

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Модернізація електроприводу пластинчастого живильника ПП-1-15
для умов гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-20 _____ Артем КОРОЛЬОВ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Олексій МИХАЙЛЕНКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2024

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Корольова Артема Сергійовича

1. Тема роботи: Модернізація електроприводу пластинчастого живильника ПП-1-15 для умов гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
2. Строк подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: удосконалення системи керування електроприводом пластинчастого живильника шляхом розробки системи ПЧ-АД з прямим керуванням моментом для підвищення рівня автоматизації технологічного процесу і його енергетичної ефективності
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): загальна характеристика пластинчастого живильника та вимоги до його електроприводу; розрахунок механічної частини та вибір електродвигуна; розрахунок природних і штучних статичних характеристики електроприводу, моделювання динаміки електроприводу; розробка і моделювання системи прямого керування моментом
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): загальний вигляд пластинчастого живильника; статичні характеристики асинхронного двигуна; статичні характеристики ПЧ-АД; динамічні характеристики розімкненої системи електроприводу; динамічні характеристики системи частотного регулювання з прямим керуванням моментом

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	29.05.24–10.05.24
2	Спеціальна частина	11.05.24–17.05.24
3	Проектно-конструкторська розробка	18.05.24–29.05.24
4	Оформлення пояснювальної записки	30.05.24–10.06.24
5	Оформлення презентації	11.06.24–17.06.24
6		
7		

Дата видачі завдання: 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____

Артем КОРОЛЬОВ

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

Реферат

У роботі покращено систему керування електроприводом пластинчастого живильника дробарної фабрики гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» шляхом прямого керування моментом.

За вихідними даними пластинчастого живильника дробарної фабрики обчислили потужність і прийняли привідний електродвигун 1LE1603-2DD0, який задовольняє вимогам до електроприводу механізму і якості ведення технологічного процесу.

Далі досліджувалися характеристики асинхронного електропривода (ПЧ-АД) з двигуном 1LE1603-2DD0 при частотному регулюванні $U/f - \text{const}$. На основі параметрів двигуна обраного для пластинчастого живильника була розрахована Т-подібна схема заміщення, яка є спрощеною моделлю, що описує електричні характеристики двигуна. За допомогою цієї схеми були побудовані статичні характеристики двигуна: механічна (залежність моменту від кутової швидкості) та електромеханічна (залежність струму від моменту).

Статичні характеристики двигуна були проаналізовані при частотному регулюванні $U/f - \text{const}$. В ході аналізу було визначено, що для ПЧ-АД з даним двигуном при такому регулюванні необхідно залучати методи для покращення регулювання моменту двигуна при зміні частоти напруги.

Для більш детального дослідження динамічних характеристик двигуна була синтезована його математична модель. Ця модель описує поведінку двигуна в часі, враховуючи різні фактори, такі як напруга, струм, момент та кутова швидкість.

Створили модель системи прямого керування моментом асинхронного електроприводу пластинчастого живильника в MATLAB. Проводили моделювання роботи системи при переміщенні повної і порожньої транспортувальної поверхні пластинчастого живильника, яке показало те, що систему можна використовувати в промисловості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дробарна фабрика, пластинчастий живильний, асинхронний електропривод, статика, динаміка, частотне регулювання, пряме керування моментом.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Розділ 1. Загальна частина	7
1.1 Виробничі процеси гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	8
1.2 Характеристика залучення пластинчастого живильника в процеси дроблення на рудозбагачувальних фабриках.....	10
1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна пластинчастого живильника.....	15
Висновки до розділу 1	18
Розділ 2. Спеціальна частина	19
2.1 Розрахунок схеми заміщення двигуна пластинчастого живильника та побудова статичних характеристик	20
2.2 Статичні характеристики асинхронного двигуна пластинчастого живильника при частотному регулюванні	24
2.3 Математична модель асинхронного двигуна	27
2.3.1 Виведення рівнянь трифазної індукційної машини	27
2.3.2 Еквівалентна схема асинхронної машини	32
Висновки до розділу 2	40
Розділ 3. Проектно-конструкторська розробка.....	41
3.1 Принципи побудови системи прямого керування моментом.....	42
3.2 Оцінка потоку та крутного моменту при прямому керуванні моментом	43
3.3 Синтез моделі системи прямого керування моментом електроприводу пластинчастого живильника	45
3.4 Моделювання електроприводу пластинчастого живильника із системою прямого керування моментом.....	54
Висновок до розділу 3	57
Висновки	58

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вступ

Модернізація електропривода пластинчастого живильника має важливе значення в сучасній промисловості. Перш за все, сучасні електроприводи є значно енергоефективнішими, що допомагає суттєво знизити витрати на електроенергію, які зростають разом із цінами на енергоносії. Крім того, нові приводи розробляються з урахуванням підвищеної надійності та довговічності, що зменшує частоту технічного обслуговування та ремонтів, а також подовжує термін експлуатації обладнання.

Важливою перевагою модернізації є можливість інтеграції з сучасними системами автоматизації. Це дозволяє більш точно контролювати роботу живильника, оптимізувати процеси подачі матеріалів і знижувати втрати. Системи автоматичного контролю також забезпечують оперативний моніторинг та діагностику, що допомагає швидко виявляти і усувати несправності.

Модернізовані електроприводи також відповідають суворішим екологічним стандартам, зменшуючи негативний вплив на довкілля. Вони дозволяють забезпечити стабільну роботу обладнання навіть у складних умовах, підвищуючи загальну продуктивність виробництва.

Отже, модернізація електроприводів пластинчастих живильників є важливим кроком для підвищення ефективності та надійності промислових процесів, зниження витрат та забезпечення екологічної безпеки.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	<i>Арк.</i>
						6
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

Розділ 1. Загальна частина

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Загальна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Коральов А.С.</i>					<i>Н</i>	<i>7</i>	<i>60</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Конс.</i>								
<i>Н.контр.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Пересунько І.І.</i>					<i>КНУ ЕЕМ-20</i>		

1.1 Виробничі процеси гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Продукція гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – це агломерат концентратів видобутих і збагачених кварцитів магнетитових з низьким складом заліза. Виробництво включає такі виробничі об'єкти: рудник з 2-ма кар'єрами № 2-біс і № 3, 2 дробильні, 2 збагачувальні, 2 агломераційні фабрики, а також кілька допоміжних цехів, як-то шламовий, електроремонтний, залізничний, тощо. **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Електроенергія надходить від підстанцій НЕК «Укренерго». Оборотно-водопостачання – головне джерело технічної води.

Сировина для виробництва концентрату – залізисті кварцити міцністю 15-19 (шкала Протод'яконова) з основним мінералом магнетитом **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Руда поступає з 2-х кар'єрів, які розробляють різні родовища: №3 – на Валявкинське (відпрацьовуються четвертий і шостий залізисті горизонти); №2-біс – Новокриворізьке (відпрацьовуються перший та другий залізисті горизонти).

Річна потужність видобутку сирої руди відкритим способом до 30 млн. т.

Основою виробництва є дві рудо-збагачувальні фабрики РЗФ-1 і РЗФ-2. Переробка руди на РЗФ-1 провадиться таким чином. Спочатку за допомогою конусних дробарок в чотири етапи дроблять матеріал до розміру +25–0 мм. Перед четвертим етапом для відокремлення частинок розміру +20 мм провадять грохочення. Далі послідовно в кульових і стрижневих млинах з двоспиральними класифікаторами іде подрібнення руди до розміру 0,5 мм (55% часток 0,074 мм). Збагачення продукту класифікаторів здійснюється на магнітних сепараторах. Продукт збагачення доподрібнюється до 83...85 відсотків часток 0,074 мм в кульових млинах із гідроциклонами. Проводиться знешламливання на дешламаторах. Вихід гідроциклонів збагачується на сепараторах. Продукт збагачення знову доподрібнюється до 96 відсотків

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

часток 0,074 мм в кульових млинах із гідроциклонами. Проводиться знешламлювання на дешламаторах. Отримується готовий концентрат на сепараторах, який зневоднюється в вакуум-фільтрах.

Схема РЗФ-2 має відмінності: дроблення руди провадиться в три етапи із до класу –20 мм; подрібнення руди провадиться в три етапи до 90...98% часток 0,074 мм в кульових млинах; збагачення провадиться чотири етапи на сепараторах з дешламацією в дешламаторах перед III і IV стадіями; рідкий концентрат об'єднується і весь зневоднюється в окремому цеху на вакуум-фільтрах.

Кожна РЗФ має склади концентрату з яких його подають в аглоцех №3, аглоцех металургійного виробництва або постачають зовнішнім споживачам.

Агловиробництво включає аглоцех №3, аглоцех металургійного виробництва, цех підготовки шихти, склад агломерату. Кожен аглоцех має шість агломашин. Проектна річна продуктивність аглоцеху №3 – 4,5 млн. т. агломерату; аглоцеху металургійного виробництва – 6,0 млн. т. агломерату.

Перед рудо-збагачувальним виробництвом руда підлягає дробленню. На рис. 1.1 приведена схема дроблення руди ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

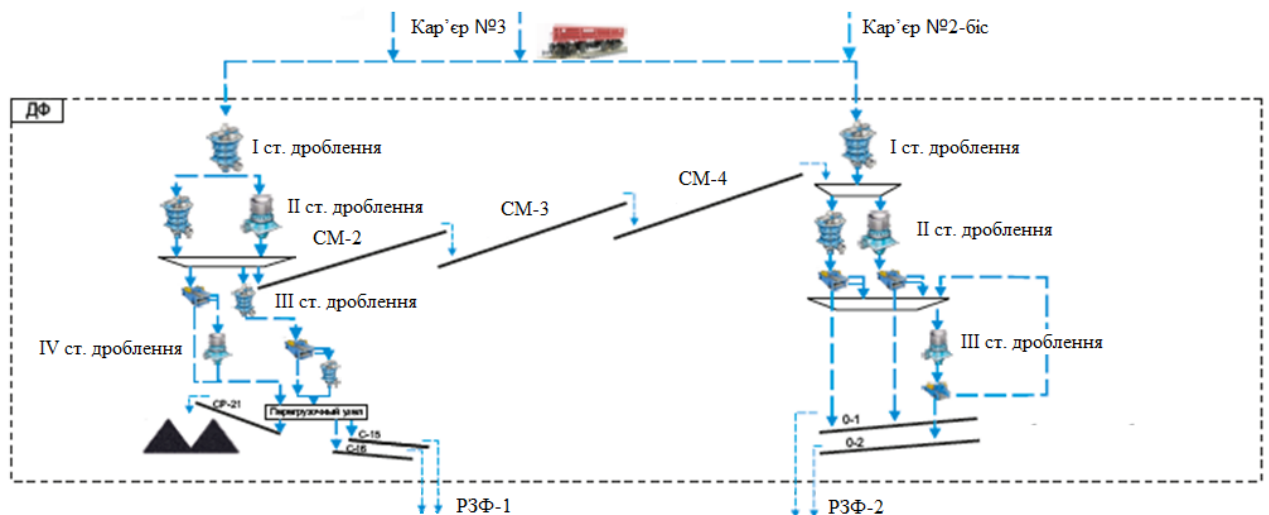


Рисунок 1.1 – Технологічна схема дроблення руди гірничого департаменту
[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

Основним обладнанням тут є конусні дробарки різного ступеню дроблення. Для нормальної роботи дробарки потрібне рівномірне їх

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

завантаження рудою. З цією метою застосовуються спеціальні пристрої – живильники, які є об'єктом проектування бакалаврської роботи.

1.2 Характеристика залучення пластинчастого живильника в процеси дроблення на рудозбагачувальних фабриках

Для забезпечення нормальної роботи обладнання (дробарок, млинів, металургійних печей та ін.) подача перероблюваного матеріалу (шихти, концентрату, руди) має бути рівномірною. Тому встановлюють спеціальні механізми – живильники, що розміщуються під бункерами для живлення конвеєрів, які транспортують матеріал до технологічних агрегатів, або перед цими агрегатами.

Існує велика кількість конструкцій живильників для сипучих матеріалів, що відрізняються в основному конструктивним виконанням робочих органів.

Пластинчастий живильник (рис. 1.2) за своїм устроєм схожий з пластинчастим конвеєром. Робочим органом живильника служить нескінченний ланцюг, що приводиться в рух зірочкою. На ланцюзі закріплені пластини, що становлять разом із ланцюгами полотно живильника. Для натягування ланцюгів передбачено гвинтовий натяжний пристрій.

Живильники можуть бути важкого і легкого типів. Останні застосовують для подачі матеріалів зі шматками 300-400 мм (руда, шихта), а також для подачі гарячих кускових матеріалів (агломерату, клінкеру). Живильники важкого типу використовують у важких умовах експлуатації - для подачі недробленої руди зі шматками до 1250 мм за великого ударного навантаження від шматків, що падають.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	<i>Арк.</i>
						<i>10</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

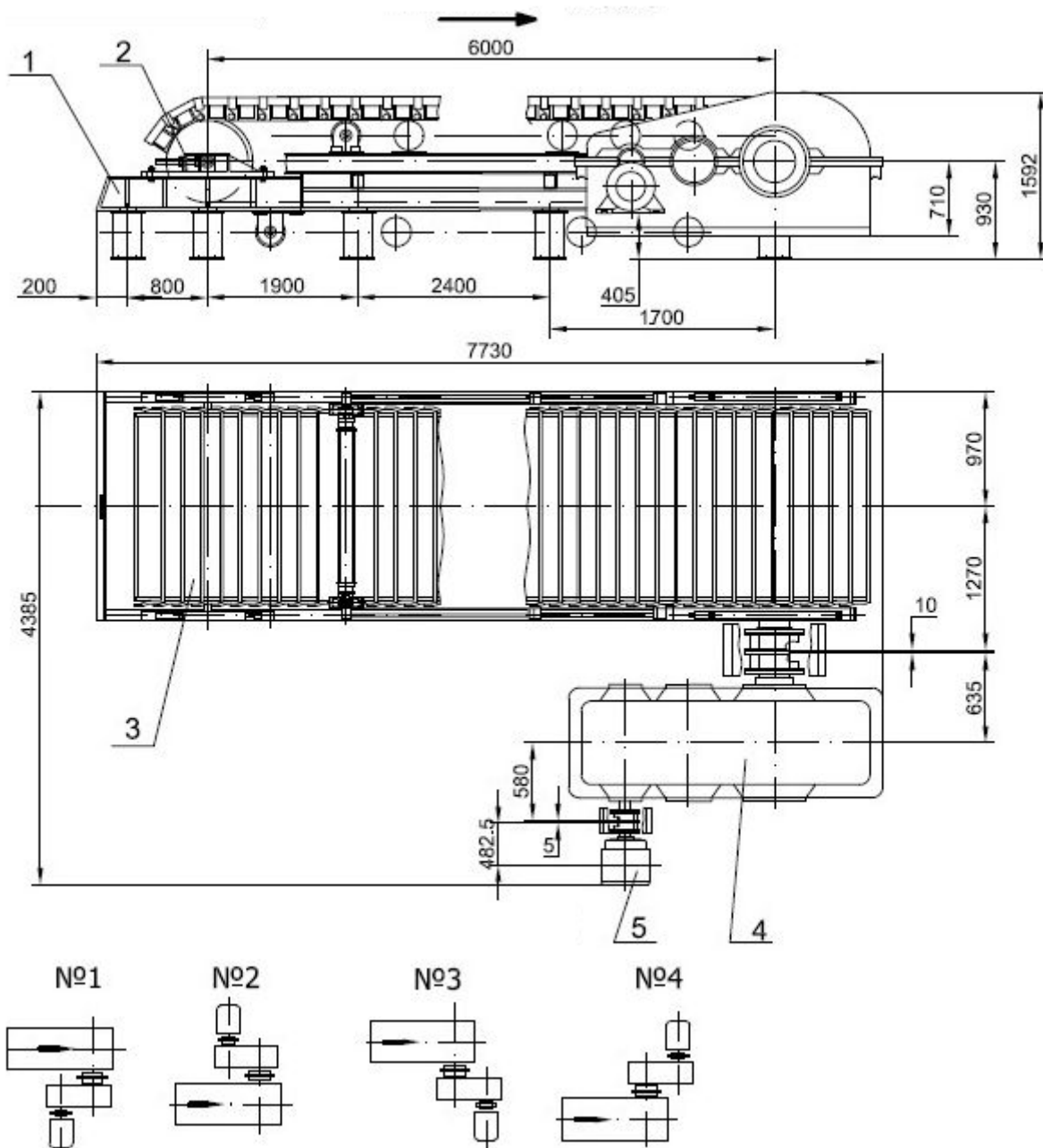


Рисунок 1.2 – Пластинчастий живильний ПП-1-15: 1 – рама живильника; 2 – пристрій натяжний; 3 – стрічка живильника; 4 – редуктор; 5 – електродвигун [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Пластинчасті живильники встановлюють у горизонтальному і похилому положенні під кутом нахилу 15-35°. Більші кути приймають для важких живильників. При похилому положенні більш раціонально використовується кубатура будівлі, компанується обладнання (наприклад, живлення шокової дробарки та ін.). На легких живильниках встановлюють шибер для регулювання продуктивності.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09

Арк.

11

Легкі живильники роблять із редукторним і храповим механізмом, стаціонарними і пересувними. Стаціонарні встановлюють під бункерами на рамі або підвішують до горловини бункера. Жорстка і міцна конструкція пластинчастих живильників дає змогу встановлювати їх під бункерами, вони можуть слугувати водночас надійним затвором бункера.

Робоча гілка ланцюга 1 приводиться в рух зірочками; вона через ролики спирається на напрямні косинці і перекочується по них. Пластини бувають різного профілю: плоскі, коробчасті, хвилеподібні. Борти жорсткої конструкції, задня стінка нахилена.

Пластини прибалчуються до вугільних ланок ланцюга. Втулки, ролики і пальці виготовляють з легованих конструкційних сталей і піддають термічній обробці. Вушка ланок також гартують або цементують.

Храповий механізм дає змогу отримати велике передавальне відношення механізму і змінювати швидкість руху полотна в широких межах порівняно простим способом. Однак відкритий механізм зі швидкозношуваними деталями (собачками, храповим колесом, шатуном, пальцями) вимагає складнішого обслуговування, водночас підвищуються експлуатаційні витрати, ККД приводу зменшується.

Важкі живильники відрізняються від легких конструкцією робочого органу. Розрізняють живильники з тяговим органом, що складається з двох або багаторядних ланцюгів (з привареними або приклепанними до них пластинами), і живильники, в яких тяговим і несучим органом слугують шарнірно з'єднані між собою пластини.

Живильник із двома тяговими ланцюгами розміром 1800x15000 мм має сталеві литі пластини хвилястої форми. Для підвищення жорсткості пластини відливають із поперечними ребрами і кінцевими бортами. Ланцюги збирають зі сталевих литих ланок і з'єднують пальцями зі сталі 40Х. Ланки спираються одна на іншу і тим самим усувається провисання стрічки. Крок ланцюга дорівнює 300 мм, а відстань між ланцюгами становить 1050 мм.

Великим недоліком живильників є просипання матеріалу через зазори між пластинами, що пов'язано з непродуктивною затратою праці на

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

прибирання просипу і збільшенням запиленості в атмосфері цеху. Тому передбачають розташування пластин з перекриттям. Дотичні поверх нігті пластин обробляють, що оберігає деталі від можливого заїдання і передчасного зносу. Борти пластин також взаємно перекриваються і обробляються. Привід живильника зазвичай має дві зубчасті передачі і розрахований на постійну швидкість руху полотна. У разі необхідності частої зміни швидкості (продуктивності) встановлюють двигуни постійного струму або варіатори швидкостей.

Живильник із багаторівневим ланцюгом (рис. 24) має плоскі сталеві (литі, штамповані, ковані) пластини 3 з високими бортами. Ланки 4 також можуть бути литими, зварними або кованими. Пластини з ланками з'єднуються зварюванням. Практика експлуатації засвідчила непридатність зварних ланок унаслідок частих обривів ланцюгів, які відбуваються при нерівномірному розподілі тягового зусилля між окремими ланками. Найбільш надійні в роботі ковані або штамповані ланки. Термін служби їх досягає 3 років. Для підвищення довговічності ланок застосовують термічно оброблені втулки. Осі (пальці) ланцюгів - гладкі, з легованих сталей.

Ролики підтримують робочу частину полотна, ролики нижню. Приводний механізм живильника складається з електродвигуна, редуктора, зубчастої муфти, зубчастої косозубої пари вала-зірочки. Число зубців зірочки дорівнює числу ланок ланцюга, що одночасно зчіплюються.

Для зменшення провисання полотна ролики встановлюють часто з кроком 600-700 мм з таким розрахунком, щоб полотно спиралося по всій ширині. Нижні ролики короткі більшого діаметра Зупиняються з кроком у 2-3 рази більшим, ніж верхні ролики.

Натяг ланцюгів здійснюється переміщенням натяжного барабана за допомогою гвинтового натяжного пристрою. Раму живильника встановлюють так, щоб вона не заважала обслуговувати агрегат і прибирати просип. Для заміни полотна та інших частин живильника мають бути встановлені залежно від умов розташування відповідні підйомні засоби: крани-укосини, лебідки, тельфери, блоки. За відсутності запасного живильника необхідно мати запасне

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	<i>Арк.</i>
						<i>13</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		

зібране полотно і в усіх випадках кілька окремих роликів, пластин і підшипників. Підвищення зносостійкості ланок, пластин, осей і зірочок досягається наплавленням і зносостійкими дротами. Для змащення підшипників передбачена централізована система. Підшипники мають бути надійно ущільнені.

Недоліки багатоланкових ланцюгів, що полягають у частих обривах ланок, особливо під час роботи в зимовий час на глинистих в'язких матеріалах, усунуті в письменниках, які мають як тяговий і несучий орган масивні литі (з легованої сталі) пластини. Останні мають жорстку коробчату конструкцію. Вушка пластин з'єднуються осями, на кінці яких насаджені на роликопідшипники тягові ролики. Тягове зусилля створюється двома провідними зірочками, що зчіплюються з роликами пластин. Ролики пересуваються по двох бічних рейках. Середня рейка підтримує полотно, розвантажує пластини і оберігає їх від вигину від ударного навантаження від брил, що падають, і руди, яка перебуває в бункері та на живильнику. Наявність двох тягових ланцюгів і роликів, які є одночасно тяговими й опорними, спрощує конструкцію, забезпечує рівномірніший рух (без перекосів), підвищує ККД дроту і полегшує експлуатацію живильника.

Живильники характеризуються шириною полотна і відстанню між валами-зірочками. Технічна характеристика наведена в табл. 2.

Пластинчасті живильники дуже широко використовуються на збагачувальних фабриках, заводах на подачі руди і шихтових матеріалів.

1.3 Розрахунок потужності і вибір електродвигуна пластинчастого живильника

Вихідні дані для розрахунку потужності:

- призначення живильника – завантаження конусної дробарки;
- продуктивність живильника Q , т/год;
- довжина бункера L , м;
- насипна густина матеріалу ρ_n , кг/м³;

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- висота засипання матеріалу в бункері H , м;
- кут природного укосу матеріалу ϕ , град;
- висота розташування шиберної заслінки h , м.

Розрахункову схему із зазначенням основних розмірів і сил, що діють, наведено на рис. 1.3.

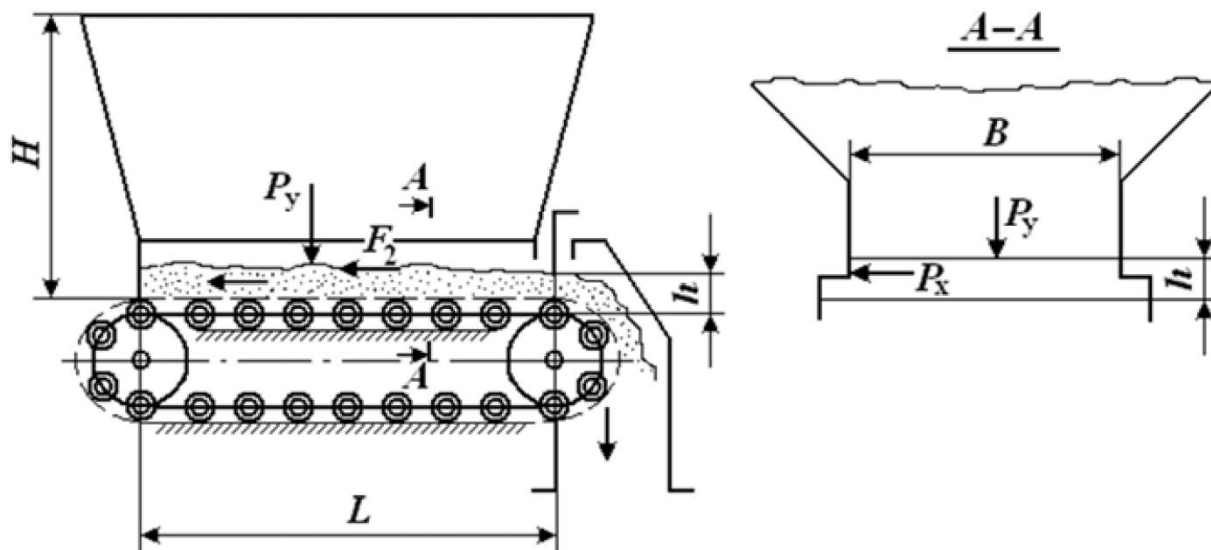


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема пластинчастого живильника

Ширина настилу пластинчастого живильника:

$$B = \frac{Q}{3,6 \cdot h \cdot v_n \cdot k_{зан} \cdot \rho_n} = \frac{100}{3,6 \cdot 0,2 \cdot 0,15 \cdot 0,85 \cdot 2600} = 0,419 \text{ м.} \quad (1.1)$$

де v_n – швидкість переміщення настилу пластинчастого живильника, м/с (0,02...0,15);

$k_{зан}$ – коефіцієнт заповнення розвантажувальної щілини пластинчастого живильника, залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу (0,85...0,95 – для добре сипучих матеріалів; 0,75...0,85 – для схильних до злипання).

Вертикальний тиск на рухомий настил:

$$P_y = \rho_n \cdot g \cdot H \cdot k_{зан} = 2600 \cdot 9,81 \cdot 0,7 = 8,927 \cdot 10^4 \text{ Па,} \quad (1.2)$$

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 ;

$k_{зав}$ – коефіцієнт зависання, що враховує зависання матеріалу на стінках горловини живильника (0,7...0,9).

Бічний тиск, що діє на бічні стінки пластинчастого живильника:

$$P_x = P_y \cdot \varepsilon = 8,927 \cdot 10^4 \cdot 0,415 = 3,707 \cdot 10^4 \text{ Па}, \quad (1.3)$$

де ε – коефіцієнт бічного тиску:

$$\varepsilon = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} = \frac{1 - 0,413}{1 + 0,413} = 0,415. \quad (1.4)$$

Сила тертя рухомого шару матеріалу об нерухомий:

$$F_1 = P_y \cdot B \cdot L \cdot f_{вн} = 8,927 \cdot 10^4 \cdot 0,419 \cdot 5 \cdot 0,839 = \\ = 1,569 \cdot 10^5 \text{ Н}, \quad (1.5)$$

де $f_{вн}$ – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу ($f_{вн} = \tan \phi$).

Сила тертя рухомого матеріалу об дві бічні стінки пластинчастого живильника:

$$F_2 = 2P_x \cdot L \cdot h \cdot f = 2P_y \cdot \varepsilon \cdot L \cdot h \cdot f = 2 \cdot 8,927 \cdot 10^4 \cdot 0,419 \cdot 5 \cdot 0,2 \cdot 0,6 = \\ = 4,448 \cdot 10^4 \text{ Н}, \quad (1.6)$$

де f – коефіцієнт тертя матеріалу об бічну стінку (0,6...0,8).

Опір руху вантажної гілки пластинчастого живильника:

$$W_{вант} = P_y \cdot B + q_0 \cdot g \cdot L \cdot \omega = \\ = 8,927 \cdot 10^4 \cdot 0,419 + 10,474 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = \\ = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Н}, \quad (1.7)$$

де q_0 – маса 1 м довжини рушійного настилу, кг/м (обирається за довідковою літературою або з невеликою похибкою за залежністю $q_0 = 25B$, кг/м);

ω – коефіцієнт опору руху котків ланцюгів пластинчастого живильника по напрямних:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\omega = f_k + f_u \frac{d_u}{D_p} = 0,05 \cdot 10^{-2} + 0,03 \frac{0,01}{0,04} = 8 \cdot 10^{-3}, \quad (1.8)$$

де $f_k = 0,05 \dots 0,2 \cdot 10^{-2}$ – коефіцієнт тертя кочення коліс по напрямних;

$f_u = 0,03 \dots 0,06$ – коефіцієнт тертя в цапфах на підшипниках кочення;

d_u і D_p – діаметр цапфи і колеса-ролика відповідно, м (задається або вибирається за таблицями).

Опір руху холостої гілки:

$$W_n = q_0 \cdot g \cdot L \cdot \omega = 10,474 \cdot 9,81 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 4,11 \text{ Н}, \quad (1.9)$$

Опір від перегину ланцюгів на зірочках:

$$W_3 = 0,15 \cdot W_{вант} + W_n = 0,15 \cdot 1,5 \cdot 10^3 + 4,11 = 225,645 \text{ Н}, \quad (1.10)$$

Тягове зусилля на зірочках:

$$\begin{aligned} T &= F_1 + F_2 + W_{вант} + W_n + W_3 = \\ &= 1,569 \cdot 10^5 + 4,448 \cdot 10^4 + 1,5 \cdot 10^3 + 4,11 + 225,645 = \\ &= 2,031 \cdot 10^5 \text{ Н}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

Потужність двигуна приводу живильника:

$$P = \frac{T \cdot v_n}{1000 \cdot \eta_{пр}} = \frac{2,031 \cdot 10^5 \cdot 0,15}{1000 \cdot 0,93} = 32,764 \text{ кВт}, \quad (1.12)$$

де $\eta_{пр}$ – ККД приводу (0,85...0,9).

З [Ошибка! Источник ссылки не найден.] вибираємо двигун 1LE1603-2DD0 (див. табл. 1.1).

Табл. 1.1. Номінальні дані обраного для пластинчастого живильника електродвигуна

№	Характеристика	Значення	Одиниця вимірювання
1	ω_0	750	об/хв
2	$\omega_{ном}$	736	об/хв

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

3	$P_{ном}$	37	кВт
4	η	91,8	%
5	$\cos \varphi$	0,78	
6	I_1	75	А
7	U_1	400	В
8	Іп/Ін	5,4	
9	Мп/Мн	2,3	
10	Мм/Мн	2,4	
11	J	1,1	кг·м ²

Обчислимо параметри:

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 736}{60} = 77,074 \frac{рад}{с}, \quad (1.13)$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{37 \cdot 10^3}{77,074} = 480,06 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.14)$$

Висновки до розділу 1

У розділі 1 за номінальними характеристиками пластинчастого живильника ПП-1-15 обрахували потужність електродвигуна. Обрали електродвигун 1LE1603-2DD0 (виробництва Siemens), що задовольняє вимогам технологічного процесу дроблення руди до електроприводу пластинчастого живильника.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 2. Спеціальна частина

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Спеціальна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Коральов А.С.</i>					<i>Н</i>	<i>19</i>	<i>60</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Конс.</i>								
<i>Н.контр.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Пересунько І.І.</i>							
						<i>КНУ ЕЕМ-20</i>		

2.1 Розрахунок схеми заміщення двигуна пластинчастого живильника та побудова статичних характеристик

Визначимо параметри схеми заміщення 1LE1603-2DD0 (рис. 2.1).

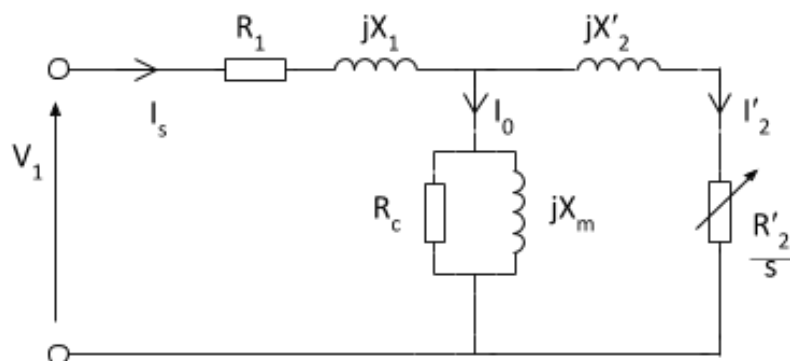


Рис. 2.1. Т-схема заміщення АД КЗ

$$U_{1\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,39 \text{ В.} \quad (2.1)$$

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{37 \cdot 10^3}{0,918} = 40,305 \text{ кВт.} \quad (2.2)$$

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{40,305 \cdot 10^3}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,78} = 78,51 \text{ А.} \quad (2.3)$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ном}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 736}{60} = 77,074 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.4)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 750}{30} = 78,54 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.5)$$

$$s_{\text{ном}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{ном}}}{\omega_0} = \frac{78,54 - 77,074}{78,54} = 0,0187. \quad (2.6)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{37 \cdot 10^3}{77,074} = 480,06 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.7)$$

Номінальні втрати потужності **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{37 \cdot 10^3 (1 - 0,918)}{0,918} = 3,305 \cdot 10^3 \text{ Вт.} \quad (2.8)$$

Механічні та додаткові втрати, що визначають момент холостого ходу двигуна [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\Delta P_{мех ном} = 0,02 \dots 0,15 \Delta P_{ном}; \quad \Delta P_{дод} = 0,01 \dots 0,05 \Delta P_{ном}; \quad (2.9)$$

$$\Delta P_{мех ном} = 0,1 \cdot \Delta P_{ном} = 0,1 \cdot 3,305 \cdot 10^3 = 330,5 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{дод} = 0,05 \cdot \Delta P_{ном} = 0,05 \cdot 3,305 \cdot 10^3 = 165,25 \text{ Вт.}$$

Момент холостого ходу [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$M_0 = \frac{\Delta P_{мех ном} + \Delta P_{дод}}{\omega_0} = \frac{330,5 + 165,25}{78,54} = 6,312 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.10)$$

Номинальний електромагнітний момент [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$M_{е ном} = M_{ном} + M_0 = 480,6 + 6,312 = 486,912 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.11)$$

Номинальні змінні втрати потужності в роторі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\begin{aligned} \Delta P_{зм ном} &= M_{е ном} \omega_0 s_{\min} = \\ &= 486,912 \cdot 78,54 \cdot 0,0187 = 713,032 \text{ Вт.} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Змінні номінальні втрати потужності:

$$\Delta P_{зм ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1 + k_{зм}^2} = \frac{3,305 \cdot 10^3}{1 + 0,5^2} = 2,644 \cdot 10^3 \text{ Вт,} \quad (2.13)$$

де $k_{зм}$ – коефіцієнт завантаження за максимальним ККД [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Постійні втрати потужності [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{зм ном} = 3,305 \cdot 10^3 - 2,644 \cdot 10^3 = 661 \text{ Вт.} \quad (2.14)$$

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Номинальні змінні втрати потужності у статорі [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\Delta P_{зм1ном} = \Delta P_{змном} - \Delta P_{зм2ном} = 2,644 \cdot 10^3 - 713,032 = 1,931 \cdot 10^3 \text{ Вт.} \quad (2.15)$$

Активний опір фази обмотки статора [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{зм1ном}}{3I_{ном}^2} = \frac{1,931 \cdot 10^3}{3 \cdot 78,51^2} = 0,104 \text{ Ом.} \quad (2.16)$$

Максимальний електромагнітний момент:

$$M_{e \max} = M_{\max} + M_0 = 1,152 \cdot 10^3 + 6,312 = 1,158 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.17)$$

де $M_{\max} = \lambda_{\max} \cdot M_{ном} = 2,4 \cdot 480,06 = 1,152 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Опір короткого замикання [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$Z = \frac{3}{2} \frac{U_{\phi ном}^2}{\omega_0 M_{e \max}} - R_1 = \frac{3 \cdot 219,39^2}{2 \cdot 78,54 \cdot 1,158 \cdot 10^3} - 0,104 = 0,689 \text{ Ом.} \quad (2.18)$$

Приведений активний опір фази ротора [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\begin{aligned} R'_2 &= \frac{1}{2} s_{ном} b + \sqrt{b^2 - 4Z^2} = \\ &= \frac{1}{2} 0,0187 \cdot 3,571 + \sqrt{3,571^2 - 4 \cdot 0,689^2} = 0,064 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.19)$$

де $b = \frac{3U_{\phi ном}^2}{\Delta P_{зм2ном}} s_{ном} - 2R_1 = \frac{3 \cdot 219,39^2}{713,032} 0,0187 - 2 \cdot 0,104 = 3,571.$

Індуктивність короткого замикання [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z^2 - R_1^2} = \sqrt{0,689^2 - 0,104^2} = 0,681 \text{ Ом.}$$

Критичне ковзання:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$s_{\max} = s_{\text{ном}} \lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1} = 0,0187 \cdot 2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1} = 0,0855. \quad (2.20)$$

Побудуємо природну механічну характеристику $s = f M$ асинхронного двигуна 1LE1603-2DD0 приводу пластинчастого живильника (рис. 2.2):

$$M \ s = \frac{m U_{1\phi}^2 R'_{2\text{ном}}}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2\text{ном}}}{s} \right) + X_k^2 \right]}. \quad (2.21)$$

Побудуємо природну електромеханічну характеристику $s = f I'_2$ електродвигуна 1LE1603-2DD0 приводу пластинчастого живильника (рис. 2.3):

$$I'_2 \ s = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\text{ном}}}{s} \right)^2 + X_k^2}}. \quad (2.22)$$

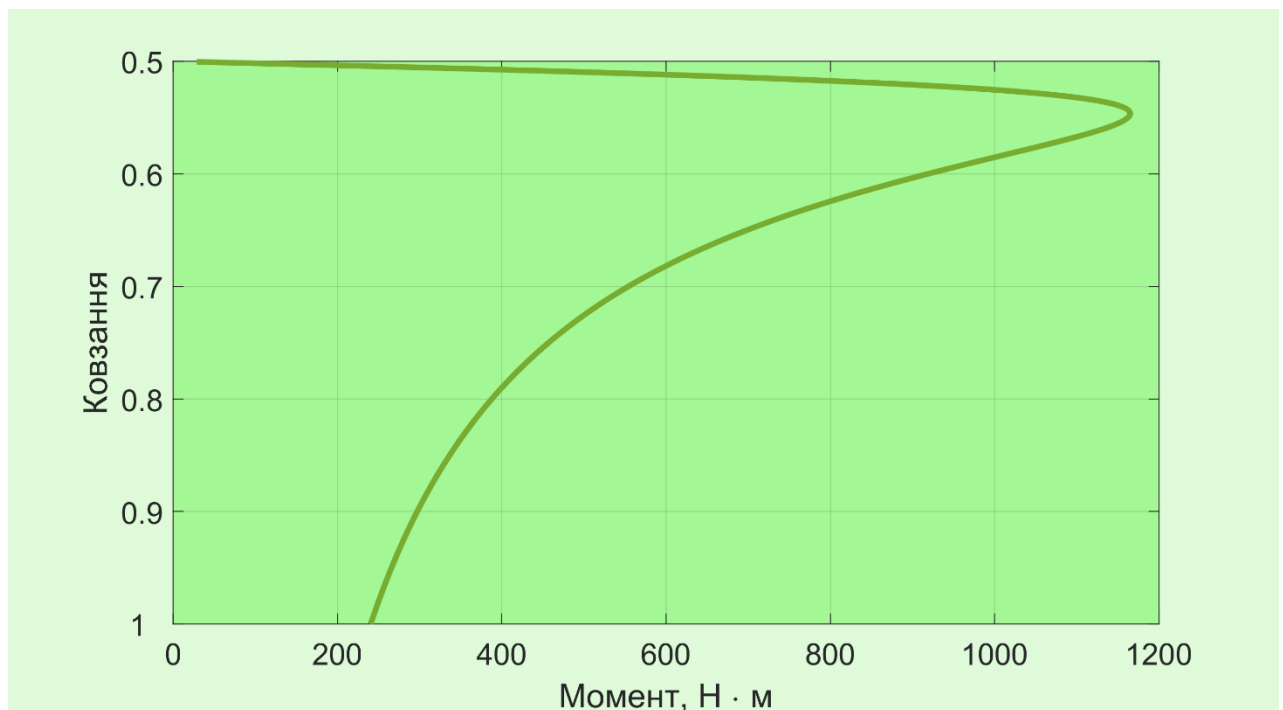


Рис. 2.2. Природна механічна характеристика двигуна 1LE1603-2DD0

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

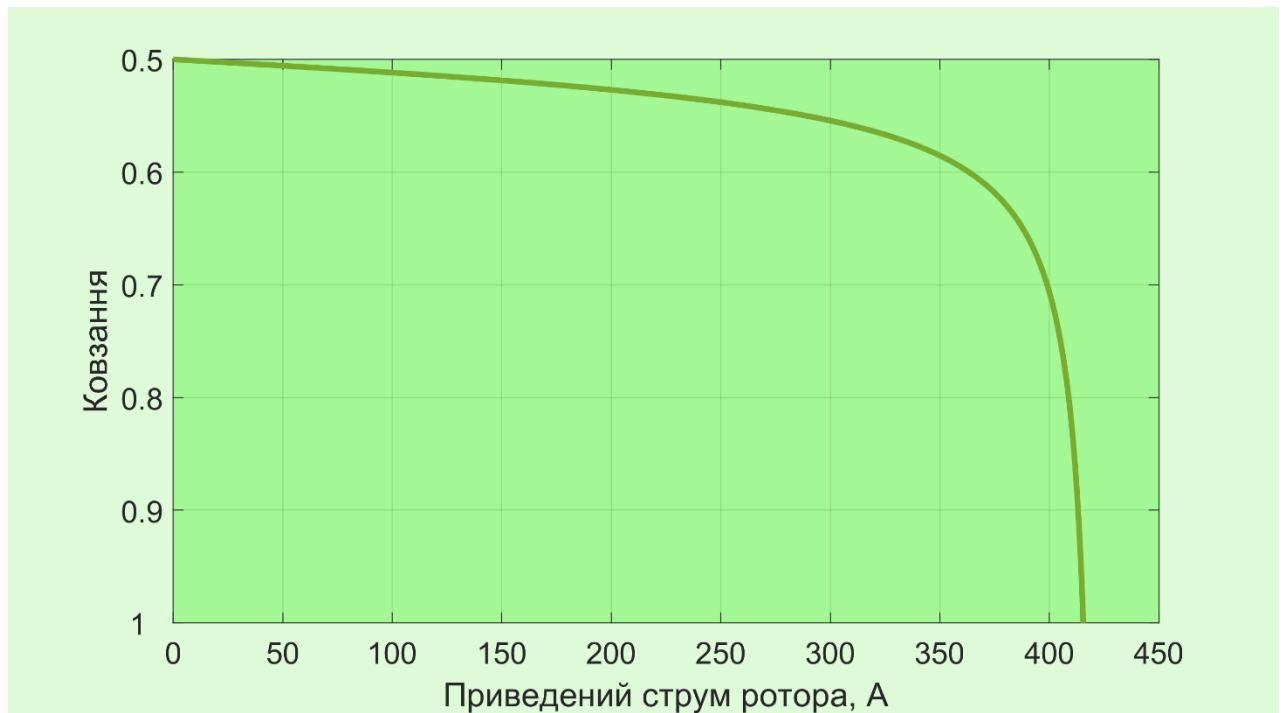


Рис. 2.3. Природна електромеханічна характеристика двигуна 1LE1603-2DD0

Як видно з наведених графіків, при пуску АД шляхом безпосереднього підключення його обмотки статора до джерела номінальної напруги при частоті живлення 50 Гц, значення пускового струму і електромагнітного моменту незадовільні. Розглянемо статичні характеристики електродвигуна при частотному регулюванні.

2.2 Статичні характеристики асинхронного двигуна пластинчастого живильника при частотному регулюванні

Частотне регулювання швидкості АД можливе завдяки такому факту, що швидкість електромагнітного поля статора знаходиться в пропорційності до частоти [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

При зміні цієї частоти міняється і потік двигуна. Отже одночасно з частотою треба регулювати амплітуду статорної напруги [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

$$\Phi_1 \approx \frac{U_1}{k \cdot f_1}. \quad (2.23)$$

Відносне ковзання s_i знаходиться в залежності від частоти напруги живлення:

$$\frac{f_{1i}}{f_{ном}} = f_1', \quad (2.24)$$

де f_{1i} – частота напруги статора;

$f_{ном}$ – номінальна частота статора [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Проаналізуємо електромеханічні характеристики електроприводу застосувавши Т-схему заміщення (рис. 2.1).

Реактивні опори АД знаходяться в залежності від частоти:

$$\begin{aligned} x_{1i} &= x_{1ном} f_1'; \\ x_2' &= x_{2ном}' f_1'; \\ x_{\mu i} &= x_{\mu ном} f_1'; \\ x_k &= x_{к ном} f_1', \end{aligned} \quad (2.25)$$

де $x_{1ном}$, $x_{\mu ном}$, $x_{2ном}'$, $x_{к ном}$ – індуктивний опір статора, контуру намагнічування і короткого замикання [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Потужність ковзання ротора витрачається на нагрівання його обмоток [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$P = M \omega_{0i} s_i = 3 I_2'^2 R_2', \quad (2.26)$$

звідки

$$M = \frac{3 I_2'^2 R_2'}{\omega_{0i} s_i} \quad (2.27)$$

Враховуючи, що $x_{1ном}/x_{\mu ном} \ll 1$ і $x_{2ном}'/x_{\mu ном} \ll 1$, то ними можна знехтувати, тоді:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$I_2' s_i = \frac{U_{1i}}{\sqrt{x_{\kappa \text{ ном}}^2 f_1'^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_i}\right)^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s_i x_{\mu \text{ ном}} f_1'}\right)^2}}. \quad (2.28)$$

Формула для розрахунку механічних характеристик при змінній частоті напруги живлення:

$$M s_i = \frac{3U_{1i}^2 R_2'}{\omega_{0i} s_i \left(x_{\kappa \text{ ном}}^2 f_1'^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_i}\right)^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s_i x_{\mu \text{ ном}} f_1'}\right)^2 \right)}.$$

Щоб підтримувати сталим максимальний момент, то напруга статора змінюється так **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**:

$$\frac{U_1'}{f_1'} = const, \text{ де } U_1' = \frac{U_{1i}}{U_{1 \text{ ном}}}.$$

Механічні і електромеханічні характеристики при частотному регулюванні показані на рис. 2.4 і 2.5.

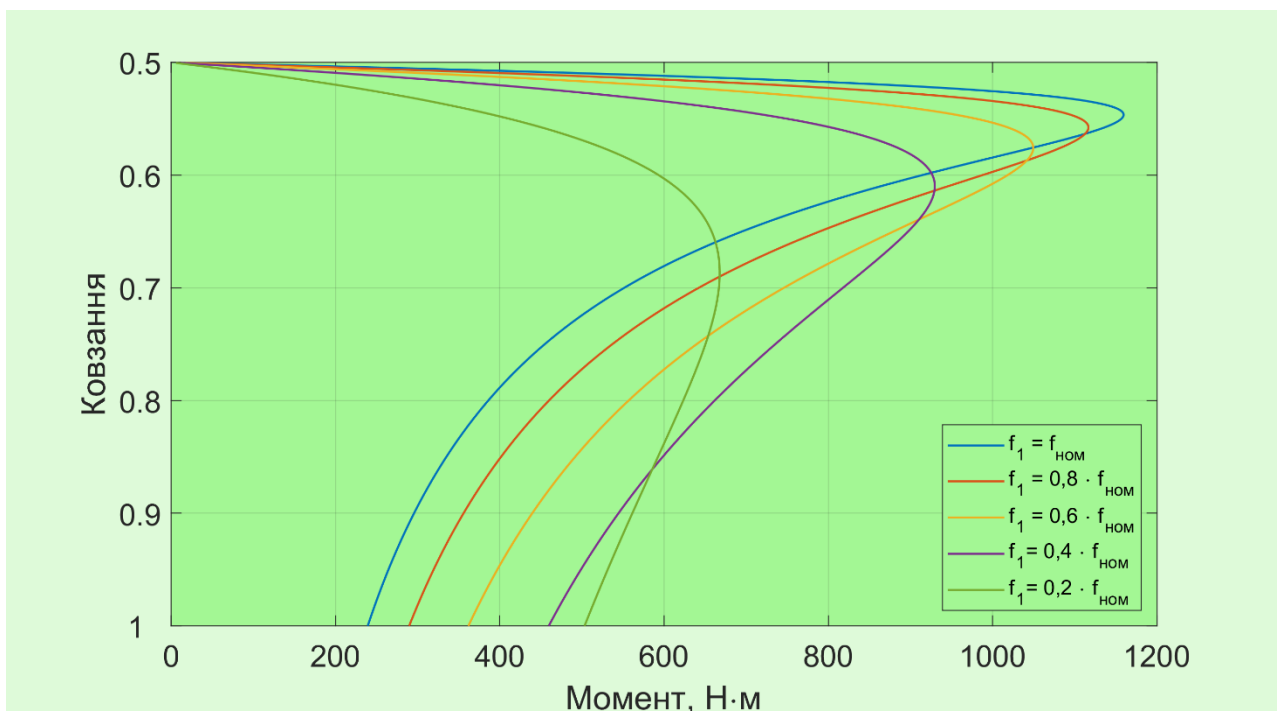


Рис. 2.4. Штучні механічні характеристики двигуна 1LE1603-2DD0 при частотному регулюванні

Для двигуна 1LE1603-2DD0 при зниженні частоти падіння напруги на R_1 велике, потік двигуна спадає і відповідно спадає максимальний момент (див. рис. 2.4).

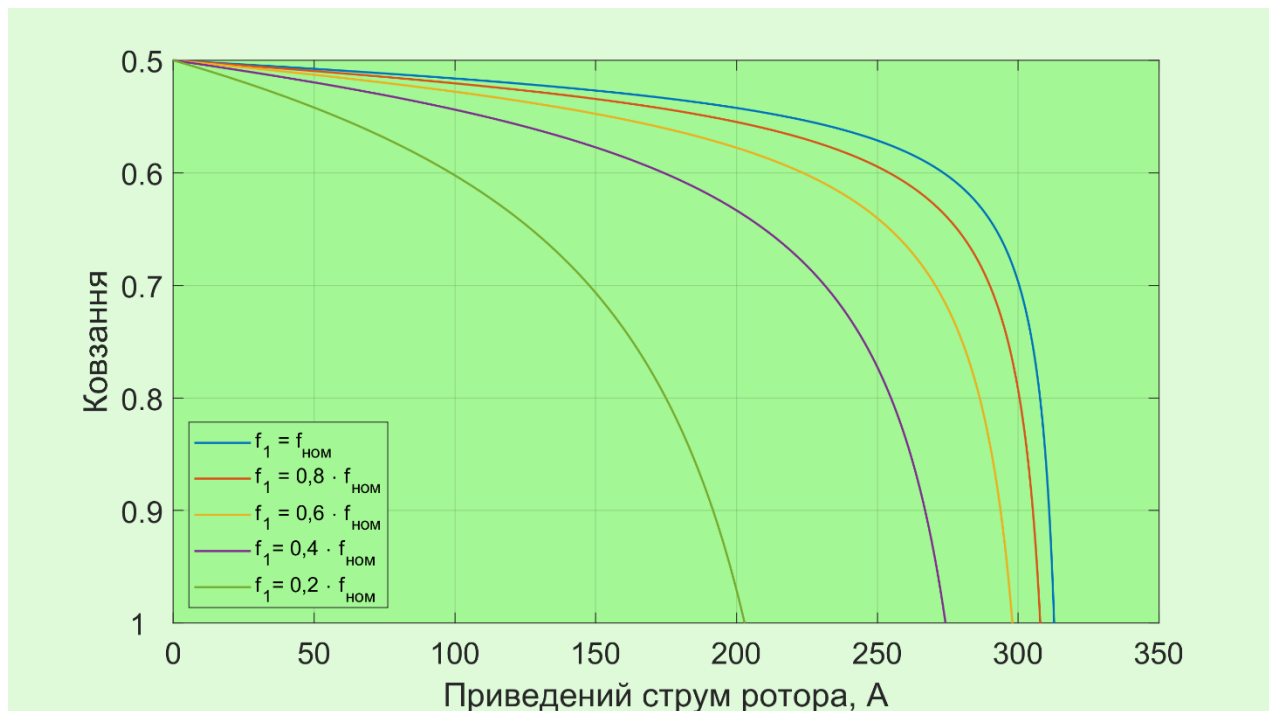


Рис. 2.5. Штучні електромеханічні характеристики двигуна 1LE1603-2DD0 при частотному регулюванні

Для того щоб керувати кутовою швидкістю двигуна, зберігаючи критичний момент сталим напругу треба зменшувати не так сильно як частоту [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$U_1 \approx U_{1ном} f_1' + I_{1ном} R_1 (1 - f_1') \quad (2.29)$$

Такий спосіб регулювання напруги називають пропорційним I_r регулюванням.

2.3 Математична модель асинхронного двигуна

2.3.1 Виведення рівнянь трифазної індукційної машини

Схема з'єднання обмоток двополюсної трифазної асинхронної машини показана на рис. 2.6. Обмотки статора ідентичні, синусоїдально розподілені в просторі зі зсувом фаз 120 ел. град., з N_s еквівалентними витками і опором r_s .

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Ротор вважається симетричним з трьома фазними обмотками, зсунутими у просторі на кут 120° , з N_r ефективними витками і опором r_r .

Вирази (2.30) – (2.35) це рівняння напруги для статора і ротора.

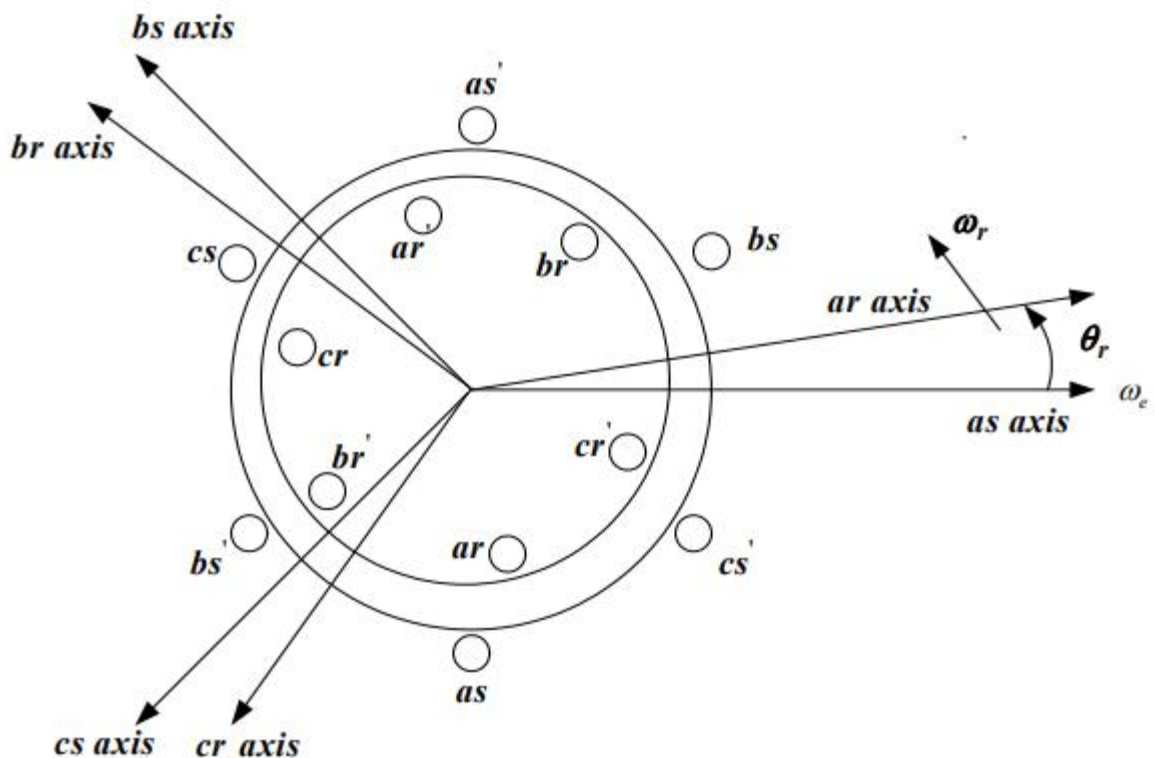


Рис. 2.6. Двополюсна трифазна симетрична асинхронна машина

Для статора

$$U_{as} = r_s I_{as} + p \psi_{as}; \quad (2.30)$$

$$U_{bs} = r_s I_{bs} + p \psi_{bs}; \quad (2.31)$$

$$U_{cs} = r_s I_{cs} + p \psi_{cs}, \quad (2.32)$$

де U_{as} , U_{bs} і U_{cs} – трифазні збалансовані напруги, які обертаються з частотою живлення.

Потокозчеплення ротора обертаються зі швидкістю ротора ω_r :

$$U_{ar} = r_r I_{ar} + p \psi_{ar}; \quad (2.33)$$

$$U_{br} = r_r I_{br} + p \psi_{br}; \quad (2.34)$$

$$U_{cs} = r_s I_{cs} + p\psi_{cs}. \quad (2.35)$$

Наведені вище рівняння можна записати коротко:

$$\begin{aligned} U_{abcs} &= r_s I_{abcs} + p\psi_{abcs}; \\ U_{abcr} &= r_r I_{abcr} + p\psi_{abcr}, \end{aligned} \quad (2.36)$$

де

$$U_{abcs}^T = U_{as} \quad U_{bs} \quad U_{cs}, \quad (2.37)$$

$$U_{abcr}^T = U_{ar} \quad U_{br} \quad U_{cr}. \quad (2.38)$$

У наведених вище двох рівняннях індекс «s» позначає змінні і параметри, пов'язані з колами статора, а індекс «r» позначає змінні і параметри, пов'язані з колами ротора. Обидві r_s і r_r є діагональними матрицями, кожна з яких має однакову кількість ненульових елементів.

Для магнітно-лінійної системи потокозчеплення:

$$\begin{bmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{sr}^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Індуктивності обмоток [16]:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix}; \quad (2.40)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix}; \quad (2.41)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

У наведених вище рівняннях індуктивності L_{ls} і L_m – це індуктивності витoku і намагнічування обмоток статора; L_{lr} і L_m – для обмоток ротора. Індуктивність L_{sr} – це амплітуда взаємних індуктивностей між обмотками статора і ротора.

З наведених вище рівнянь індуктивності видно, що індуктивності машини є функціями швидкості обертання ротора, тому коефіцієнти диференціальних рівнянь, які описують поведінку цих машин, змінюються в часі, за винятком випадків, коли ротор перебуває в стані спокою. Зміна змінних часто використовується для зменшення складності цих диференціальних рівнянь, що призводить до виникнення теорії системи відліку [16]. Для асинхронної машини в умовах збалансованої роботи використовується синхронна система відліку перетворення, в якій система відліку обертається з тією ж частотою, що і частота живлення ω_e . Матриця перетворення, що використовується для перетворення синхронної системи відліку, має вигляд:

$$K_s \theta_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta_s & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

де $\theta_s = \int \omega_s t + \theta_{s0}$, θ_{s0} – початковий кут системи відліку.

Обернене перетворення для наведеного вище:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$K_s \theta_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \sin \theta_s & 1 \\ \sin \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.44)$$

Нові змінні після перетворення пов'язані з початковими змінними

$$f_{dq0} = K_s \theta_s f_{abc}, \quad (2.45)$$

де f це може бути напруга, струм, потік або будь-що інше.

Для рівнянь (2.36) після перетворення до синхронної системи відліку ці рівняння набувають вигляду

$$\begin{aligned} U_{qs} &= r_s i_{qs} + p\psi_{qs} + \omega_e \psi_{ds}; \\ U_{ds} &= r_s i_{ds} + p\psi_{ds} - \omega_e \psi_{qs}; \\ U_{0s} &= r_s i_{0s} + p\psi_{0s}; \\ U_{qr} &= r_r i_{qr} + p\psi_{qr} + \omega_e - \omega_r \psi_{dr}; \\ U_{dr} &= r_r i_{dr} + p\psi_{dr} - \omega_e - \omega_r \psi_{qr}; \\ U_{0r} &= r_s i_{0r} + p\psi_{0r}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

де $U_{qs}, I_{qs}, \psi_{qs}$ – компоненти осі q;

$U_{ds}, I_{ds}, \psi_{ds}$ – компоненти осі d;

$U_{0s}, I_{0s}, \psi_{0s}$ – належать до осі 0 і зазвичай представляють небаланси в системі.

У випадку збалансованих напруг струми, напруги та потоки нульової осі дорівнюють нулю за нормальних умов експлуатації. Рівняння (2.39), виражені у змінних abc дають рівняння потокозчеплення для магнітно-лінійної системи:

$$\begin{bmatrix} \psi_{dq0s} \\ \psi_{dq0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s & K_s^{-1} & K_s L_{sr} & K_s^{-1} \\ K_s L_{sr} & K_s^{-1} & K_s L_r & K_s^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dq0s} \\ I_{dq0r} \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

де L_s, L_r, L_{sr} як визначено у рівняннях (2.40)–(2.42).

Оцінюючи кожен член в матриці рівняння (2.47):

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$K_s L_s K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix}; \quad (2.48)$$

$$K_s L_r K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_{lr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix}; \quad (2.49)$$

$$K_s L_{sr} K_s^{-1} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m \end{bmatrix}. \quad (2.50)$$

З урахуванням потокозчеплення:

$$\begin{aligned} \psi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr}; \\ \psi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr}; \\ \psi_{0s} &= L_{ls} i_{0s}; \\ \psi_{qr} &= L_r i_{qr} + L_m i_{qs}; \\ \psi_{dr} &= L_r i_{dr} + L_m i_{ds}; \\ \psi_{0r} &= L_{lr} i_{0r}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Вираз для електромагнітного моменту в термінах змінних системи відліку:

$$M_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left[K_s^{-1} i_{dq0s} \right] M \frac{\partial}{\partial \theta_r} L_{sr} K_s^{-1} i_{dq0r}. \quad (2.52)$$

Вираз для крутного моменту в рівнянні (2.50) можна виразити в враховуючи струми:

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}). \quad (2.53)$$

Альтернативні вирази для моменту, що може бути виражений через потокозчеплення:

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\psi_{qr} i_{dr} - \psi_{dr} i_{qr}); \quad (2.54)$$

$$M_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} . \quad (2.55)$$

Вираз для швидкості ротора через крутний момент:

$$p\omega_r = \frac{P}{2} M_e - M_L \frac{1}{J}, \quad (2.56)$$

де M_e, M_L – електромагнітний момент і момент навантаження, відповідно.

Залежно від моменту навантаження двигун працює зі швидкістю, яка завжди менша за кутову частоту, з якою він збуджується. Для роботи асинхронної машини момент навантаження повинен бути позитивним.

2.3.2 Еквівалентна схема асинхронної машини

Еквівалентна схема асинхронної машини корисна, коли двигун зупиняється на номінальній швидкості. Еквівалентна схема машини у змінних системі відліку формується за допомогою рівнянь з 3.20 по 3.25.

Еквівалентна схема для статора показана на рис. 2.7, а для ротора – на рис. 2.8.

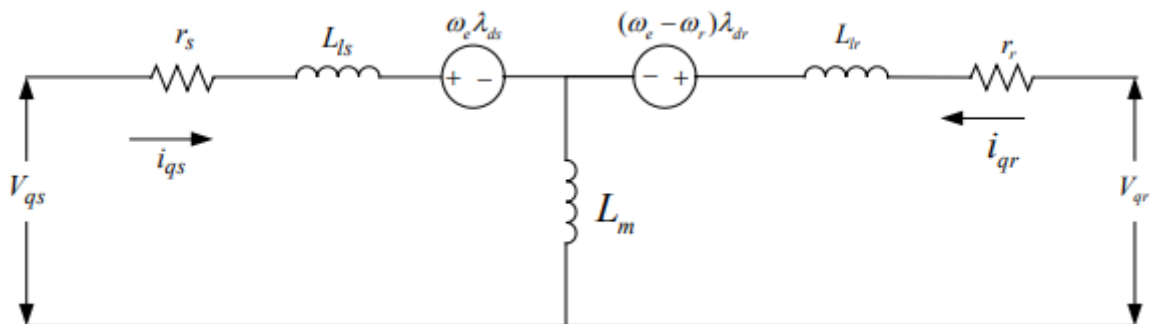


Рис. 2.7. Еквівалентна схема 3-фазної симетричної асинхронної машини в довільній системі відліку в q-змінних

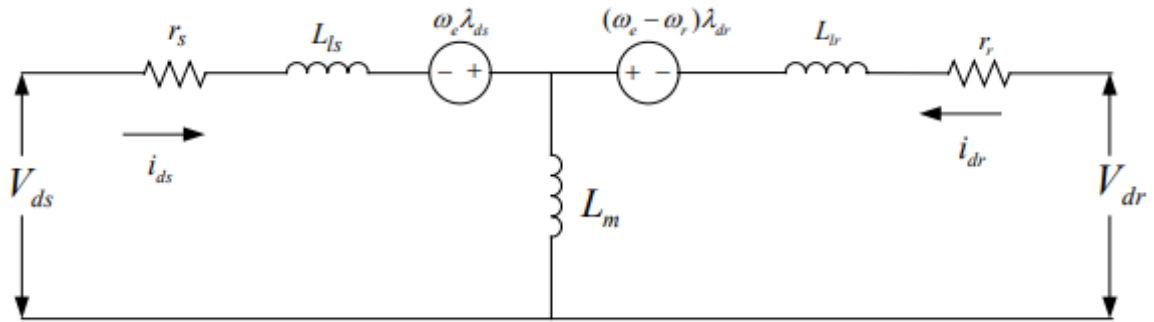


Рис. 2.8. Еквівалентна схема в довільній системі відліку для 3-фазної симетричної асинхронної машини в d-змінних

Змінні асинхронної машини під час вільного прискорення або на холостому ходу спостерігаються, що дає більш глибоке розуміння того, як працює машина. Використовуються нелінійні диференціальні рівняння (2.46). Машина моделюється з потоком або струмами як змінними стану. При виборі потоку як змінної стану рівняння є менш складними, тому спочатку вибирається потік як змінна стану, а потім з рівнянь для потоку отримуються рівняння для струмів.

Рівняння для комп'ютерного моделювання з використанням потокозчеплень, тобто $\psi_{qs}, \psi_{ds}, \psi_{qr}, \psi_{dr}$:

$$\begin{aligned}
 p\psi_{qs} &= U_{qs} - \frac{r_s L_r}{K} \psi_{qs} - \omega \psi_{ds} + \frac{r_s L_m}{K} \psi_{qr}; \\
 p\psi_{ds} &= U_{ds} - \frac{r_s L_r}{K} \psi_{ds} - \omega \psi_{qs} + \frac{r_r L_m}{K} \psi_{dr}; \\
 p\psi_{qr} &= U_{qr} - \frac{r_r L_s}{K} \psi_{qr} + \frac{r_r L_m}{K} \psi_{qs} - (\omega - \omega_r) \psi_{dr}; \\
 p\psi_{dr} &= U_{dr} - \frac{r_r L_s}{K} \psi_{dr} + \frac{r_r L_m}{K} \psi_{ds} - (\omega - \omega_r) \psi_{qr}; \\
 M_e &= \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{PL_m}{L_r}\right) \psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}; \\
 p\omega_r &= \frac{P}{2} M_e - M_L \frac{1}{J}; \\
 K &= L_s L_r - L_m^2.
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

де ω – частота обертання системи відліку, ω може бути будь-якою системою відліку, це може бути синхронна ($\omega = \omega_e$), роторна ($\omega = \omega_r$) або система відліку статора ($\omega = 0$), залежно від того, яка система відліку спростить аналіз. Оскільки асинхронна машина є симетричною як щодо статора, так і щодо ротора, тобто статор і ротор мають однаковий тип обмоток, вибір будь-якої системи відліку не матиме ніякого значення для спрощення аналізу.

Після розв'язання виразів з них отримаємо струми:

$$\begin{aligned} i_{qs} &= \frac{1}{K} L_r \psi_{qs} - L_m \psi_{qr} ; \\ i_{ds} &= \frac{1}{K} L_r \psi_{ds} - L_m \psi_{dr} ; \\ i_{qr} &= \frac{1}{K} L_s \psi_{qr} - L_m \psi_{qs} ; \\ i_{dr} &= \frac{1}{K} L_s \psi_{dr} - L_m \psi_{ds} . \end{aligned} \quad (2.58)$$

Модель асинхронного двигуна привода пластинчастого живильника визначена наступними формулами, які виходять зі схеми узагальненої електричної машини:

$$\begin{aligned} U_A &= R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \quad U_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \\ U_B &= R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \quad U_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, \\ U_C &= R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \quad U_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}. \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c, \\ \Psi_B &= L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c, \\ \Psi_C &= L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c. \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a &= L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c, \\ \Psi_b &= L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c, \\ \Psi_c &= L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c. \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \quad (2.62)$$

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$M = k \bar{\Psi} \cdot \bar{i} . \quad (2.63)$$

Спростуємо модель просторовим вектором:

$$\bar{i} = 2/3 i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C \quad (2.64)$$

де $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$.

$$\bar{i}_S = \frac{2}{3} \cdot I_m \left(\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t} . \quad (2.65)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} \\ \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} \\ \bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m \theta \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= L_m \theta \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R \end{aligned} \right\} , \quad (2.66)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_S \\ \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot \omega_k - \omega \cdot \bar{\Psi}_R \\ \bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= L_m \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R \end{aligned} \right\} , \quad (2.67)$$

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p \cdot L_m \cdot \text{Mod } \bar{i}_S \times \bar{i}_R \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot \text{Mod } \bar{\Psi}_S \times \bar{i}_S \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot \text{Mod } \bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S \end{aligned} \right\} \quad (2.68)$$

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_1, I_b = \sqrt{2} \cdot I_1, \omega_b = \omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1. \quad (2.69)$$

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, L_b = \frac{U_b}{\omega_b I_b}, \Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{U_b \cdot I_b}{\omega_b}, t_b = \frac{1}{\omega_b}. \quad (2.70)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\Psi}_S \\
 \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k - p \cdot \nu \cdot \bar{\Psi}_R \\
 \bar{\Psi}_S &= X_S \bar{i}_S + X_m \bar{i}_R \\
 \bar{\Psi}_R &= X_m \bar{i}_S + X_R \bar{i}_R \\
 \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} (2.71)$$

Змінні і параметри у в.о.: $\bar{u} = \frac{\bar{u}}{U_b}$, $\bar{i} = \frac{\bar{i}}{I_b}$, $\bar{\Psi} = \frac{\bar{\Psi}}{\Psi_b}$ $\alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}$, $\nu = \frac{\omega_m}{\omega_b}$ $m = \frac{M}{M_b}$,

$$r_S = \frac{R_S}{R_b}, r_R = \frac{R_R}{R_b}, X_S = \frac{\omega_b L_S}{R_b}, X_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b}, X_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}, \bar{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b} \quad \text{[Ошибка! Источник}$$

ссылки не найден.]

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\Psi}_S \\
 0 &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k - p \cdot \nu \cdot \bar{\Psi}_R \\
 \bar{\Psi}_S &= X_S \bar{i}_S + X_m \bar{i}_R \\
 \bar{\Psi}_R &= X_m \bar{i}_S + X_R \bar{i}_R \\
 m &= k \cdot \text{Mod } \bar{\Psi}_i \times \bar{i}_j \\
 \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} (2.72)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{U}_S &= r \cdot \bar{i}_S + X'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot X'_S \cdot \bar{i}_S - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_r + j \cdot k_R p \cdot \nu \cdot \bar{\Psi}_r \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot \bar{i}_S + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \bar{\Psi}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot \alpha_k - p \cdot \nu \cdot \bar{\Psi}_R \\
 m &= k_R \cdot \text{Mod } \bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S \\
 \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} (2.73)$$

де $r = r_S + k_R^2 \cdot r_R$, $X'_S = \left(X_S - \frac{X_m^2}{X_R} \right)$, $k_R = \frac{X_m}{X_R}$, $\bar{T}_r = \frac{X_R}{r_R}$.

$$\left. \begin{aligned}
 U_{S\alpha} &= r \cdot i_{S\alpha} + X'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 U_{S\beta} &= r \cdot i_{S\beta} + X'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 m &= k_R \cdot \Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha} \\
 \bar{T}_m \frac{dv}{dt} &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} (2.74)$$

$$\left. \begin{aligned}
 U_{S\alpha} &= r \cdot 1 + \bar{T}'_S \cdot p \cdot i_{S\alpha} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 U_{S\beta} &= r \cdot 1 + \bar{T}'_S \cdot p \cdot i_{S\beta} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{\bar{T}_r} \cdot 1 + \bar{T}_R \cdot p \cdot \Psi_{R\alpha} + p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot 1 + \bar{T}_R \cdot p \cdot \Psi_{R\beta} - p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 m &= k_R \cdot \Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha} \\
 \bar{T}_m \cdot p \cdot v &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} (2.75)$$

де $\bar{T}'_S = \frac{X'_S}{r}$.

Структурна схема, побудована з використанням системи рівнянь (2.75), представлена на рис. 2.9 [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

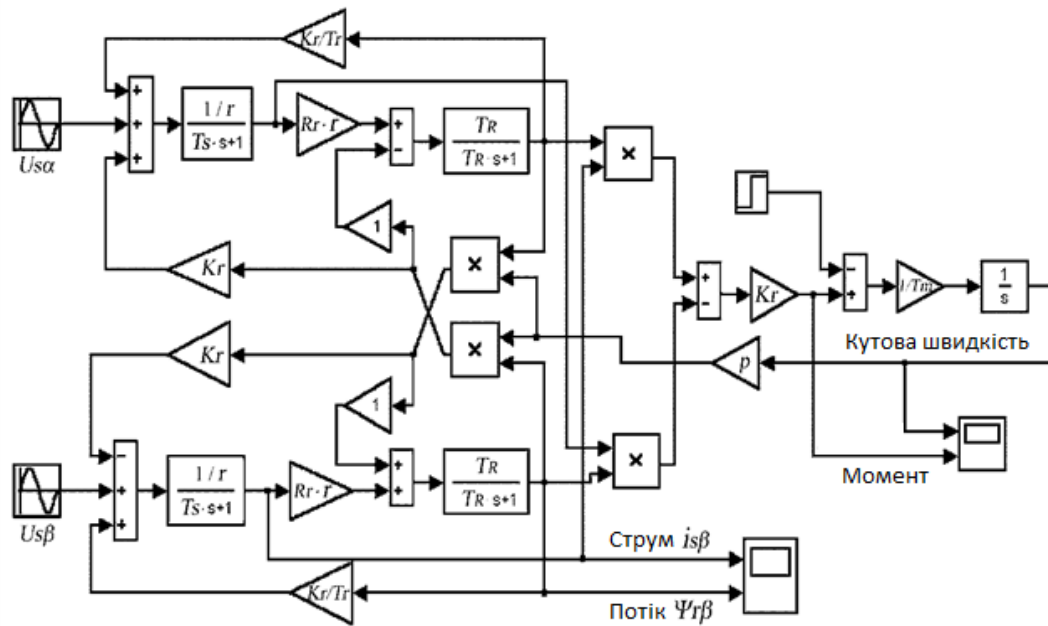


Рис. 2.9. Модель прямого пуску асинхронного двигуна пластинчастого живильника

Асинхронна машина 1LE1603-2DD0 змодельована за допомогою Matlab/Simulink. Характеристики розгону зображено на рис. 2.11 – рис. 2.12, де показано момент і частоту обертання ротора. На 1 секунді до машини було прикладено номінальне навантаження приблизно. Перехідні процеси при роботі двигуна отримані на частотах напруги живлення $f_{ном}$, $0,8f_{ном}$, $0,6f_{ном}$.

При 50 Гц видно (рис. 2.11), без навантаження швидкість зростає до значення холостого ходу 750 рад/с, а з 1 секунди спадає до номінального 736 рад/с.

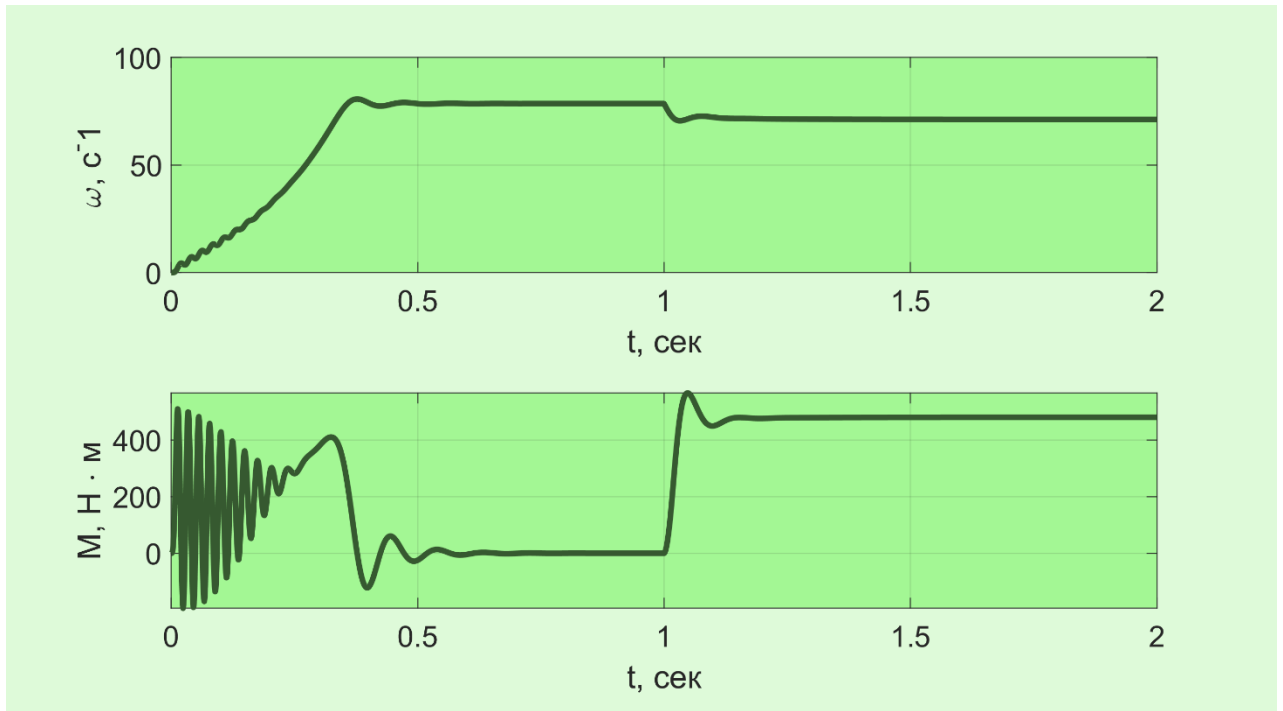


Рис. 2.10. Перехідні процеси в електродвигуні пластинчастого живильника при частоті напруги живлення $f_{ном} = 50 \text{ Гц}$

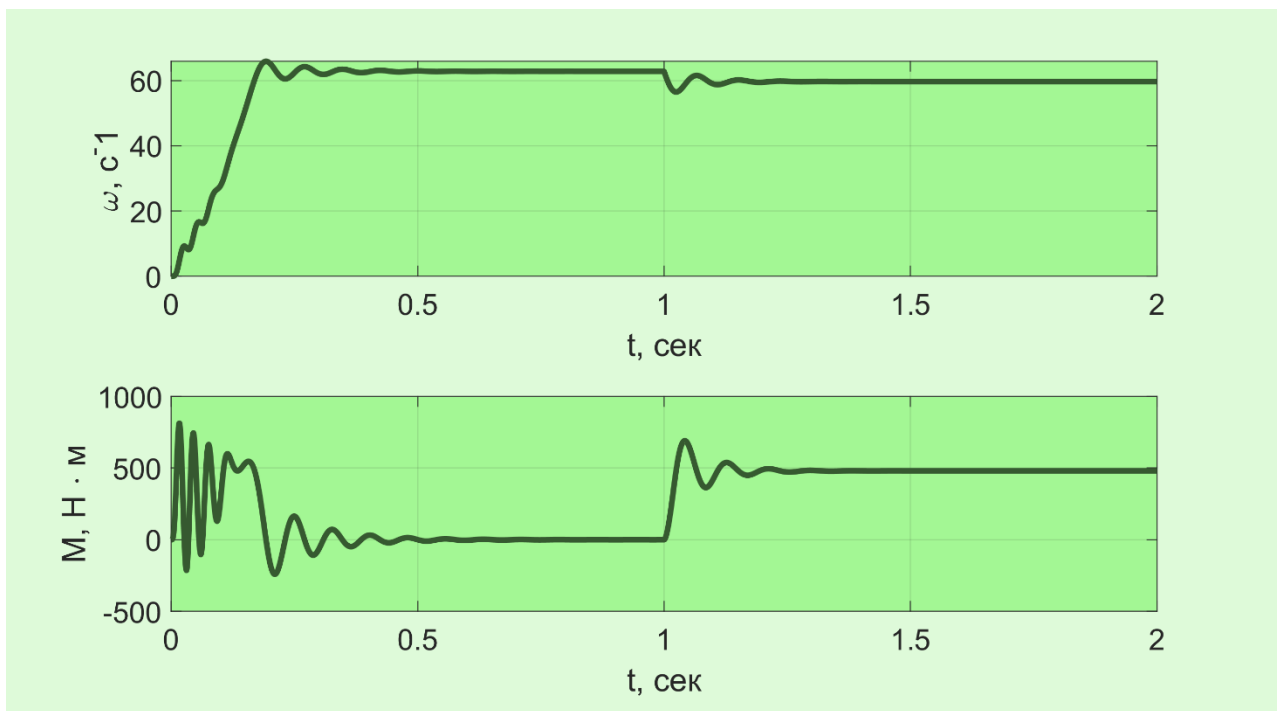


Рис. 2.11. Перехідні процеси в електродвигуні пластинчастого живильника при частоті напруги живлення $0,8f_{ном} = 40 \text{ Гц}$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

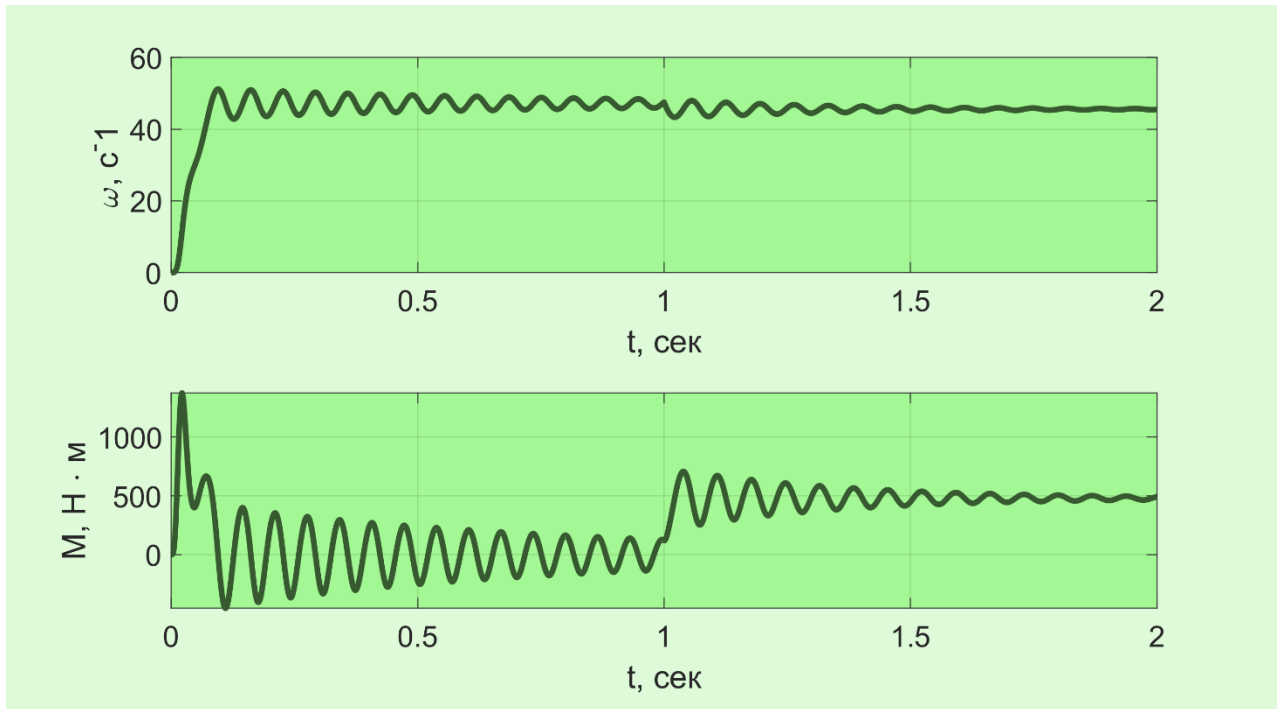


Рис. 2.12. Перехідні процеси в електродвигуні пластинчастого живильника при частоті напруги живлення $0,6f_{ном} = 30 \text{ Гц}$

При зниженні частоти напруги живлення спостерігається підвищення коливальності в перехідних процесах. Також при накиданні навантаження на 1 секунді відбувається просадження кутової швидкості, тому необхідно розробити систему керування з прямим керуванням моментом.

Висновки до розділу 2

У розділі 2 за характеристиками електродвигуна пластинчастого живильника обчислили номінали активних і реактивних опорів Т-подібної схеми заміщення АД і побудували природні (самого АД) та штучні (в системі ПЧ-АД) статичні характеристики: механічні та електромеханічні. Визначили, що в системі електроприводу ПЧ-АД з електродвигуном 1LE1603-2DD0 і законі регулювання $U/f = \text{const}$ треба застосовувати Ir-компенсацію. Створили в MATLAB модель АД і, використавши різні частоти напруги статора побудували графіки перехідних процесів.

Розділ 3. Проектно-конструкторська розробка

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Проектно-конструкторська розробка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Коральов А.С.</i>					<i>Н</i>	<i>42</i>	<i>60</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Конс.</i>								
<i>Н.контр.</i>	<i>Михайленко О.Ю.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Пересунько І.І.</i>							
						<i>КНУ ЕЕМ-20</i>		

3.1 Принципи побудови системи прямого керування моментом

Пряме керування моментом (DTC) – це метод векторного керування двигуном, який реалізує регулювання швидкості двигуна шляхом прямого керування потоком і моментом двигуна. Структурна схема керування асинхронним двигуном за цим методом наведена на рис. 3.1. На відміну від керування полем (FOC), яке управляє струмами двигуна по осях d і q , алгоритм DTC оцінює значення крутного моменту і потоку на основі положення двигуна та його струмів. Потім він використовує ПІ-регулятори для керування моментом і потоком двигуна, щоб зрештою генерувати оптимальну напругу, яка запускає двигун.

Головною перевагою цього приводу в порівнянні з іншими скалярно-керуваними приводами є покращена динамічна реакція. Цей привід може зменшити вплив зміни крутного моменту на потік i , навпаки, завдяки оптимальній комутаційній таблиці. Тому цей привід менш чутливий до властивого ефекту зчеплення (між крутним моментом і потоком), який присутній у машині. Однак цей привід вимагає аналогової обробки сигналів, як у приводів з векторним керуванням, що ускладнює його реалізацію порівняно з приводами з контрольованими за законом $U/f = const$.

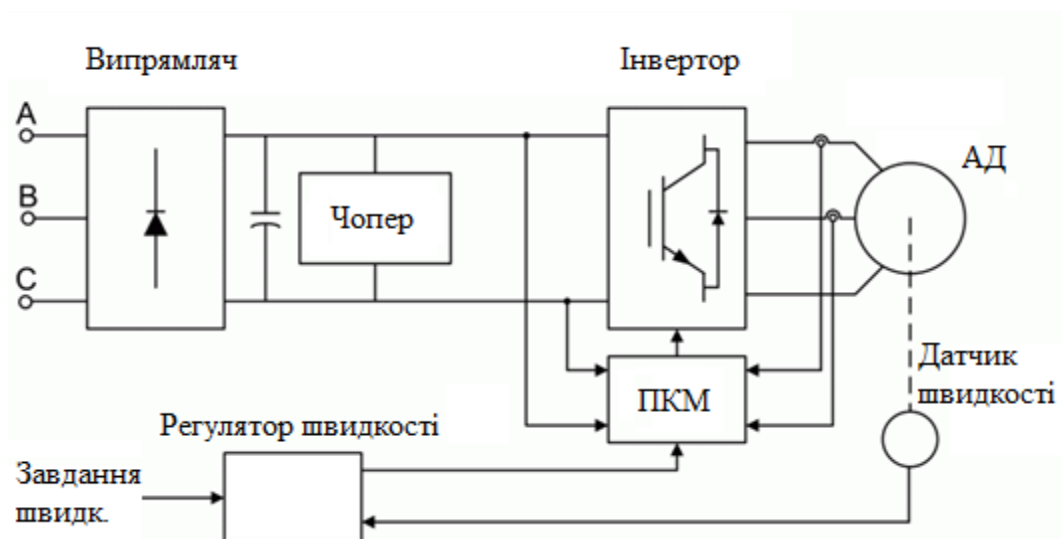


Рис. 3.1. Структурна схема моделі системи електроприводу з прямим керуванням моментом [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Motor Control Blockset™ використовує варіант просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції DTC (DTC-SVPWM) для керування асинхронним двигуном. Метод використовує просторово-векторну модуляцію (SVM) для створення робочих циклів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які використовуються інвертором для генерування трифазної напруги, що забезпечує роботу АД.

Алгоритм DTC-SVPWM оцінює значення крутного моменту та потоку двигуна, використовуючи зворотний зв'язок за струмом (в системі відліку α - β) від двигуна. Алгоритм використовує зворотний зв'язок за швидкістю двигуна для обчислення опорного значення потоку. ПІ-регулятор швидкості (частина зовнішнього контуру керування) використовує вхідний сигнал помилки швидкості для обчислення опорного значення моменту. ПІ-регулятори потоку і моменту (частина внутрішнього контуру керування) використовують ці опорні значення потоку і моменту та значення зворотного зв'язку потоку і моменту для обчислення опорних напруг на осях d і q . Алгоритм використовує блок PWM Reference Generator для генерації робочих циклів ШІМ (з використанням SVM) з цих опорних напруг.

Ви можете визначити поточне положення ротора, використовуючи як сенсорний, так і безсенсорний підходи.

3.2 Оцінка потоку та крутного моменту при прямому керуванні моментом

Алгоритм DTC-SVPWM, що використовується в Motor Control Blockset, використовує ці рівняння перехідної моделі машини для оцінки потоку і моменту.

Ці рівняння описують оцінку потоку на основі струмів у системі відліку α - β та положення ротора:

$$\psi_{\alpha} = L_s \cdot i_{\alpha} + \psi_{PM} \cos \theta;$$

$$\psi_{\beta} = L_s \cdot i_{\beta} + \psi_{PM} \sin \theta;$$

$$\psi = \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2}.$$

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Ці рівняння описують обчислення потоку для кожної одиниці (в.о.):

$$\psi_{\alpha}^{6.o.} = \omega_{\delta} L_s^{6.o.} i_{\alpha}^{6.o.} + \psi_{PM}^{6.o.} \cos \theta ;$$

$$\psi_{\beta}^{6.o.} = \omega_{\delta} L_s^{6.o.} i_{\beta}^{6.o.} + \psi_{PM}^{6.o.} \sin \theta ;$$

$$\psi^{6.o.} = \sqrt{\psi_{\alpha}^{6.o. 2} + \psi_{\beta}^{6.o. 2}} ;$$

$$\omega_{\delta} = 2\pi f_{\delta}.$$

Ці рівняння описують обчислення крутного моменту за струмами в системі відліку α - β :

$$M = \frac{3}{2} p \psi_{\alpha} i_{\beta} - \psi_{\beta} i_{\alpha} .$$

Ці рівняння описують обчислення крутного моменту на одиницю (в.о.):

$$M^{6.o.} = \frac{1}{\psi_{AD}^{6.o.}} \psi_{\alpha}^{6.o.} i_{\beta}^{6.o.} - \psi_{\beta}^{6.o.} i_{\alpha}^{6.o.} ,$$

де ψ – потік ротора , Вб;

$\psi^{6.o.}$ – потік ротора, в.о.;

ψ_{α} – потік ротора вздовж осі α системи відліку α - β , Вб;

$\psi_{\alpha}^{6.o.}$ – потік ротора вздовж осі α системи відліку α - β , в.о.;

ψ_{β} – потік ротора вздовж осі β системи відліку α - β , Вб;

$\psi_{\beta}^{6.o.}$ – потік ротора вздовж осі β системи відліку α - β , в.о.;

ψ_{AD} – потокозчеплення АД, Вб;

$\psi_{AD}^{6.o.}$ – потокозчеплення АД, в.о.;

L_s – індуктивність статора, Гн;

$L_s^{6.o.}$ – індуктивність статора, в.о.;

i_{α} – струм двигуна вздовж осі α системи відліку α - β , А;

$i_{\alpha}^{6.o.}$ – струм двигуна вздовж осі α системи відліку α - β , А;

i_{β} – струм двигуна вздовж осі β системи відліку α - β , А;

$i_{\beta}^{6.o.}$ – струм двигуна вздовж осі β системи відліку α - β , в.о.;

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

θ – положення ротора (зафіксоване датчиком або визначене бездатчиковою оцінкою положення), рад;

ω_{ϕ} – базисна швидкість двигуна, рад/с;

f_{ϕ} – базисна частота двигуна, Гц;

M – крутний момент ротора, Н·м;

$M^{e.o.}$ – крутний момент ротора, Н·м;

p – кількість пар полюсів двигуна.

3.3 Синтез моделі системи прямого керування моментом електроприводу пластинчастого живильника

Синтез моделі виконаємо в MATLAB/Simulink з використанням блоку DTC з бібліотеки SimPowerSystems.

Блок DTC (рис. 3.2) асинхронного двигуна (AC4) являє собою вдосконалений привід для асинхронних двигунів з прямим скалярним керуванням крутного моменту та потоку. Цей привід оснащений замкнутим регулюванням швидкості за допомогою контролерів крутного моменту та потоку в гістерезисному діапазоні. Цикл регулювання швидкості виводить еталонний електромагнітний крутний момент і потік статора машини. Завдання на крутний момент та потік порівнюються з їх розрахунковими значеннями, а помилки надходять на гістерезисні контролери. Потім виходи контролерів гістерезису використовуються для отримання необхідних сигналів затвора для інвертора через оптимальну таблицю комутації [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

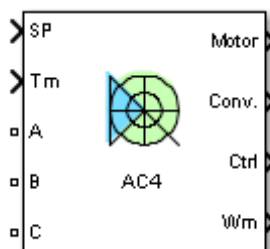


Рис. 3.2. Модель скалярної системи прямого керування моментом в Simulink

У програмному забезпеченні спеціалізованих систем живлення Simscap Electrical блок DTC зазвичай називають електроприводом AC4 [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

DTC асинхронного привоу AC4 (див. рис. 3.3) використовує такі блоки з бібліотеки Електроприводи / Фундаментальні блоки приводів [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

- контролер швидкості (змінного струму);
- прямий контролер крутного моменту;
- шина постійного струму;
- інвертор (трифазний);
- DTC блок привоу асинхронного двигуна.

Модель дискретна, крок часу моделювання встановлюється 2 мкс. Для імітації пристрою цифрового контролера система керування має два різні періоди вибірки [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

- час дискретизації контролера швидкості;
- DTC час вибірки контролера.

Час дискретизації регулятора швидкості повинен бути кратним DTC часу вибірки. Останній час дискретизації повинен бути кратним часу моделювання.

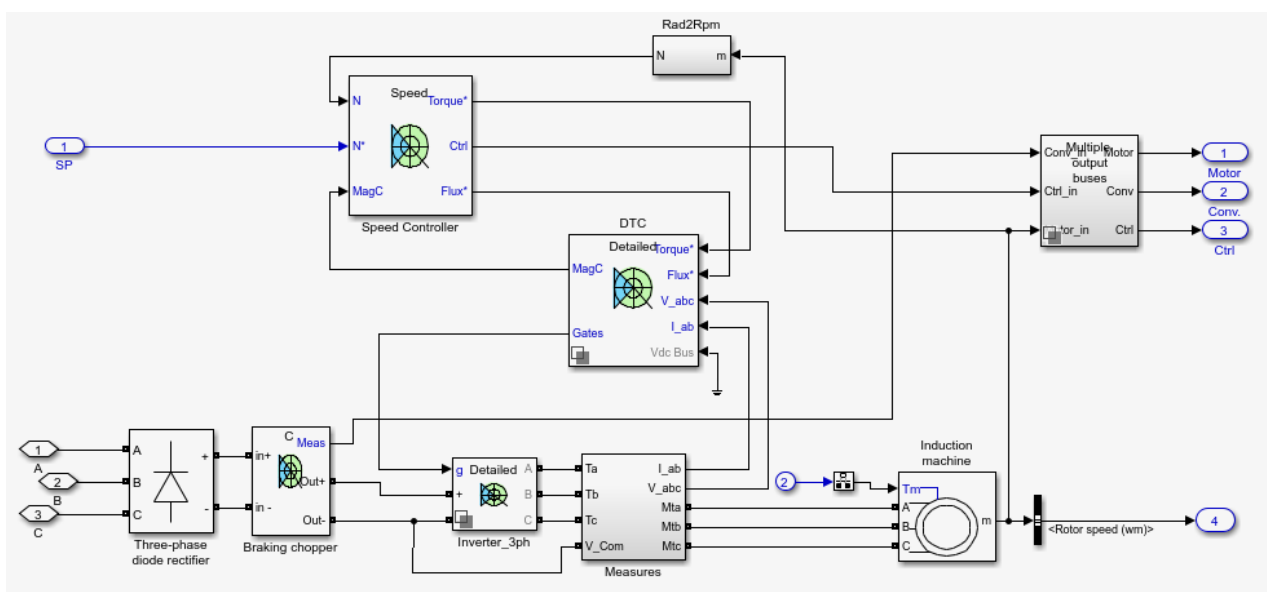


Рис. 3.3. Внутрішня структура моделі скалярної системи прямого керування моментом асинхронного привоу [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Параметри блоку AC4 [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

- загальні;
- вкладка «асинхронні машини»;
- перетворювачі та вкладка шини постійного струму;
- вкладка контролера.

Загальні налаштування.

Режим вихідної шини. Можна вибрати, як організовані вихідні змінні. Якщо вибрати кілька вихідних шин (за замовчуванням), блок має три окремі вихідні шини для змінних двигуна, перетворювача та контролера. Якщо вибрати одну вихідну шину, усі змінні виводяться на одну шину.

Механічний вхід. Виберіть між крутним моментом навантаження, частотою обертання двигуна та механічним портом обертання як механічним входом. За замовчуванням Torque T_m . Якщо вибрати і застосувати крутний момент навантаження, на виході вийде швидкість двигуна відповідно до наступного диференціального рівняння, що описує динаміку механічної системи [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$M_e = J \frac{d\omega_p}{dt} + F\omega_p + M_m.$$

Ця механічна система включена в модель двигуна.

Якщо вибрати швидкість обертання двигуна як механічний вхід, тоді отримується електромагнітний крутний момент як вихід, що дозволяє представити зовні динаміку механічної системи. Внутрішня механічна система не використовується з цим механічним вибором вхідних даних, а параметри інерції та в'язкого тертя не відображаються.

Для механічного поворотного порту порт підключення S враховує механічний вхід і вихід. Це дозволяє безпосередньо підключатися до середовища Simscare. Механічна система двигуна також включена в електропривід і базується на тому ж диференціальному рівнянні.

Використовуйте назви сигналів як мітки. Якщо встановити цей прапорець, на виходах вимірювань Motor, Conv та Ctrl використовуються

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

імена сигналів для ідентифікації міток шини. Виберіть цей параметр для програм, для яких мітки сигнальних шин повинні містити лише буквено-цифрові символи.

Коли цей прапорець знято (за замовчуванням), вимірювальний вихід використовує визначення сигналу для ідентифікації міток шини.

Вкладка «асинхронні машини».

На вкладці Asynchronous Machine відображаються параметри блоку Asynchronous Machine бібліотеки Fundamental Blocks.

Перетворювачі та вкладка шини постійного струму.

Секція випрямляча

Розділ «Випрямляч» (Universal Bridge) на вкладці «Перетворювачі та шина постійного струму» відображає параметри блоку «Випрямляч» бібліотеки «Фундаментальних блоків».

Розділ шини постійного струму.

Ємність. Ємність шини постійного струму (Φ). За замовчуванням $2 \cdot 10^{-3} \Phi$.

Гальмівні опори.

Опір. Опір гальмівного резистора, що використовується для уникнення перенапруги шини під час уповільнення двигуна або коли крутний момент навантаження має тенденцію прискорювати двигун (Ом). За замовчуванням 8.

Частота гальмівного блоку. Частота гальмування подрібнювача (Гц). За замовчуванням 4000.

Напруга активації. Динамічне гальмування активується, коли напруга шини досягає верхньої межі діапазону гістерезису. Наступний рис. 3.4 ілюструє логіку гістерезису гальмового опору. За замовчуванням 320.

Напруга відключення. Динамічне гальмування припиняється, коли напруга шини досягає нижньої межі діапазону гістерезису. за замовчуванням 310. Логіка гістерезису показана на рис. 3.4.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

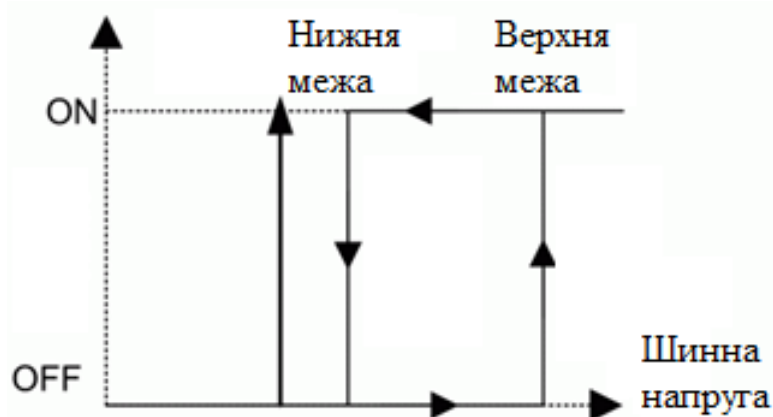


Рис. 3.4. Діаграма спрацьовування/відключення гальмівного опору [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Інвертор. У розділі «Інвертор» на вкладці «Перетворювачі та шина постійного струму» відображаються параметри блоку «Інвертор» бібліотеки "Основні блоки" (powerlib). Для отримання додаткової інформації про параметри інвертора зверніться до довідкової сторінки Universal Bridge.

Вкладка контролера.

Тип регулювання. Цей параметр дозволяє вибрати між регулюванням швидкості та крутного моменту. За замовчуванням регулювання швидкості.

Тип модуляції. Виберіть гістерезисну (рис. 3.5) або векторну модуляцію (рис. 3.6). Тип модуляції за замовчуванням - Гістерезис.

Схема. З'являється схема, що ілюструє схеми регуляторів швидкості та поточного струму.

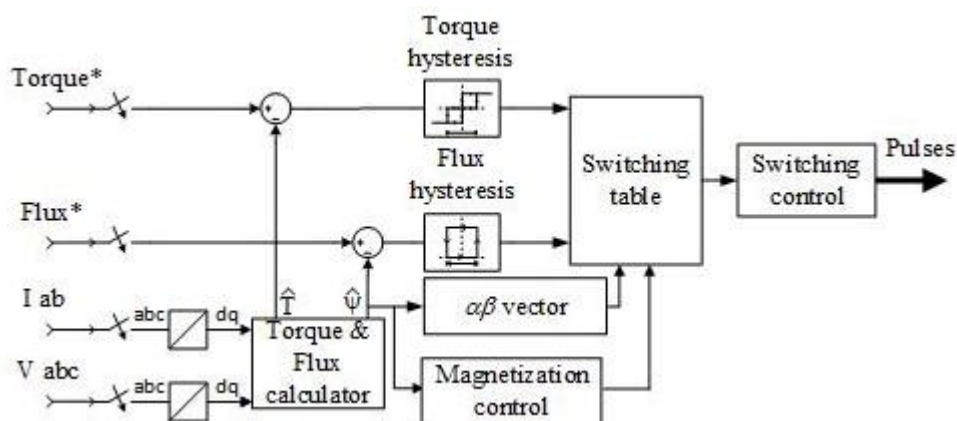


Рис. 3.5. Схема прямого керування моментом з гістерезисною модуляцією [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

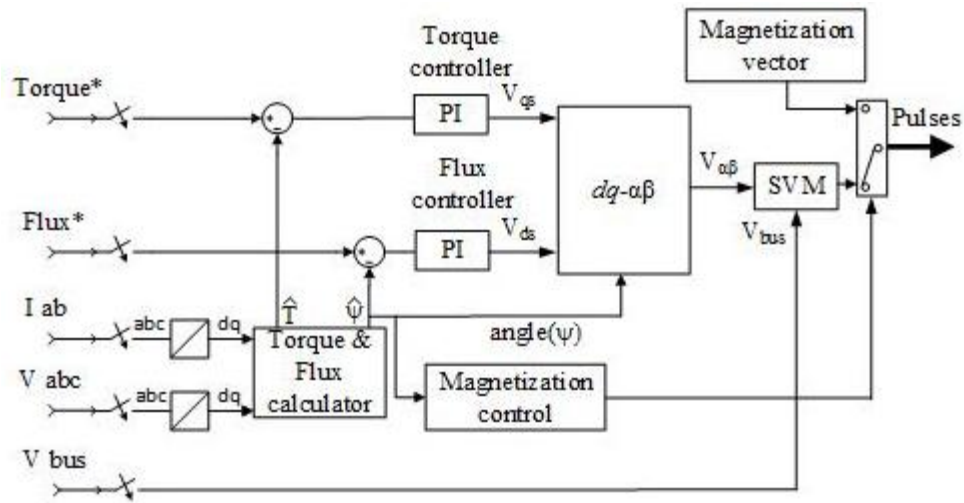


Рис. 3.6. Схема прямого керування моментом з векторною модуляцією
[Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Розділ регулятора швидкості (рис. 3.7)

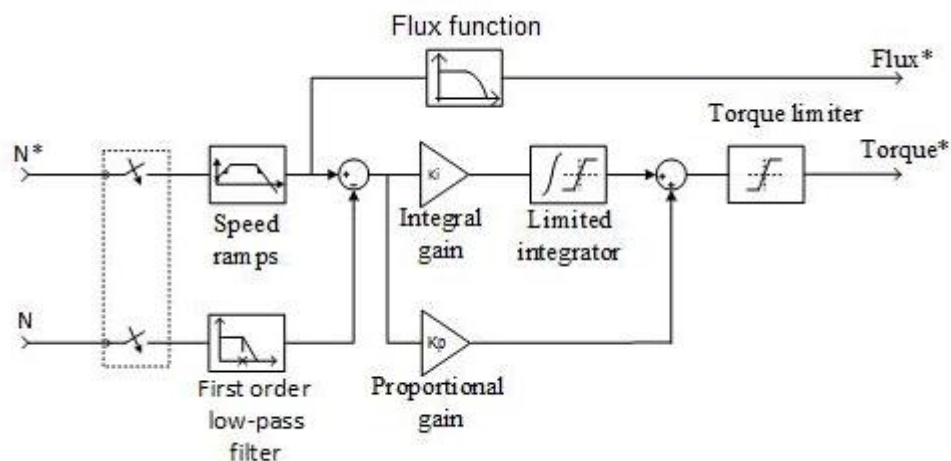


Рис. 3.7. Схема регулятора швидкості при прямому керуванні моментом
[Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Швидкість розгону. Максимальна зміна швидкості, дозволена під час прискорення двигуна (об/хв). Надмірно велике позитивне значення може спричинити зниження напруги шини постійного струму. Цей параметр використовується лише в режимі регулювання швидкості. За замовчуванням 1800.

Швидкість уповільнення. Максимальна зміна швидкості, дозволена під час уповільнення двигуна (об/хв). Надмірно велике негативне значення може спричинити перенапругу шини постійного струму. Цей параметр

використовується лише в режимі регулювання швидкості. За замовчуванням 1800.

Частота відсічення швидкості. Вимірювання швидкості частоти відсікання фільтра низьких частот першого порядку (Гц). Цей параметр використовується лише в режимі регулювання швидкості. За замовчуванням 100.

Час дискретизації контролера швидкості. Час дискретизації має бути кратним етап часу моделювання. За замовчуванням 10^{-4} .

PI-контролер – пропорційний коефіцієнт підсилення контролера швидкості. Цей параметр використовується лише в режимі регулювання швидкості. За замовчуванням 5.

PI-контролер – інтегральний коефіцієнт підсилення контролера швидкості. Цей параметр використовується лише в режимі регулювання швидкості. За замовчуванням 10.

Межі вихідного моменту – негативні. Максимальний негативний крутний момент, що застосовується до двигуна регулятором струму (Нм). За замовчуванням -17,8.

Межі вихідного моменту – позитивні. Максимально необхідний крутний момент, що вимагається від двигуна регулятором струму (Нм). За замовчуванням 17,8.

Розділ контролера DTC

Пропускна здатність гістерезису – крутний момент. Пропускна здатність гістерезису крутного моменту – це загальна смуга пропускання, розподілена симетрично навколо заданого крутного моменту (Нм). За замовчуванням 0,5. На рис. 3.8 ілюструється випадок, коли заданим значенням крутного моменту є T_e^* , а смуга пропускання гістерезису крутного моменту встановлена на dT_e .

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

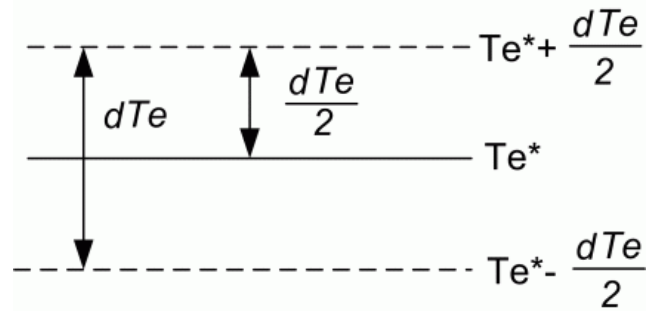


Рис. 3.8. Пропускна здатність гістерезису крутного моменту [Ошибка!

Источник ссылки не найден.]

Пропускна здатність гістерезису – потік. Пропускна здатність гістерезису потоку статора – це загальна смуга пропускання, розподілена симетрично навколо заданої точки потоку (Wb). За замовчуванням 0,01. На рис. 3.9 ілюструється випадок, коли задана точка потоку дорівнює ψ^* , а смуга пропускання гістерезису крутного моменту встановлена на $d\psi$.

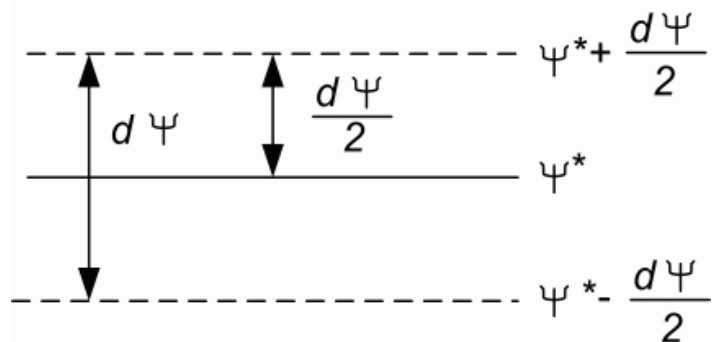


Рис. 3.9. Пропускна здатність гістерезису потоку [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Цю смугу пропускання можна перевищити, оскільки використовується моделювання з фіксованим кроком. Блок переходу швидкості необхідний для передачі даних між різними частотами дискретизації. Цей блок викликає затримку сигналів затвора, тому струм може перевищувати смугу гістерезису.

Початковий потік машини. Бажаний початковий потік статора, встановлений перед тим, як модуль приводу DTC почне створювати електромагнітний момент. Цей потік виробляється шляхом застосування вектора постійної напруги на клеммах двигуна (Wb). За замовчуванням 0,3.

Час дискретизації DTC. Час дискретизації контролера DTC (c). Час дискретизації має бути кратним часу моделювання. За замовчуванням $20 \cdot 10^{-6}$.

Максимальна частота перемикання. Максимальна частота перемикання інвертора (Гц). За замовчуванням 20000.

Показати/приховати керування автоналаштування.

Розділ автоналаштування контурів ПІ-контролера.

Бажане демпфування [зета]. Коефіцієнт демпфування, який використовується для розрахунку коефіцієнтів підсилення k_p та k_i регулятора швидкості. За замовчуванням 0,707.

Бажаний час відгуку @ 5% [Trd (сек)]. Бажаний час встановлення регулятора швидкості. Це час, необхідний для того, щоб відповідь контролера досягла та залишалась у межах 5 відсотків від цільового значення. За замовчуванням 0,01.

Співвідношення смуги пропускання (InnerLoop/SpeedLoop). Співвідношення між смугою пропускання та власною частотою. За замовчуванням 30.

Обчислення параметрів ПІ-регулятора. Визначає автоматично пропорційне та інтегральне підсилення блоку регулятора швидкості (АС). Обчислення базуються на бажаних параметрах демпфування [дзета], бажаному часі відгуку @ 5% та співвідношенні смуги пропускання (InnerLoop / SpeedLoop). Обчислені значення відображаються в масці блоку АС4.

Входи та виходи блоку АС4

SP. Встановлення швидкості або крутного моменту. Встановлена швидкість може бути ступінчасто функцією, але зміна швидкості буде залежати від прискорення/уповільнення. Якщо крутний момент навантаження та швидкість мають протилежні знаки, прискорюючий момент буде сумою електромагнітного та навантажувального моментів.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

T_m або W_m . Механічний ввід: крутний момент навантаження (T_m) або швидкість двигуна (W_m). Для механічного поворотного порту (S) цей вхід видалено.

A, B, C. Трифазні клеми електродвигуна.

W_m , T_e або S. Механічна потужність: частота обертання двигуна (W_m), електромагнітний крутний момент (T_e) або механічний поворотний порт.

Коли для параметра «Режим вихідної шини» встановлено значення «Кілька вихідних шин», блок має такі три вихідні шини:

Motor. Вектор вимірювання параметрів двигуна. Цей вектор дозволяє спостерігати зміни двигуна за допомогою блоку вибору шини.

Conv. Вектор вимірювання параметрів трифазних перетворювачів. Цей вектор містить:

- напругу шини постійного струму;
- вихідний струм випрямляча;
- вхідний струм інвертора.

Ctrl. Вектор вимірювання параметрів контролера. Цей вектор містить:

- завдання на крутний момент;
- похибку швидкості (різниця між еталонним завданням швидкості та фактичною швидкістю);
- еталонна швидкість або еталонний момент.

Коли для параметра «Режим вихідної шини» встановлено значення Одиночна вихідна шина, блок групує виходи Motor, Conv та Ctrl в єдиний вихід шини.

3.4 Моделювання електроприводу пластинчастого живильника із системою прямого керування моментом

Імітаційна модель системи прямого керування моментом електроприводу пластинчастого живильника наведена на рис. 3.10.

Схема використовує блок AC4 бібліотеки спеціалізованих енергетичних систем. Він моделює привід асинхронного двигуна з прямим контролем

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

крутного моменту (DTC) з гальмовим чоппером для двигуна змінного струму 1LE1603-2DD0 потужністю 37 кВт.

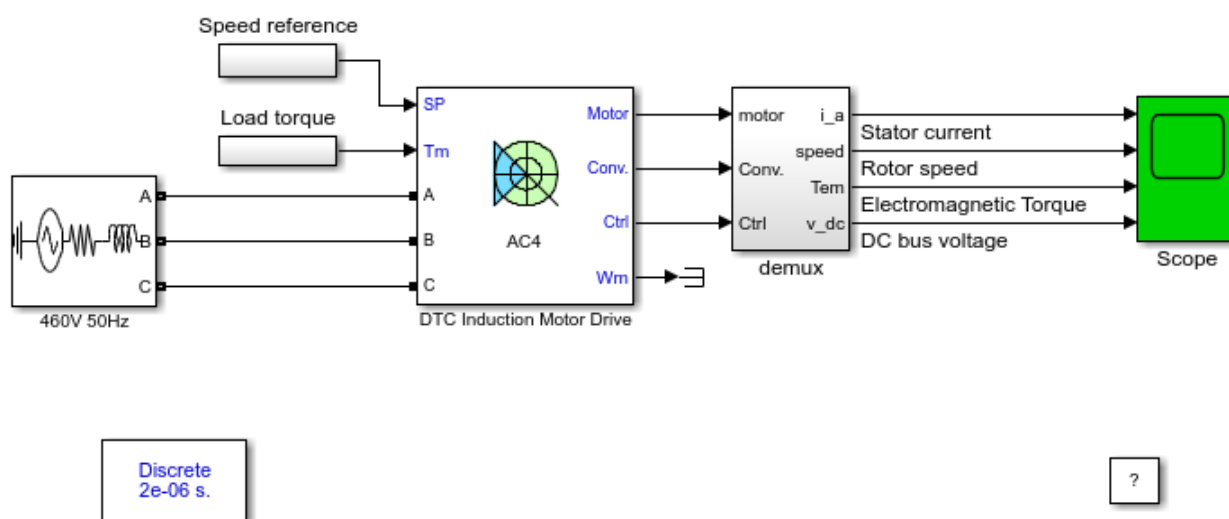


Рис. 3.10. Імітаційна модель системи прямого керування моментом електропривода пластинчастого живильника [Ошибка! Источник ссылки не найден.]

Асинхронний двигун живиться від джерела змінної напруги через ШІМ-інвертор, який побудований за допомогою універсального мостового блоку. Шлейф регулювання швидкості використовує пропорційно-інтегральний контролер для створення еталонів потоку та крутного моменту для блоку DTC. Блок DTC обчислює значення крутного моменту та потоку двигуна та порівнює їх з відповідними еталонами. Потім виходи компараторів використовуються оптимальною комутаційною таблицею, яка генерує імпульси перемикання інвертора [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Сигнали струму, швидкості та крутного моменту двигуна доступні на виході блоку.

При моделюванні можна спостерігати струм статора двигуна, частоту обертання ротора, електромагнітний крутний момент та напругу шини постійного струму. Також відображаються задане значення швидкості та значення крутного моменту [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

У момент часу $t = 0$ задане значення швидкості становить 736 об/хв. Зверніть увагу, що швидкість точно відповідає швидкості прискорення.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

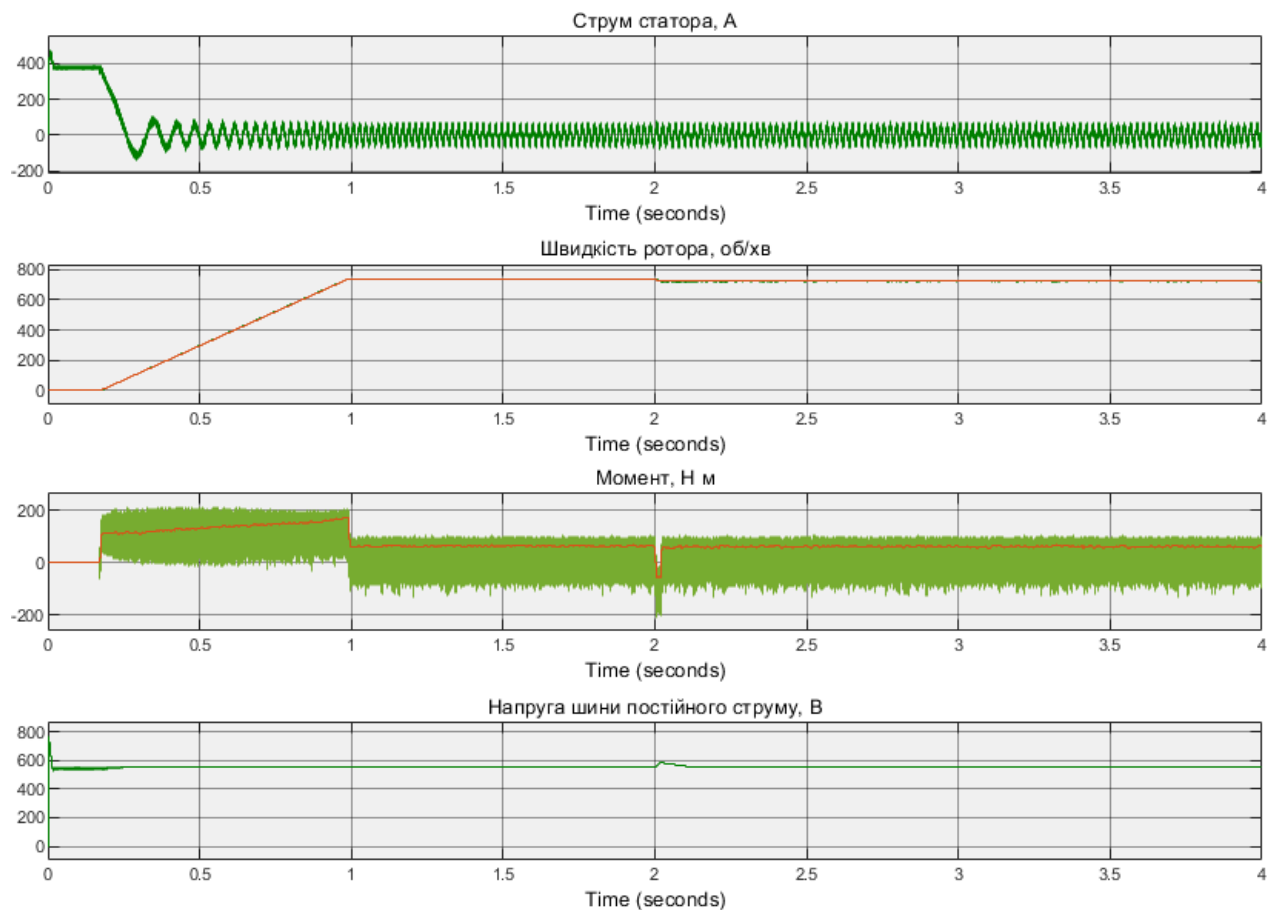


Рис. 3.11. Перехідні процеси в електроприводі пластинчастого живильника з системою прямого керування моментом при руху з повним транспортним органом

При $t = 1,5 \text{ c}$ крутний момент повного навантаження прикладається до валу двигуна, поки швидкість двигуна все ще збільшується до остаточного значення. Це змушує електромагнітний крутний момент збільшуватися до визначеного користувачем максимального значення ($480 \text{ Н} \cdot \text{м}$), а потім стабілізуватися на рівні $450 \text{ Н} \cdot \text{м}$, як тільки завершиться нарощування швидкості і двигун досягне 750 об/хв .

Видно, як добре системою регулюється напруга шини постійного струму протягом усього періоду моделювання.

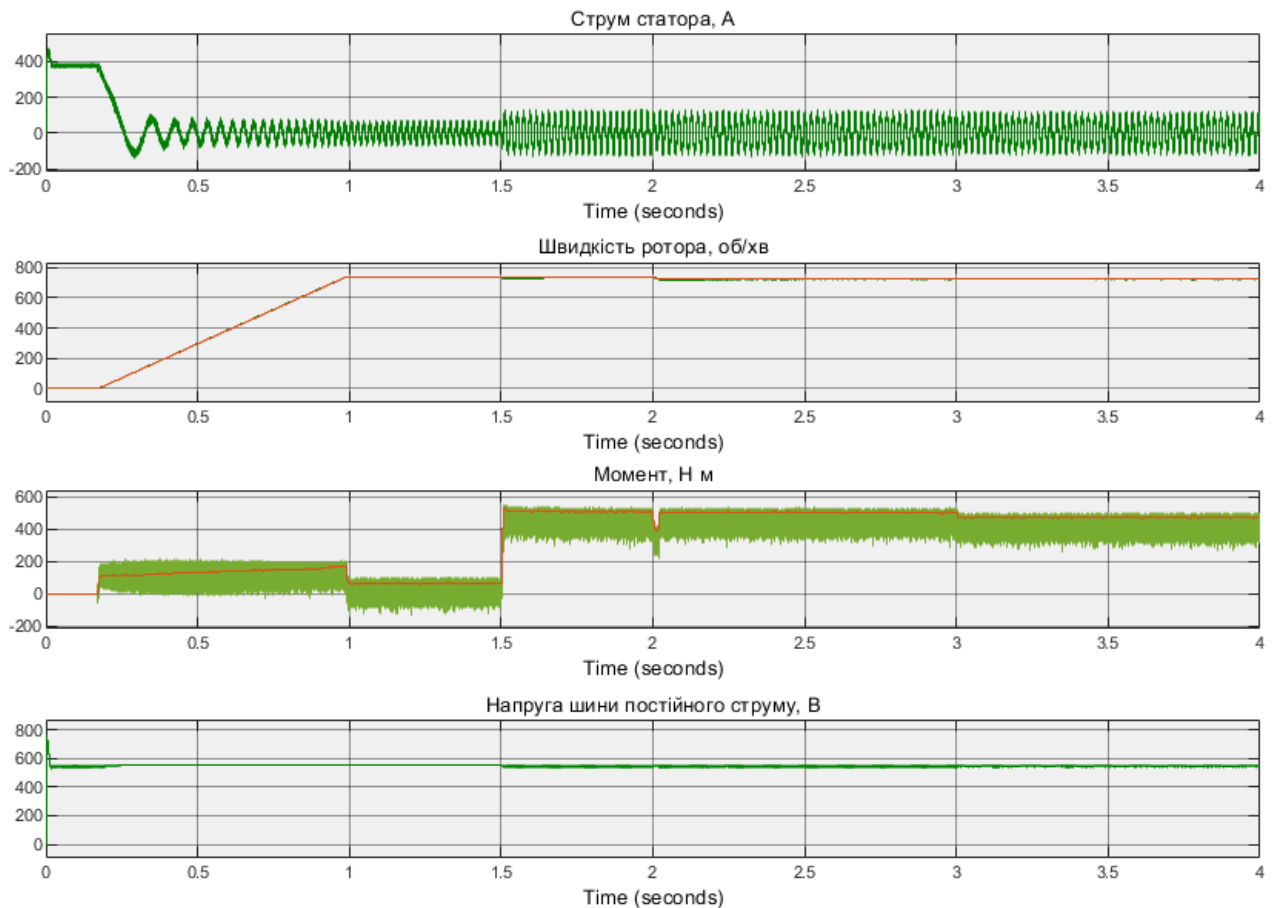


Рис. 3.12. Перехідні процеси в електроприводі пластинчастого живильника з системою прямого керування моментом при руху з пустим транспортним органом

Модель була дискретизована з кроком у 2 мс. Контролер швидкості використовує вибірку 140 мс, а контролер DTC використовує час вибірки 20 мс для того, щоб імітувати пристрій керування мікроконтролером.

Висновок до розділу 3

У розділі 3 створили модель електроприводу пластинчастого живильника в MATLAB з системою прямого керування моментом двигуна. Змодельювали роботу системи при руху порожнього і повного транспортного органу пластинчастого живильника.

Висновки

1. За вихідними даними пластинчастого живильника дробарної фабрики гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» обчислив потужність електродвигуна.

2.. Обрав електродвигун 1LE1603-2DD0, який задовольняє вимогам до електроприводу пластинчастого живильника в умовах технологічних процесів дробарної фабрики .

3.. За параметрами електродвигуна пластинчастого живильника розрахував Т-схему заміщення АД і побудував природні і штучні механічні та електромеханічні характеристики двигуна 1LE1603-2DD0.

4. Визначив, що для системи електроприводу ПЧ-АД з електродвигуном 1LE1603-2DD0 і законі регулювання $U/f = \text{const}$ треба застосовувати Іг-компенсацію.

5.. Створив в MATLAB модель АД і, використавши різні частоти напруги статора побудували графіки перехідних процесів. Моделювання вказує, що зі зменшенням частоти напруги статора зменшується струм, момент і кутова швидкість.

6.. Змоделював роботу системи прямого керування моментом асинхронного двигуна пластинчастого живильника з навантаженою і пустою стрічкою, яке показало можливість залучення системи в промисловості.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303с-09</i>	<i>Арк.</i>
						<i>60</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		