{ A};$$

$$I_{еп.макс} = 21,12 \text{ A};$$

$$I_{1н} = 15,013 \text{ A};$$

$$I_{трив.доп} = 13,512 \text{ A};$$

$$I_{н.ном} = 17,6 \text{ A};$$

$$I_{н.макс} = 26,4 \text{ A}.$$

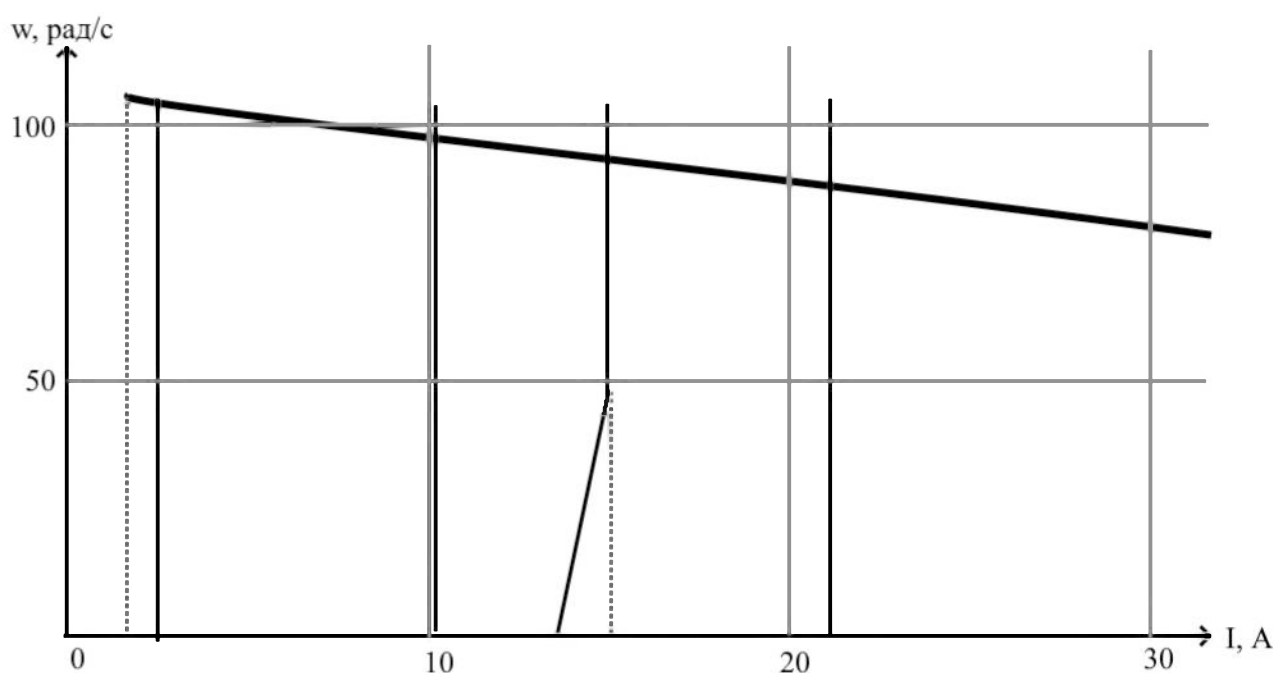


Рисунок 8 –Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна та характеристики навантаження

2.4 Перевірка коректності вибору двигуна

Після побудови механічних характеристик електроприводу і навантаження виконується перевірка правильності вибору двигуна за моментом. По всьому діапазоні мають виконуватися умови

$$M_{\text{ем.прив.дон}} \geq M_{\text{с.макс}};$$

$$77,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \geq 62,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Отже, двигун по моменту обраний правильно.

За результатами побудови електромеханічних характеристик електроприводу перевіряється правильність вибору

$$I_{\text{дв.прив.дон}} \geq I_{\text{с.макс}};$$

$$13,5 \text{ А} > 10,2 \text{ А}.$$

Таким чином, двигун за струмовим критерієм обраний правильно.

Перевірка правильності вибору перетворювача

Після побудови електромеханічних характеристик електроприводу проводиться перевірка на правильність вибору перетворювача по струму:

- 1 умова

$$I_{\text{с.макс}}(\omega) \leq 0,8 \cdot I_{\text{н}};$$

$$10,2 \text{ А} \leq 0,8 \cdot 17,6 = 14,8 \text{ А}.$$

- 2 умова

$$I_{\text{еп.макс}}(\omega) \leq I_{\text{н.макс}};$$

$$21,12 \text{ А} \leq 26,4 \text{ А}$$

Отже, перетворювач був обраний вірно.

2.5 Синтез системи керування

2.5.1 Параметри структурної схеми двигуна.

Еквівалентні індуктивності обмоток:

статора

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

ротора

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 3,889 \cdot 10^{-3} + 0,40072 = 0,40461 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіяння магнітного поля

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,40072^2}{0,40357 \cdot 0,40461} = 0,017$$

Еквівалентний активний опір кола статора (опір з'єднувальних проводів не враховано)

$$R_{1\text{екв}} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_1^2} = 1,375 + 1,358 \cdot \frac{0,40072^2}{0,40357^2} = 2,707 \text{ Ом.}$$

Електромагнітні сталі часу кола статора та ротора:

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

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,40461}{1,358} = 0,29794 \text{ с}$$

2.5.2 Параметри перетворювача

Для найпростішого випадку без урахування ШІМ інвертор виступає лінійним підсилювачем з чистим запізненням на величину одного періоду широтно-імпульсної модуляції

$$T_i = T_{\text{шім}} = \frac{1}{f_{\text{шім}}} = \frac{1}{10000} = 0,0001 \text{ с}$$

де $f_{\text{шім}}$ – частота модуляції інвертора.

Максимальні дійсне і амплітудне значення напруги на фазі двигуна приймаються, відповідно:

$$U_T = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi n} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В.}$$

Враховуючи ШІМ напруги інвертора і у випадку з'єднання обмоток статора двигуна в зірку параметри перетворювача підбираються відповідно до наведених тут виразів.

Напруга ланки постійного струму:

$$U_d \geq \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1n} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220 = 538,88 \text{ В}$$

Тоді лінійна напруга джерела живлення перетворювача

$$U_c = \frac{U_d}{1,35} = \frac{567,25}{1,35} = 420,185 \text{ В}$$

Коефіцієнт посилення інвертора:

$$k_i = \frac{U_d}{\sqrt{3}} = \frac{538,88}{\sqrt{3}} = 311,127.$$

Визначені параметри ПЧ, АД, а також механічні та електромеханічні характеристики є базою для подальшого вивчення електроприводу

2.5.3 Налаштування контуру струму

Типова структурна схема контуру струму приведена на рисунку 9. Контури струмів реалізовані за однаковим принципом та мають однакові параметри.

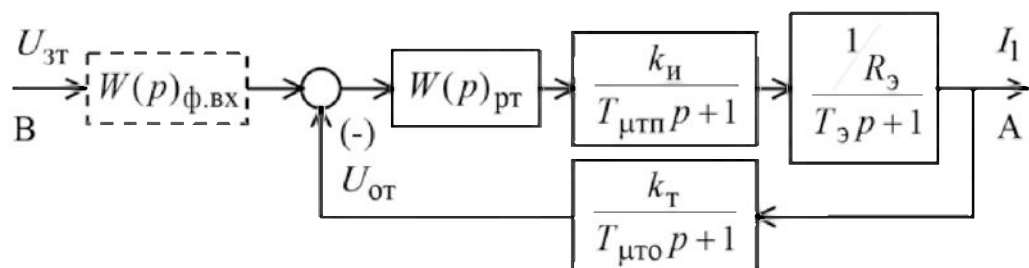


Рисунок 9 – Структурна схема контуру струму

Налаштуємо цей контур за модульним оптимумом:

$$W_{роз1} = W_{pc} \cdot \frac{k_{mn}}{T_{mn} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{1}{R_e}}{T_{1e} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{\partial c}}{T_{\partial c} \cdot p + 1}.$$

Сталі часу $T_{тп}$ і $T_{дс}$ як правило набагато менші, ніж T_e тому віднесемо їх до малих постійних часу, що не скомпенсується. Таким чином з'являється можливість знизити порядок системи:

$$W_{роз1} \approx W_{pc} \cdot \frac{k_{mn} \cdot k_{\partial c}}{T_{\mu 1} \cdot p + 1} \cdot \frac{\frac{1}{R_e}}{T_{1e} \cdot p + 1},$$

Для налаштування на оптимум за модулем необхідний ПІ-регулятор

$$W_{pc} = \frac{k_{pc} \cdot (T_{pc} \cdot p + 1)}{T_{pc} \cdot p},$$

де T_{pc} – стала часу регулятора струму;

k_{pc} – коефіцієнт регулятора струму, визначається за виразом:

$$k_{pc} = \frac{T_{1e} \cdot R_e}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot k_{mn} \cdot k_{\partial c}}.$$

У результаті передатна функція розімкненого контуру струму відповідає налаштуванню за модульним оптимумом:

$$W_{роз1} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1)}.$$

Передавальна функція замкнутого контуру струму

$$W_1 = \frac{W_{poz1}}{1 + W_{poz1}} \cdot \frac{T_{dc} \cdot p + 1}{k_{dc}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p \cdot (T_{\mu 1} \cdot p + 1) + 1} \cdot \frac{T_{dc} \cdot p + 1}{k_{dc}}.$$

Нехтуючи в знаменнику членом другого порядку малості, а в чисельнику сталою часу, передатна функція контуру регулювання струму

$$W_1 \approx \frac{\frac{1}{k_{dc}}}{2 \cdot T_{\mu 1} \cdot p + 1}.$$

Спираючись на рекомендації щодо вибору параметрів при налаштуванні контурів регулювання струму прийmemo наступні значення:

Коефіцієнт для врахування можливого перерегулювання струму

$$\sigma_c \geq 1,2.$$

Коефіцієнт давача струму

$$k_{dc} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{цип.дс}}}}{\sigma_c \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{ен.макс}}} = \frac{0,5 \cdot 2^{10}}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 21,12} = 14,285.$$

Значення максимального завдання на вході контуру струму

$$N_{\text{зс.макс}} = \frac{1}{\sigma_c} = \frac{1}{1,2} = 0,833.$$

тоді

$$k_c = \frac{1}{\sigma_c \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1u}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,013} = 0,039;$$

$$k_{33.c} = \frac{1}{k_c} = \frac{1}{0,039} = 0,07.$$

Інтервали модуляції сигналів у колі зворотного зв'язку контуру регулювання струму

$$T_{33.m} = T_{пк.m} = T_{зк.i} = T_{шім} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Постійна часу аналогового фільтра в колі вимірювання струму

$$T_{\phi.c} = 0$$

Апроксимаційний коефіцієнт ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою для ЕП загальнопромислового призначення

$$n_c = 3$$

Коефіцієнт типовий настройки контуру струму

$$\alpha_c = 2.$$

Еквівалентна мала стала часу оптимізованого контуру струму

$$T_{\mu 1} = \frac{T_{33.c}}{n_c} + T_{зк.i} + T_{\phi.c} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{3} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Еквівалентна стала часу замкнутого контуру струму

$$T_c = a_c \cdot T_{\mu 1} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму

$$k_{pc} = \frac{T_{le} \cdot R_{le}}{k_i \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{\mu 1}} = \frac{2,47601 \cdot 10^{-3} \cdot 2,707}{311,127 \cdot 0,039 \cdot 2 \cdot 1,333 \cdot 10^{-4}} = 2,058 \text{ в.о.}$$

2.5.4 Налаштування контуру потокозчеплення з ПІ-регулятором

Структурну схему контуру регулювання потозчеплення з ПІ-регулятором приведено на рисунку 10.

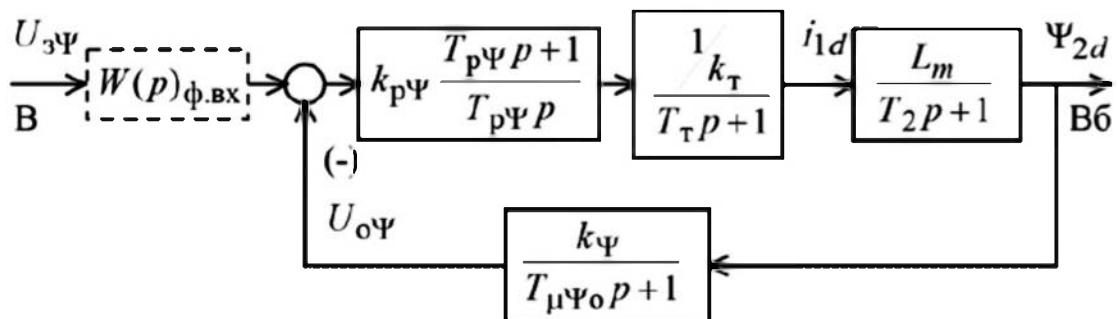


Рисунок 10 – Структурна схема контуру регулювання потокозчеплення з ПІ-регулятором

При налаштуванні контуру потокозчеплення внутрішній налаштований замкнений контур струму представляють усіченою передатною функцією 1-го порядку.

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру по потокозчеплення.

$$k_{\Psi} = \frac{U_{\Psi_{\text{макс}}}}{\Psi_{2i}}$$

Передавальна функція ПІ-регулятора потокозчеплення

$$W_{p\Psi} = k_{p\Psi} \cdot \frac{T_{p\Psi} \cdot p + 1}{T_{p\Psi} \cdot p}.$$

Коефіцієнт підсилення та стала часу регулятора потокозчеплення обчислюються за виразами

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_c}{L_m \cdot k_{\Psi}} \cdot \frac{1}{a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi e}}$$

$$T_{p\Psi} = T_2$$

Контур регулювання потокозчеплення з ПІ-регулятором, налаштований відповідним чином, має наступні передатні функції:

— розімкнутого контуру

$$W_{\Psi_{роз}} = \frac{1}{a_{\Psi} \cdot T_c \cdot T_{\mu\Psi_{зв}} \cdot T_{\mu\Psi e} \cdot p^3 + a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi e}^2 \cdot p^2 + a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi e} \cdot p}$$

– замкнутого контуру за керуванням

$$W_{\psi \text{ зам}} = \frac{\frac{1}{k_{\psi}}(T_{\mu\Psi_{36}}p + 1)}{a_{\psi}T_cT_{\mu\Psi_{36}}T_{\mu\Psi_e}p^3 + a_{\psi}T_{\mu\Psi_e}^2p^2 + a_{\psi}T_{\mu\Psi_e}p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_{\psi}} \cdot (T_{\mu\Psi_{36}}p + 1)}{a_{\psi}T_{\mu\Psi_e}^2p^2 + a_{\psi}T_{\mu\Psi_e}p + 1}.$$

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

Параметри налаштування контуру потокозчеплення з ПІ- регулятором[5]

Спираючись на рекомендації щодо вибору параметрів при налаштуванні контурів регулювання потокозчеплення приймаємо наступні значення:

$$\sigma_{\psi} \geq 1,2$$

Коефіцієнт, що враховує можливе перерегулювання струму

$$k_{\sigma\psi} = \frac{1}{\sigma_c \cdot \psi_{2n}} = \frac{1}{1,2 \cdot 0,88} = 0,947.$$

Значення максимального завдання на вході контуру потокозчеплення

$$N_{\psi, \text{ макс}} = \frac{1}{\sigma_{\psi}} = \frac{1}{1,2} = 0,833293$$

Апроксимаційний коефіцієнт ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою для ЕП загальнопромислового призначення[6]

$$n_{\Psi} = 2$$

Стала часу регулятора

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0,29794 \text{ с}$$

Еквівалентна мала постійна часу оптимізованого контура регулювання швидкості

$$T_{\mu\Psi} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Коефіцієнт типового налаштування контуру регулювання струму

$$a_{\Psi} = 2$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму

$$k_{pc} = \frac{T_2 \cdot k_c}{L_m \cdot k_{d\Psi}} \cdot \frac{1}{a_{\Psi} \cdot T_{\mu\Psi}} = \frac{0,09794 \cdot 0,039}{0,40072 \cdot 0,947} \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}} = 14,008 \text{ в.о.}$$

2.5.5 Налаштування контуру швидкості з ПІ-регулятором

Структурну схему контуру регулювання швидкості з ПІ-регулятором приведено на рисунку 11.

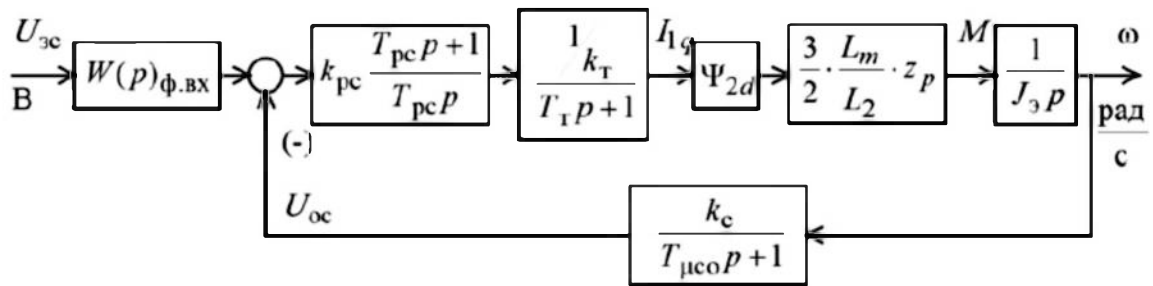


Рисунок 11 – Структурна схема контуру регулювання швидкості з ПІ-регулятором

При налаштуванні контуру швидкості внутрішній налаштований замкнений контур струму представлений усіченою передатною функцією 1-го порядку.[7]

Коефіцієнт зворотного зв'язку контуру за потокозчепленням

$$k_{\Psi} = \frac{U_{\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2н}}$$

Передавальна функція ПІ-регулятора потокозчеплення

$$W_{pi} = k_{pi} \cdot \frac{T_{pi}p + 1}{T_{pi} \cdot p}$$

Коефіцієнт підсилення та стала часу регулятора потокозчеплення визначаються за виразами

$$k_{pi} = \frac{J_e \cdot k_c}{\Psi_{2н} \cdot k_{\partial \omega} \cdot k_{\mu} \cdot a_c \cdot T_{\mu \text{ ш}}}$$

$$T_{pi} = b_{\mu} \cdot a_{\mu} \cdot T_{\mu \text{ ш}}.$$

Контур регулювання поточкозчеплення на базі ПІ-регулятора, налаштований таким чином, і має відповідні передатні функції:

– розімкнутого контуру

$$W_{\text{ш роз}} = \frac{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\text{шле}} p + 1}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_c T_{\text{шиз}} T_{\text{шле}}^2 p^4 + b_c a_c^2 T_{\text{шле}}^3 p^3 + b_c a_c^2 T_{\text{шле}}^2 p^2}$$

– замкненого контуру за керуванням

$$\begin{aligned} W_{\text{ш зам}} &= \frac{1}{k_{\text{ш}}} \times \\ &\times \frac{(b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\text{шле}} p + 1) \cdot (T_{\text{шиз}} p + 1)}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_c T_{\text{шизв}} T_{\text{шле}}^2 p^4 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\text{шле}}^3 p^3 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\text{шле}}^2 p^2 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\text{шле}} p + 1} \approx \\ &\approx \frac{\frac{1}{k_{\text{ш}}} (b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\text{шле}} p + 1) \cdot (T_{\text{шиз}} p + 1)}{b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_c T_{\text{шизв}} T_{\text{шле}}^2 p^4 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\text{шле}}^3 p^3 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}}^2 T_{\text{шле}}^2 p^2 + b_{\text{ш}} a_{\text{ш}} T_{\text{шле}} p + 1} \end{aligned}$$

Налаштування контура поточкозчеплення з ПІ-регулятором є схожим із налаштуванням на МО системи 2-го порядку.

Параметри налаштування контуру швидкості з ПІ- регулятором

Спираючись на рекомендації щодо вибору параметрів при налаштуванні контурів швидкості приймаємо такі значення:

Коефіцієнт, для врахування можливе перерегулювання швидкості:

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

Значення максимального завдання на вході контуру регулювання швидкості

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

Коефіцієнт датчика швидкості

$$k_{\partial\omega} = \frac{1}{\sigma_{\omega} \cdot \omega_n} = \frac{1}{1,2 \cdot 94,248} = 8,842 \cdot 10^{-3}.$$

Еквівалентна мала стала часу оптимізованого контуру регулювання швидкості

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

Апроксимаційний коефіцієнт ланки чистого запізнювання аперіодичною ланкою для ЕП загальнопромислового призначення[8]

$$n_{\omega} = 2.$$

Стала часу регулятора швидкості

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

Коефіцієнт типового налаштування контуру швидкості

$$a_{\omega} = 2.$$

Коефіцієнт підсилення регулятора струму

$$k_{pi} = \frac{J_e \cdot k_{ui}}{\Psi_{2u} \cdot k_{dv} \cdot k_{ui} \cdot a_{ui} \cdot T_{mice}} = \frac{0,264 \cdot 0,039}{0,88 \cdot 4,457 \cdot 8,842 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-3}} = 78,485.$$

При налаштуванні системи керування електроприводу використовують один з універсальних регуляторів в даному випадку ПІ-регулятор. Для кожного з контурів обчислено коефіцієнти та сталі часу регуляторів.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МОСТОВОГО КРАНА

Базова функціональна схема моделі частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням представлена на рисунку 12.

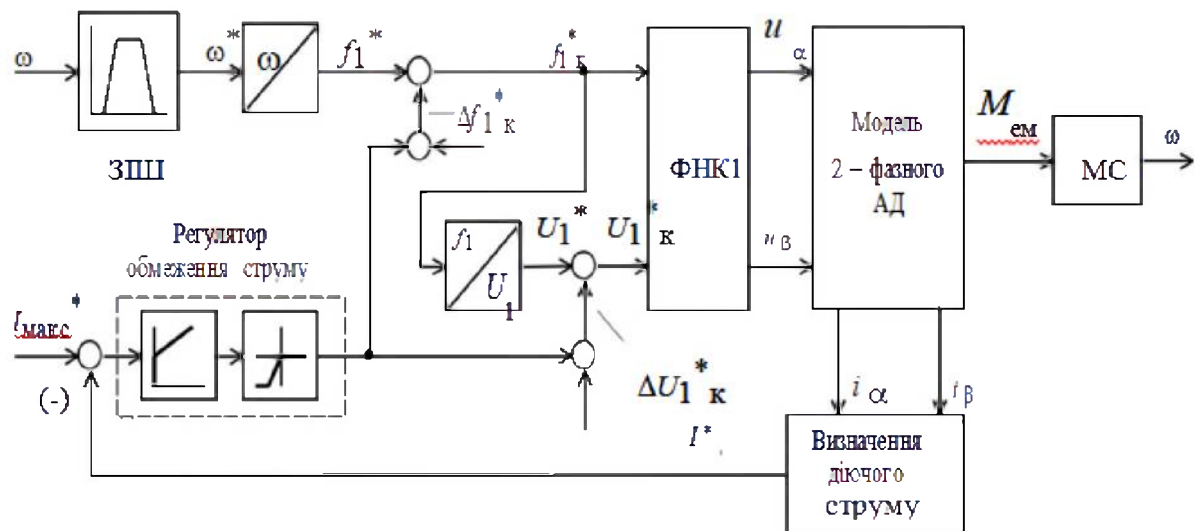


Рисунок 12 – Функціональна схема частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням

На рисунку 12 прийемо такі позначення:

Символ * означає, що це сигнал завдання або керування.

ω – фактична кутова швидкість обертання двигуна (валу ротора двигуна).

ЗПШ – задавач інтенсивності швидкості з лінійною або S-подібною характеристикою на виході.

ФНК1 – формувач напруги керування двофазного асинхронного двигуна – формує дві складові напруги змінного струму u_α і u_β .

Δf_{1k}^* та ΔU_{1k}^* – компенсаційні сигнали керування, у відповідних каналах регулювання частоти та напруги.

Перевірка системи проведемо з метою зіставлення теоретичних і практичних розрахункових результатів. Досліджувати найбільш зручно в програмному середовищі Matlab Simulink,

Для всебічного дослідження системи будуть зібрані та промодельовані дві моделі:

Перша – модель однозонного регульованого частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням на базі моделі асинхронного електродвигуна описаного в нерухомій системі координат α , β з давачами струмів $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ приведена на рисунку 13.

Друга – модель однозонного регульованого частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням на базі моделі асинхронного електродвигуна описаного в нерухомій системі координат α , β із давачами струмів $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, IR-компенсацією, компенсацією ковзання і регулятором обмеження струму приведена на рисунку 21.

У програму дослідження входять:

- 1) Пуск в режимі холостому ходу $U_{zc \max} = 10 \text{ В}$;
- 2) Розгін до номінальних параметрів при пуску та набиранні навантаження,
- 3) Розгін з мінімальної швидкості до максимальної;

Отримання показників якості, які зводяться у відповідні таблиці.

Для обох моделей проводяться наступні досліді:

- 1) Відпрацювання системи

- при максимальній напрузі завдання і максимальному моменті інерції/мінімальному моменті інерції;
- при мінімальній напрузі завдання і максимальному моменті інерції/мінімальному моменті інерції;

- 2) Імітація робочих циклів

- при максимальному моменті статичного опору та максимальному моменті інерції;

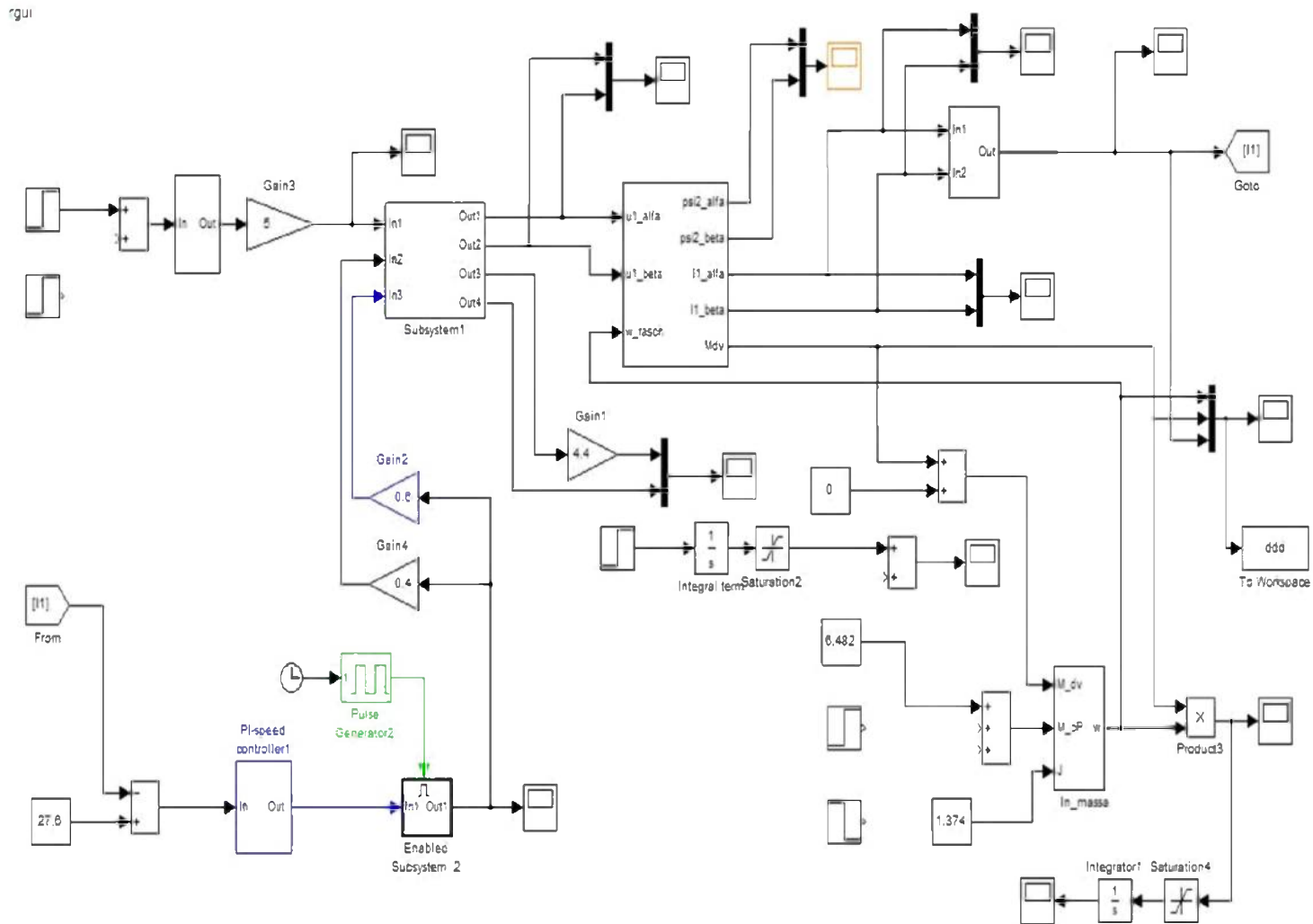


Рисунок 13 – Імітаційна модель частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням на базі моделі двигуна описаного в нерухомій системі координат α, β із корекцією вольт-частотної характеристики та давачами струмів

– при мініальному моменті статичного опору та мініальному моменті інерції.

Таким же чином досліджується робота вузла обмеження струму.

3.1 Пуск на холостому ході

Напруга завдання: $U_{zc\ max} = 10\ В$

Результати дослідів приведені на рисунку 14, отримані значення зносяться в таблицю 1 для порівняння з очікуваними.

Таблиця 1 – Результати експерименту.

Очікувані		Отримані	
ω_0	I_0	ω_0	I_0
104.7	6.8	14	6.87

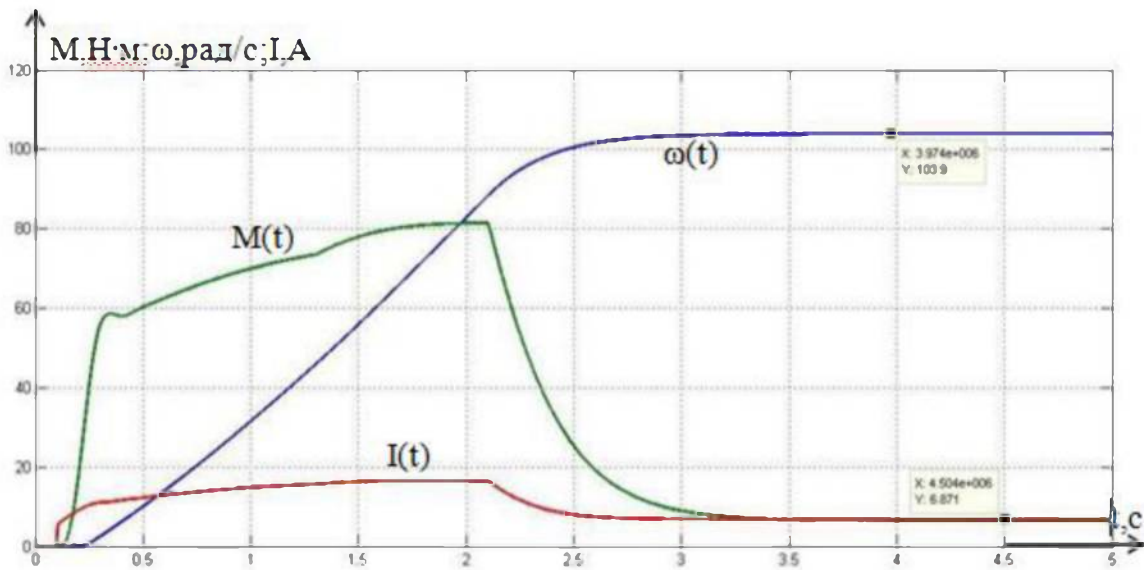


Рисунок 14 – Пуск на холостому ході

3.2 Пуск та збільшення навантаження

Напруга завдання: $U_{зс\ max} = 10\ В$

Результати дослідів приведені на рисунку 15, отримані значення зносяться в таблицю 2 для порівняння з очікуваними.

Таблиця 2 – Результати дослідів

Очікувані		Отримані		
ω_0	I_0	ω_0	I_0	M_{em}
104.7	6.8	103,9	6,871	59,69
ω_n	I_n	ω_n	I_n	
93,72	13,38	93,5	12,5	

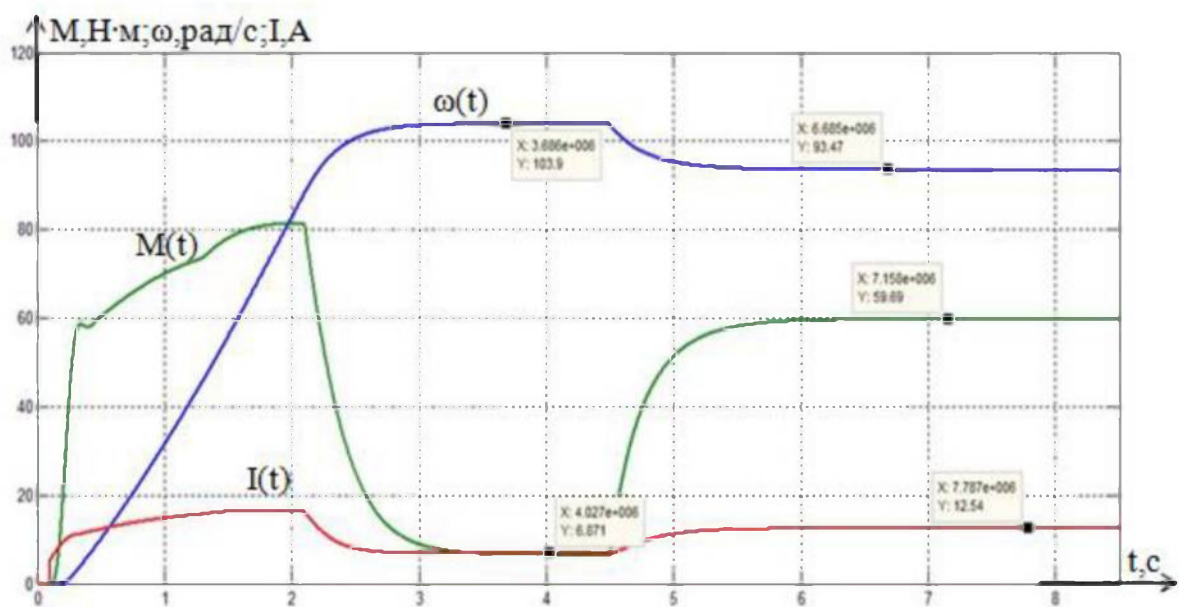


Рисунок 15 - Пуск та збільшення навантаження

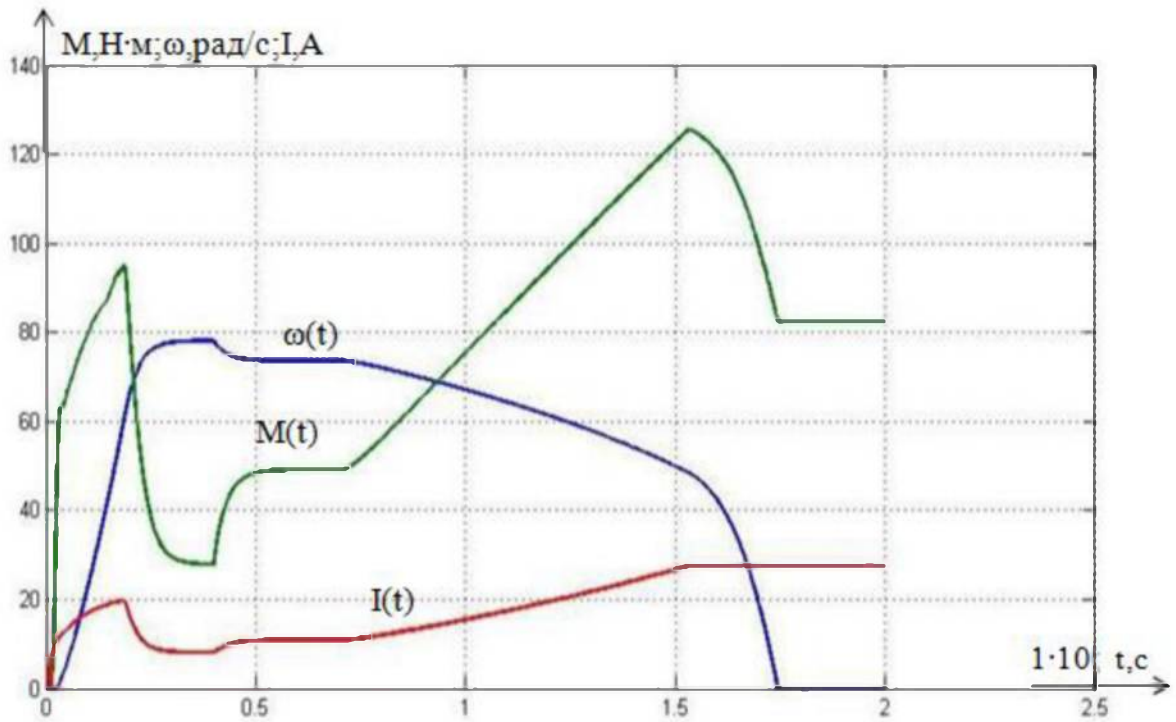


Рисунок 16 – Відпрацювання системи при максимальних напрузі завдання та моменті інерції

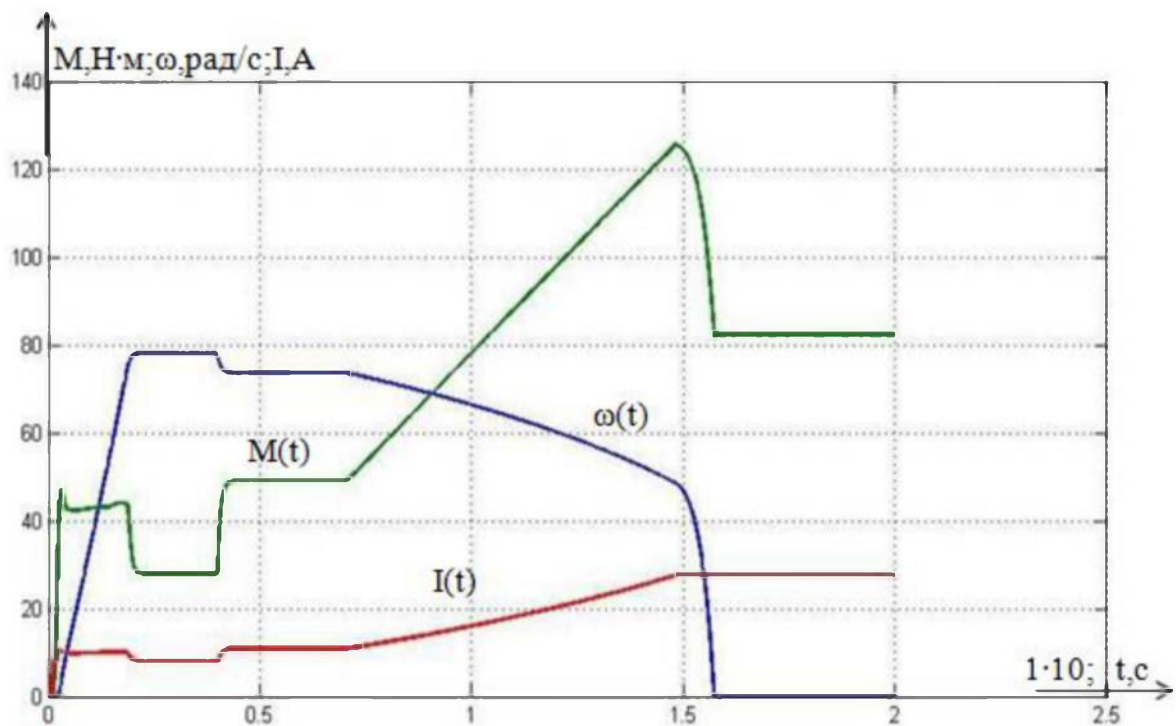


Рисунок 17 - Відпрацювання системи при максимальній напрузі завдання та мінімальному моменті інерції

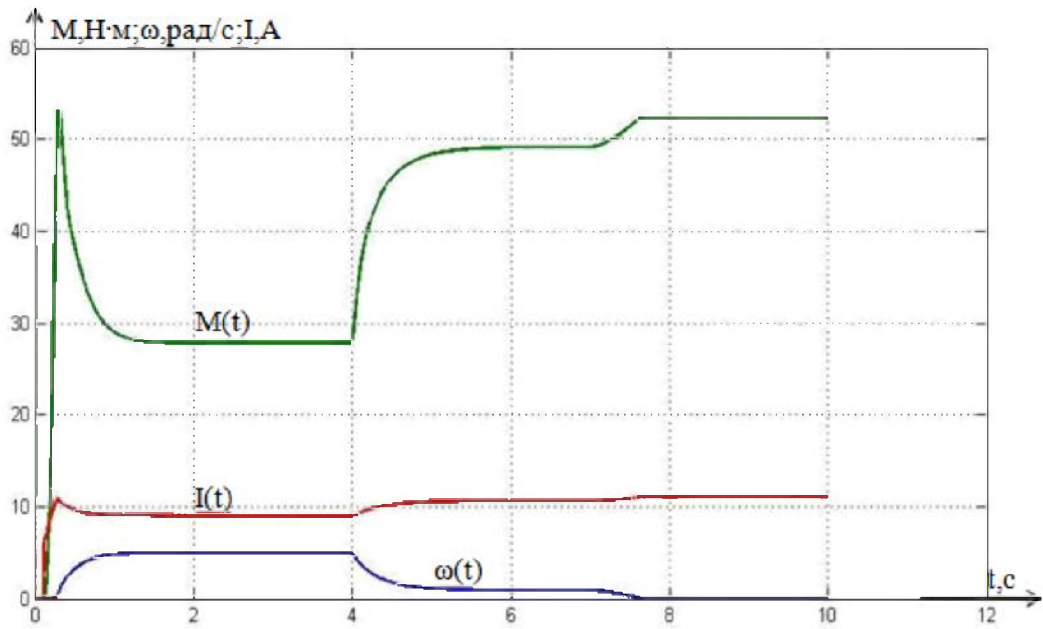


Рисунок 18 – Відпрацювання системи при мінімальній нарузі завдання та максимальному моменті інерції

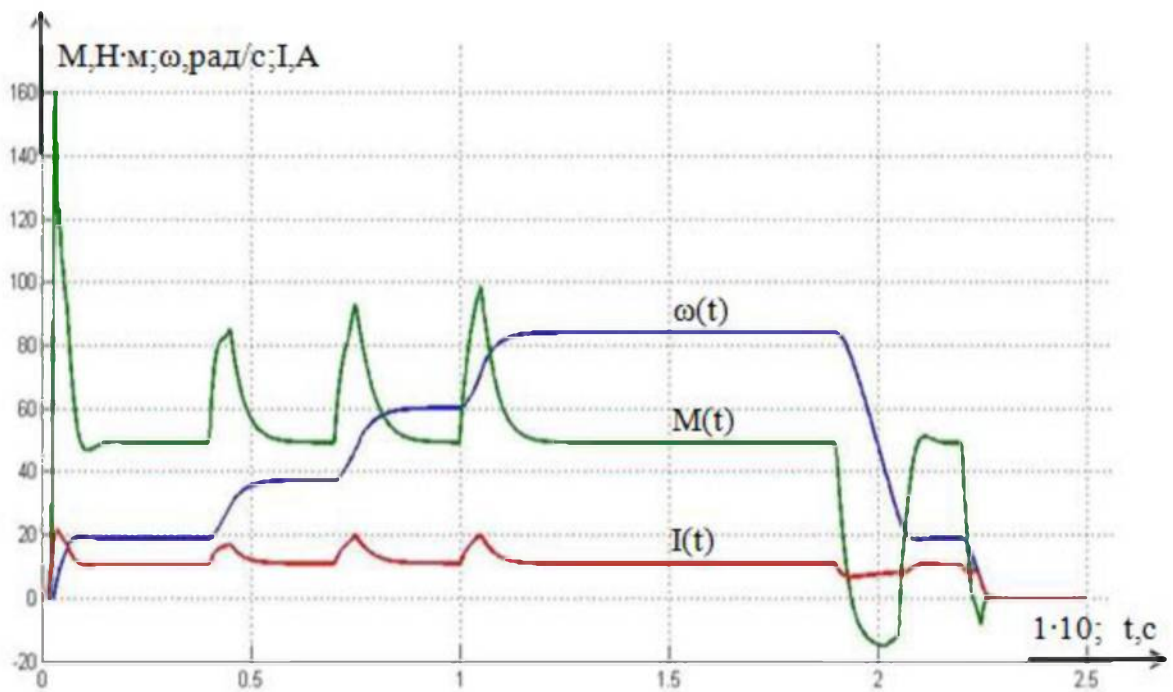


Рисунок 19 – Імітація робочого циклу при максимальних моменті статичного опору та моменті інерції

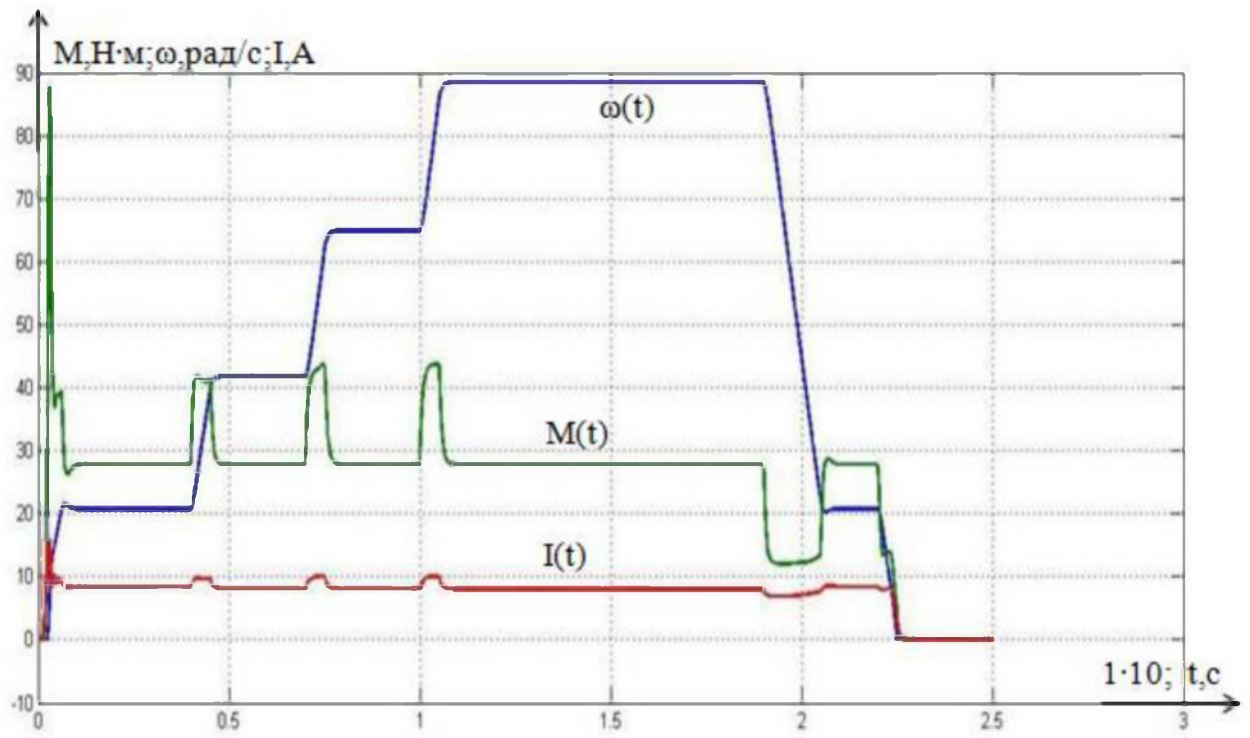


Рисунок 20 - Імітація робочого циклу при мінімальних моменті статичного опору та моменті інерції

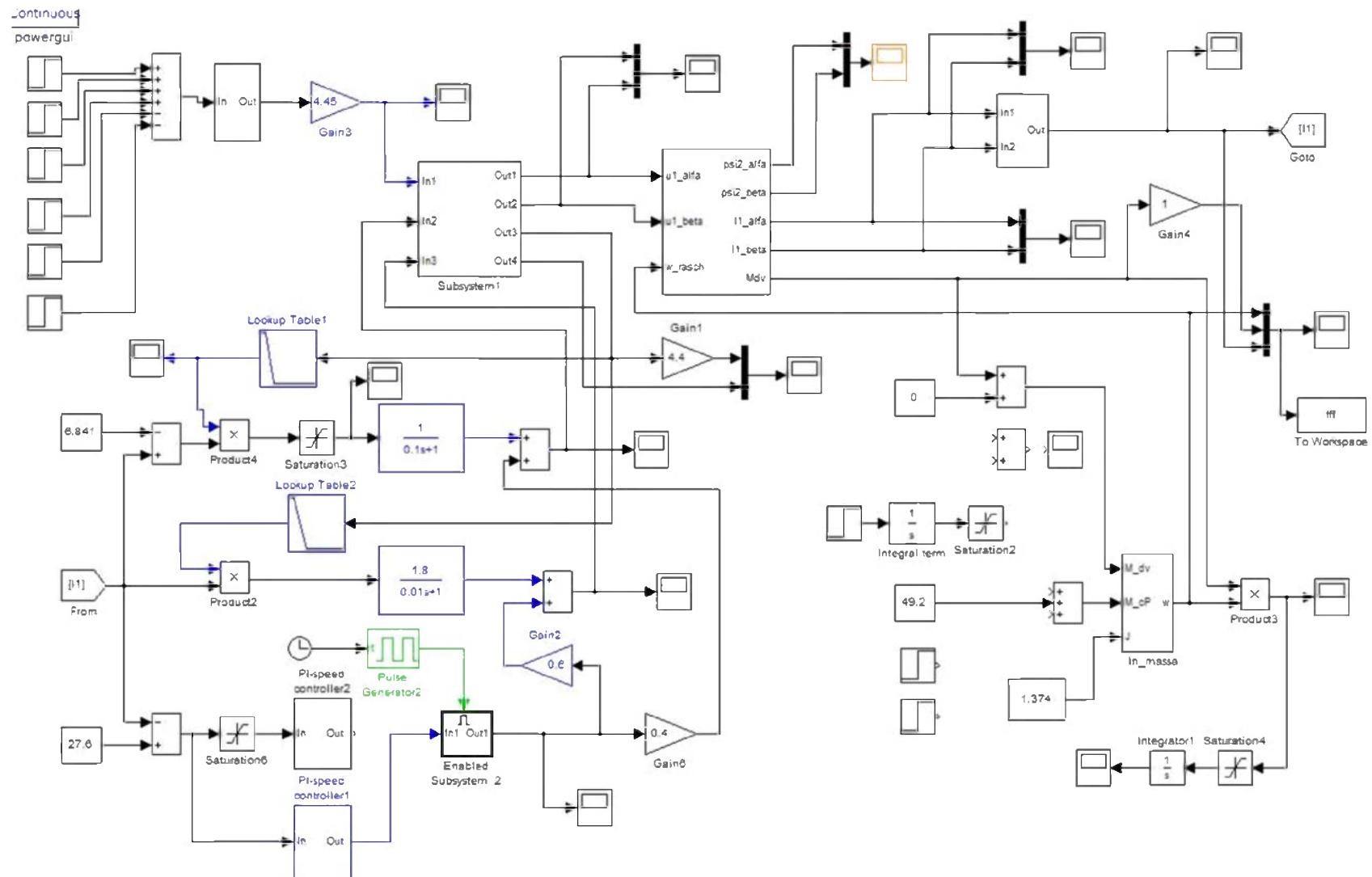


Рисунок 21 - Імітаційна модель частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням із ІР-компенсацією, компенсацією ковзання та регулятором обмеження струму

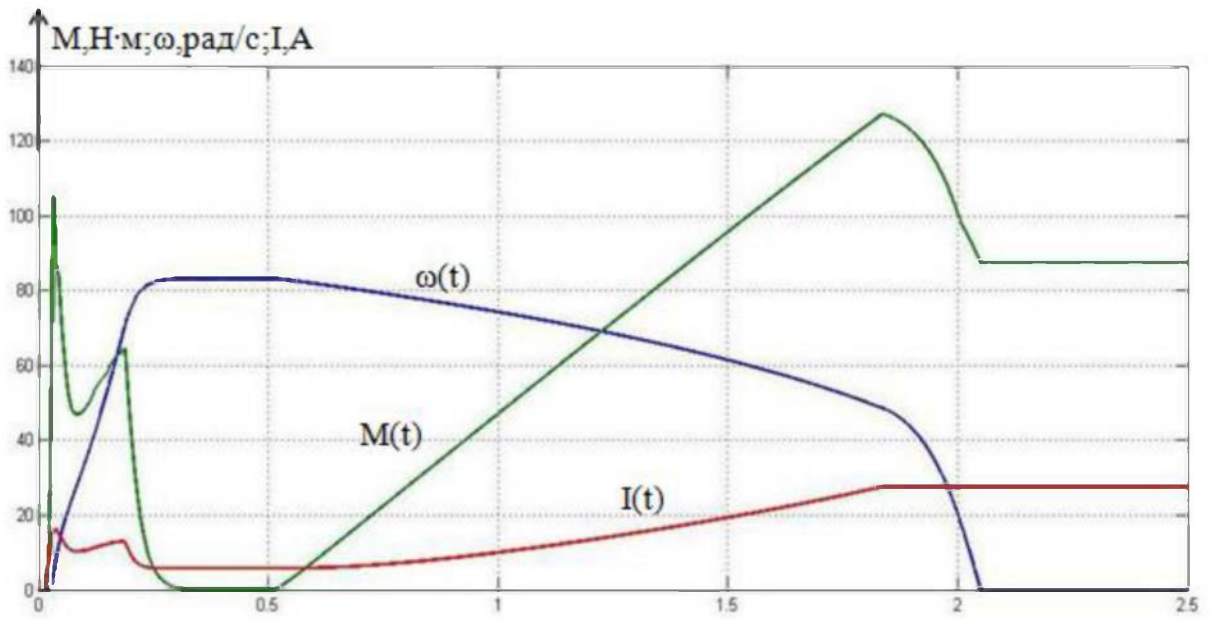


Рисунок 22 - Відпрацювання системи при максимальних напрузі завдання та моменті інерції

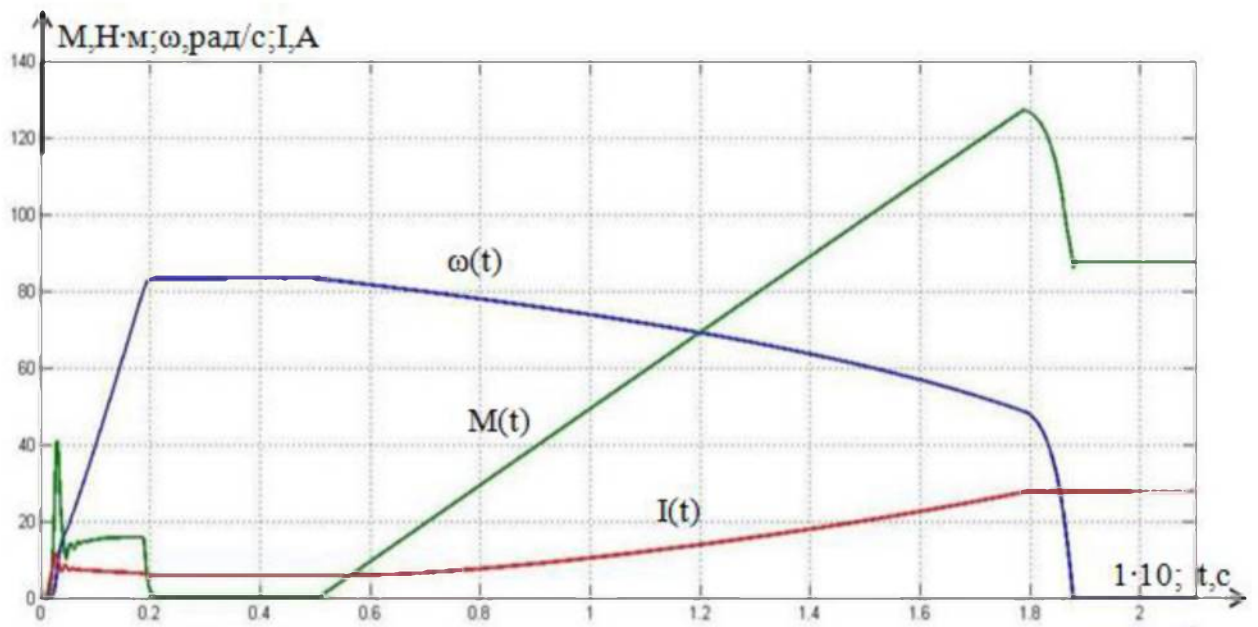


Рисунок 23 – Відпрацювання системи при максимальній напрузі завдання та мінімальному моменті інерції

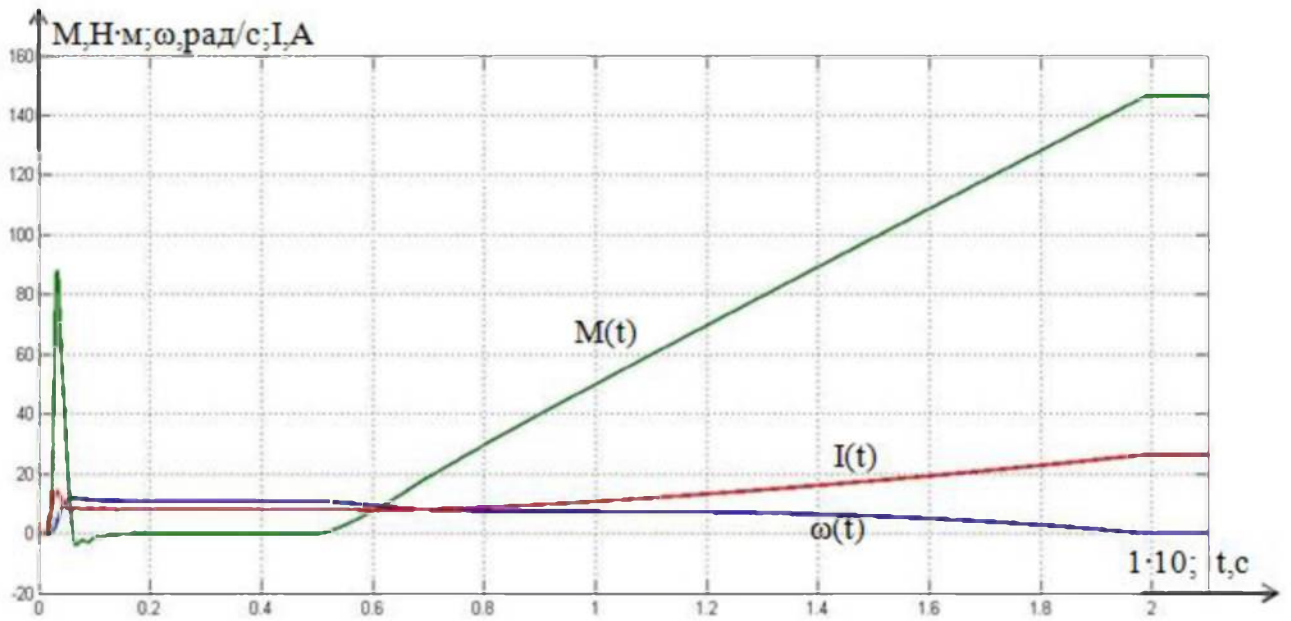


Рисунок 24 - Відпрацювання системи при мінімальній напрузі завдання та моменті інерції

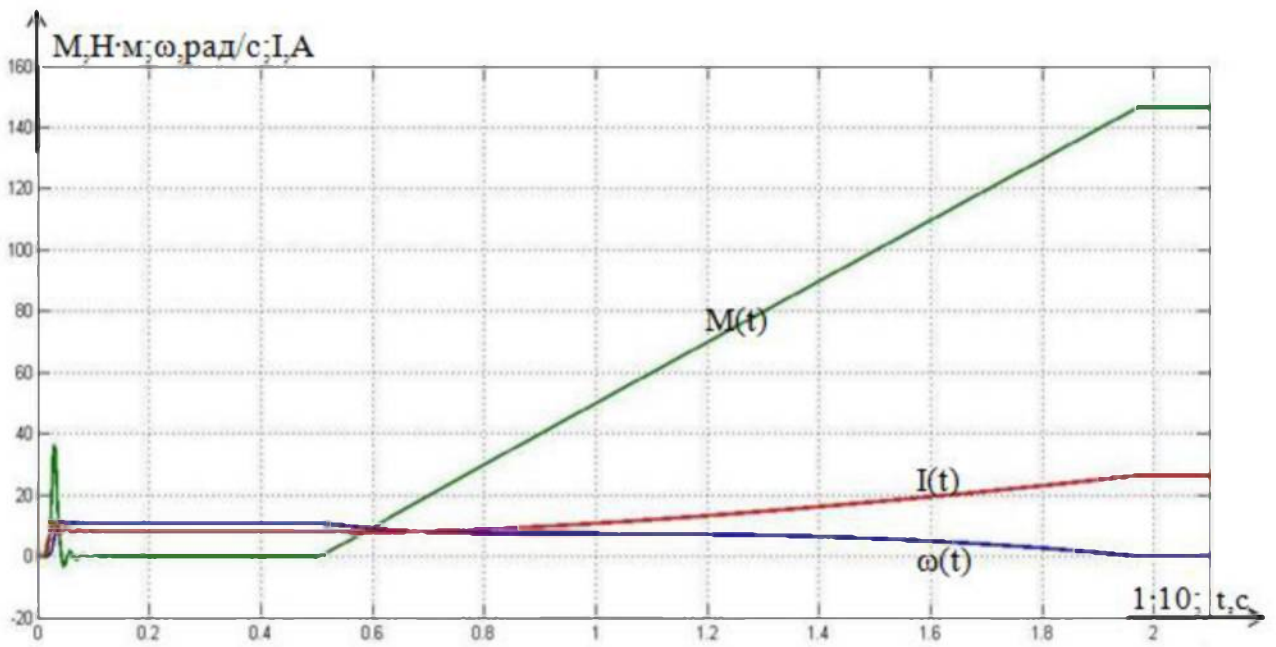


Рисунок 25 - Відпрацювання системи при мінімальних напрузі завдання та моменті інерції

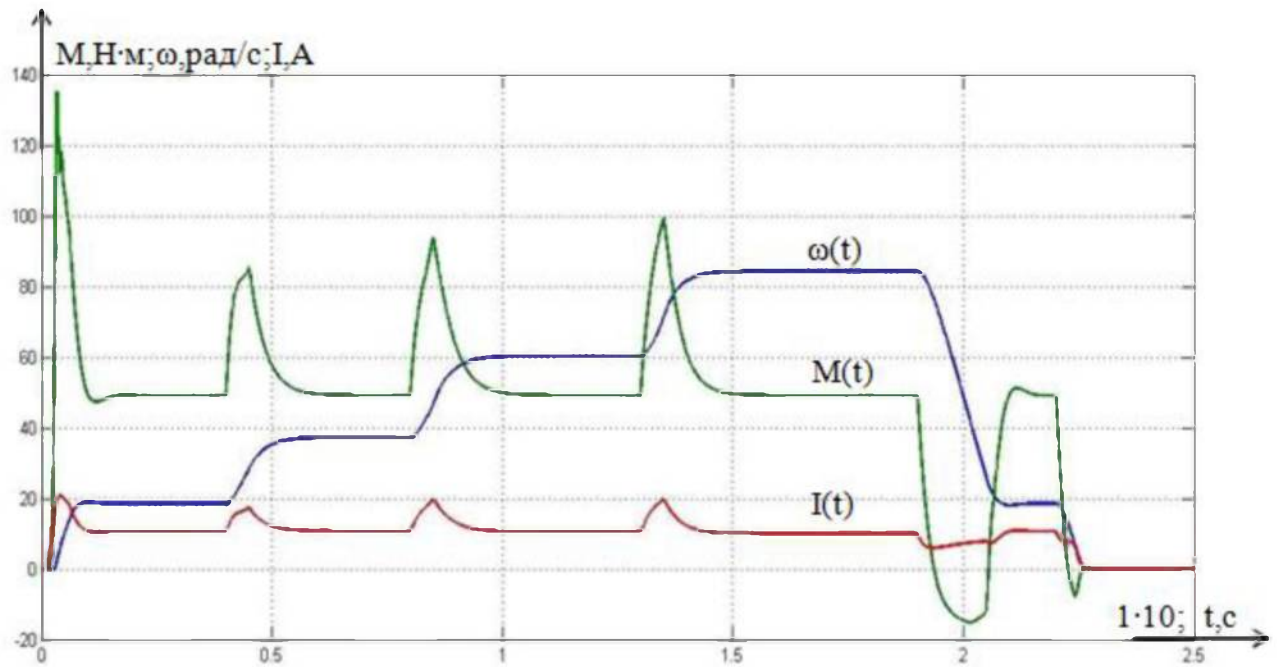


Рисунок 26 - Імітація робочого циклу при максимальних моменті статичного опору та моменті інерції

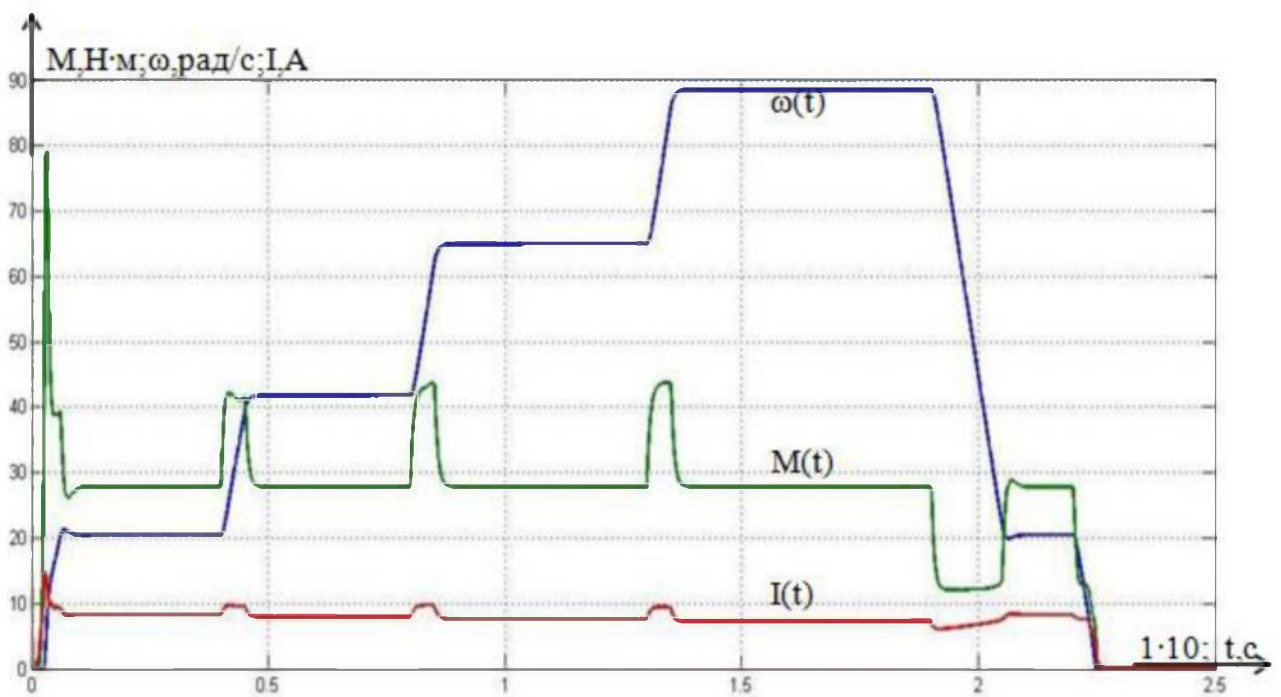


Рисунок 27 - Імітація робочого циклу при мінімальних моменті статичного опору та моменті інерції

Аналізуючи результати імітаційних досліджень електроприводу можна дійти висновку, що частотний асинхронний електропривод зі скалярним керуванням, з IR-компенсацією та компенсацією ковзання забезпечує потрібний діапазон регулювання швидкості механізму переміщення візка розгнаного мостового крана. Перехідні процеси в системі електроприводу протікають плавно, коливань моменту немає. Вузол струмообмеження реалізує обмеження струму та моменту двигуна під час перевантаження.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведений аналіз типового електричного обладнання мостових кранів. Визначені параметри схеми заміщення двигуна, розраховані природні механічні та електромеханічні характеристики. Проведений синтез системи керування електроприводом.

Наступним кроком, в програмному середовищі Matlab Simulink, проводилися дослідження двох топологій імітаційних моделей і робота вузла струмообмеження, для захисту електродвигун від перевантажень по струму.

Результати досліджень дають змогу говорити про те, що модель однозонного регульованого частотного асинхронного електроприводу зі скалярним керуванням на базі моделі асинхронного електродвигуна в нерухомій системі координат α, β з давачами струмів, IR-компенсацією та регулятором обмеження струму забезпечує порівняно більший пусковий момент, покращену жорсткість характеристик, під час відпрацювання завдання та при роботі на низьких частотах. Таким чином вона є більш прийнятною для такого типу механізму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. М., Высшая школа, 1972. 504 с.
2. Теорія електропривода, під редакцією М.Г.Поповича, Київ: Вища школа, 1993. — 493.
3. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д.Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. — Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2004. — 428 с.
4. Черных И.В. Моделирование электрических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с.
5. Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Расчет характеристик электроприводов переменного тока. Ч. 1. Асинхронный электродвигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
6. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 304 с.
7. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование автоматизированных электроприводов постоянного тока: учебное пособие по курсовому проектированию. - Томск, изд. ТПИ им. С.М. Кирова, 1991,- 104 с.
8. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное управление асинхронными двигателями. М: Энергия. 1966. 145с.

ДОДАТОК А

ОХОРОНА ПРАЦІ

Металоконструкції

Розрахунок несучих металоконструкцій і їх елементів здійснюється за НД.

Висувні елементи металоконструкцій або елементи, які складаються (стріла, башта, опори тощо), повинні бути надійно зафіксовані.

Металоконструкції та металеві деталі вантажопідіймальних кранів і машин повинні бути захищені від корозії відповідно до умов експлуатації. У металоконструкціях, які працюють під відкритим небом, повинні передбачатися заходи проти накопичування в них вологи.

Механізми

Механізми вантажопідіймальних кранів і машин, обладнані кулачковими, фрикційними або іншими механічними пристроями для вмикання або перемикання швидкостей робочих рухів, повинні виконуватися таким чином, щоб довільне вмикання або роз'єднання механізму було неможливо.

У вантажних лебідок з двома приводами останні повинні мати між собою жорсткий кінематичний зв'язок, яка виключає довільне опускання вантажу в разі виходу зі строю одного з приводів.

Застосування фрикційних і кулачкових муфт включення в вантажопідіймальних кранах і машинах, призначених для підняття людей, розплавленого металу або шлаку, отруйних і вибухових речовин, а також у механізмах з електроприводом не вирішується, крім механізмів:

а) пересування або повертання, що має декілька діапазонів швидкостей для перемикання з однієї швидкості на іншу;

б) пересування гусеничних кранів із спільним приводом двох гусениць для роздільного керування ними.

У випадках, зазначених у підпунктах а) і б) цього пункту, гальмо повинне мати кінематичний зв'язок, що не розмикається, з поворотною частиною крана, гусеницями або колесами.

Механізми підймання вантажу та стріли мають виконуватися так, щоб виключалася можливість вимикання приводу без накладення гальма, а опускання вантажу або стріли здійснювалося тільки від працюючого двигуна.

У стрілових самохідних кранів зусилля підняття (висування) вручну виносних опор або їх частин не повинно перевищувати 200 Н.

При більшому зусиллі виносні опори повинні мати гідравлічний, механічний або інший привід.

Стрілові самохідні крани, які мають підресорену ходову частину, повинні бути обладнані пристроями, що виключають дію пружних підвісок і дозволяють передавати навантаження, сприймане краном, безпосередньо на ходову частину або виносні опори. Ці крани також обладнуються стабілізатором пружних підвісок, що дозволяє рівномірно передавати навантаження на всі ресори однієї ходової осі з тим, щоб забезпечити їх рівномірне осідання. На автомобільних кранах і кранах на спеціальному шасі ці пристрої на передніх осях можуть не встановлюватися.

Механізми підймання кувальних кранів обладнуються пристроями, які амортизують, для запобігання впливу на металоконструкції крана технологічних навантажень, які виникають під час кування заготовок.

У з'єднаннях елементів вантажопідіймальних кранів і машин (болтових, шпонкових, шліцьових тощо) має бути виключене довільне розгвинчування або роз'єднування.

Ухил колії вантажних візків у козлових і консольних кранів у найбільш несприятливому положенні візка з найбільшим робочим вантажем не повинен перевищувати 0,003. Зазначена норма ухилу не стосується кранів, у яких механізм пересування візка споряджений автоматичним гальмом нормально замкнутого типу або візок крана пересувається канатною тягою.