

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Електромеханічне обладнання дробарки КМД 2200 дробильної фабрики №2
гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Виконав: здобувач групи ЕЕМ-22ск _____ Денис МОСКАЛЕНКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Міла БАРАНОВСЬКА

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Міла БАРАНОВСЬКА

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

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

Кривий Ріг

2025

Реферат

Робота присвячена дослідженню та оптимізації електроприводу конусної дробарки КМД-2200, яка використовується на дробильній фабриці №2 гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Метою роботи є підвищення енергоефективності та надійності роботи дробарки шляхом впровадження сучасних методів плавного пуску.

У роботі проаналізовано технологічні особливості виробництва, конструкцію та принцип роботи дробарки КМД-2200. На основі розрахунків обґрунтовано вибір асинхронного двигуна АКЗ-13-52-12 та пристрою плавного пуску Schneider Electric ATS 48C32Y. Детально досліджено статичні та динамічні характеристики системи, включаючи механічні, електромеханічні та перехідні процеси при різних режимах пуску.

Результати моделювання показали, що застосування тиристорного регулятора напруги (ТРН-АД) дозволяє зменшити пускові струми та моменти на 30–40% порівняно з прямим і реостатним пуском, що значно знижує динамічні навантаження на обладнання. Також доведено, що плавний пуск забезпечує економію електроенергії на 25–30% та підвищує довговічність механічних вузлів.

Робота має практичну цінність для гірничо-збагачувальних підприємств, оскільки пропонувані рішення дозволяють оптимізувати експлуатацію дробарного обладнання, знизити витрати на енергоносії та зменшити ризик аварійних ситуацій.

Ключові слова: конусна дробарка КМД-2200, асинхронний двигун, плавний пуск, тиристорний регулятор напруги, енергоефективність, динамічні навантаження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Реферат.....	2
Вступ.....	5
РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ ТА ЙОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	7
1.1 Процес виробництва в гірничому департаменті ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	8
1.2 Загальний опис конусної дробарки дрібного дроблення КМД 2200, призначення і складові частини	9
1.3 Розрахунок та вибір електродвигуна дробарки КМД 2200.....	13
1.4 Пристрій плавного пуску для двигуна дробарки КМД 2200	15
Висновки до розділу	21
РОЗДІЛ 2. ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА І РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	22
2.1 Схеми заміщення двигуна дробарки КМД 2200	23
2.2 Статичні характеристики (природні) двигуна дробарки КМД 2200.....	26
2.3 Характеристики при реостатному пуску двигуна дробарки КМД 2200.....	28
2.4 Характеристики плавного пуску привода дробарки КМД 2200 по схемі ТРН-АД	32
2.5 Електричні втрати при пуску привода дробарки КМД 2200	34
Висновки до розділу	37
РОЗДІЛ 3. ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	38
3.1 Модель двигуна дробарки КМД 2200	39
3.2 Модель системи плавного пуску двигуна дробарки КМД 2200 по системі ТРН-АД	46

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки до розділу	54
Висновки	55
Список використаної літератури	56

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Вступ

У сучасних умовах гірничо-збагачувальні підприємства намагаються знизити енергетичні та експлуатаційні витрати під час рудопідготовки. Дроблення було і залишається у сьогоденні дуже енергоємним процесом у технології переробки корисних копалин. На цю операцію приходиться до 20% загальних капітальних витрат, що підкреслює її економічну важливість.

На гірничо-збагачувальних фабриках використовуються дробарки, які руйнують породу шляхом роздавлювання, стирання або удару. Однак ці методи вимагають значних енерговитрат через високий опір гірських порід.

На сьогодні для середнього та дрібного дроблення широко застосовуються конусні дробарки. Їх експлуатація має свої особливості, зокрема необхідність рівномірної подачі матеріалу. Запуск агрегату здійснюється порожньою камерою дроблення, а подача руди починається лише після певного часу роботи на холостому ході. При зупинці спочатку припиняється подача матеріалу, завершується дроблення залишків у камері, і лише тоді вимикається електродвигун.

Підвищення енергетичної ефективності приводу конусної дробарки можливе за рахунок оптимізації режимів роботи двигуна, які поділяються на сталі та перехідні, включаючи пускові, гальмівні та режими зміни частоти обертання. Хоча основний ефект енергозбереження досягається в сталих режимах, саме перехідні режими, які переважають у роботі дробарки, потребують особливої уваги.

Важливим напрямом оптимізації є покращення пускових режимів. Прямий пуск супроводжується високими струмами, що досягають восьмикратного номінального значення, що призводить до перевантаження мережі та комутаційного обладнання. Також виникає різкий стрибок крутного моменту, який негативно впливає на електродвигун і механічні компоненти приводу, такі як ремінні передачі, муфти чи редуктори.

Для зменшення пускових струмів традиційно використовують різні методи, які в основному дозволяють лише ступінчасте зниження напруги. На

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відміну від них, системи плавного пуску забезпечують поступове збільшення напруги на двигуні, завдяки чому досягається плавний розгід і м'який режим роботи для мережі та самого електродвигуна.

Враховуючи це, актуальним завданням є вдосконалення пускових процесів електроприводу конусних дробарок шляхом впровадження додаткового обладнання. Це дозволить економити енергоресурси та знизити експлуатаційні витрати на гірничо-збагачувальних комбінатах.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

**РОЗДІЛ 1. ХАРАКТЕРИСТИКА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ ТА ЙОГО
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата								
Розроб.		Москаленко Д.С.			Характеристика електромеханічного об'єкту та його електрообладнання				Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Барановська М.Л.							Н		7	
									ЕЕМ-22ск			
Н.контр.		Барановська М.Л.										
Затверд.		Пересунько І.І.										

1.1 Процес виробництва в гірничому департаменті ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Гірничий департамент підприємства ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є ключовим власним виробником залізорудної сировини, спеціалізуючись на відкритому видобутку та переробці магнетитових кварцитів, які потім використовуються в металургійних процесах. Підприємство, розташоване на півдні Кривого Рогу. Його інфраструктура включає два кар'єри (№ 2-біс і № 3), по дві дробильні, збагачувальні та агломераційні фабрики, а також низку допоміжних цехів, що забезпечують повний цикл виробництва.

Основна сировина – залізисті кварцити з коефіцієнтом міцності 15-19 за шкалою Протод'яконова. Видобуток ведеться на двох кар'єрах: № 2-біс (Новокриворізьке родовище) та № 3 (Валявкинське родовище), загальною площею понад 900 га. Кар'єри мають глибину до 223 метрів і щорічно видобувають до 30 млн тонн сирої руди. Виробничий процес повністю механізований, з використанням сучасного обладнання, включаючи бурові верстати, екскаватори великої місткості, залізничний та автотранспорт.

Технологічний процес переробки руди включає чотири стадії дроблення, подрібнення, збагачення на магнітних сепараторах та зневоднення концентрату. Отриманий продукт містить до 65% заліза і використовується для виробництва агломерату. Агломераційний комплекс має два цехи, котрі щорічно випускають 10,5 млн тонн агломерату різної якості, призначеного для металургійних заводів.

Окрім основної продукції, підприємство виробляє будівельні матеріали. Дробильно-сортувальна установка переробляє малорудні кварцити у щебінь різних фракцій, який використовується для будівництва доріг, залізничного полотна та інших потреб. Класифікаційна установка дозволяє отримувати високоякісні будівельні піски з відходів збагачення, з річною потужністю до 1,2 млн м³.

Енергопостачання підприємства забезпечується потужною підстанцією 330 кВ «Гірнич», а технічна вода надходить з системи оборотного

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

водопостачання. Важливим аспектом діяльності є рекультивація відпрацьованих територій, що свідчить про відповідальний підхід до екології.

Гірничий департамент забезпечує важливу частину технології виробництва продукції ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

1.2 Загальний опис конусної дробарки дрібного дроблення КМД 2200, призначення і складові частини

На гірничозбагачувальних підприємствах для дроблення руди широко застосовуються конусні дробарки, які забезпечують зменшення розміру кусків гірської породи завдяки безперервному впливу роздавлювання, зламу та часткового стирання в моменти наближення рухомого і нерухомого конусів.

Такий спосіб руйнування забезпечує ефективне дроблення за рахунок комбінації згинального зусилля та тертя. Основним робочим елементом дробарки є конус, що закріплється на вертикальному валу і рухається Він нижньою частиною розташований у ексцентрику. Вал обертається у стаціонарній чаші конічної форми. Вал виконує коливально-обертальні рухи навколо верхньої точки опори, внаслідок чого внутрішній конус обкочується по внутрішній поверхні зовнішнього конуса. Подрібнення відбувається в зоні мінімального зазору між конусами, а з протилежного боку розширення проміжку дозволяє вивантажувати готовий матеріал, що забезпечує безперервність технологічного процесу. Обертання ексцентрикового стакану з вільним вертикальним валом всередині, здійснюється за допомогою електропривода через систему шестерень і приводних валів.

Щоб захистити робочі поверхні конуса від зношування, застосовуються футеровки з броньових плит, які розташовані у два або три ряди по висоті конуса, а зазори між ними заливаються сплавом на основі цинку. Зміна ширини розвантажувального отвору здійснюється шляхом регулювання взаємоположення між двома конусами.

Процес дроблення починається з надходження руди зверху в простір між рухомим і стаціонарним конусами, а продукти дроблення вивантажуються через кільцеву зону під дробаркою.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Серед переваг слід відзначити високу продуктивність, яка досягається завдяки збільшеній довжині розвантажувального отвору при однаковій ширині порівняно з щокковими дробарками. Також ці машини споживають менше електроенергії ніж інші типи дробарком при чому забезпечують більш однорідний за крупністю продукт з переважно кубічною формою кусків руди.

У зв'язку з такими перевагами на великих збагачувальних комбінатах, де важлива висока ефективність та стабільна якість продукту, на завершальних етапах дроблення використовуються дробарки типу КМД 2200. Основні технічні параметри цієї моделі наведені в табл. 1.1. Зазначена продуктивність є дійсною для умов, коли міцність матеріалу перебуває в межах від 100 до 150 МПА, а вологість не перевищує 4%. Ці характеристики враховують оптимальні умови роботи без зупинок, з повним завантаженням дробильної зони та наявністю у подачі приблизно 15 – 20% руди, розмір якої перевищує 0,6 від максимального допустимого значення вхідного матеріалу.

Таблиця 1.1. Технічні дані дробарки КМД 2200

Параметр	Значення
D	2200 мм
B	275-450 мм
b	15-65 мм
l	350 мм
Q	180-820 м ³ /год
F	480 т
$F_{\max}$	620 т
$n_{\text{ексц}}$	242 об/хв

Зовнішній вигляд конусної дробарки типу КМД 2200 наведений на рис. 1.1.

Робоча камера дробарки має форму конуса, яка утворена рухомим дробильним конусом і нерухомою дробильною плитою, виготовленою з

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

міцного металу. Основна конструктивна частина – станина, виконана у вигляді суцільнолитого циліндричного елемента, встановлюється нижнім фланцем на бетонну основу.

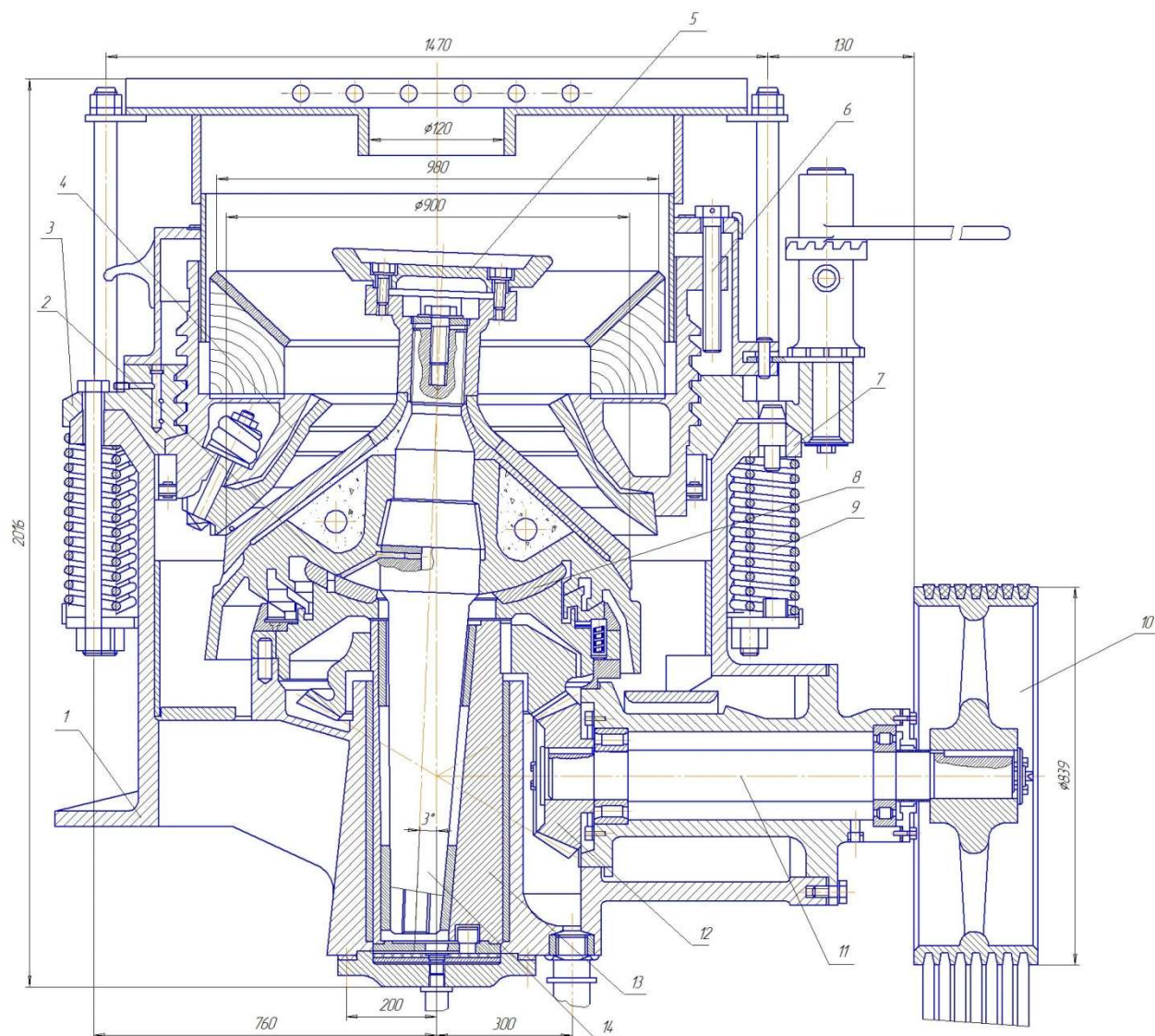


Рисунок 1.1 – Дробарка конусна КМД 2200: 1 – станина; 2 – рухомий конус; 3 – установче кільце; 4 – конус нерухомий; 5 – розподільча тарілка; 6 – палець; 7 – фланець станини; 8 – підп’ятник; 9 – пружина; 10 – шків привідний; 11 – вал приводу; 12 – шестерня конусна; 13 – втулка ексцентрику; 14 – вал рухомого конусу

Для монтажу обладнання використовуються спеціальні фундаментні плити, які забезпечують стійкість під час роботи. У верхній частині станини розміщене опорне кільце, що також виготовлене методом лиття. На його внутрішній циліндричній поверхні нарізано гвинтову різьбу, завдяки чому

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06

Арк.

11

забезпечується можливість регулювання висоти встановлення нерухомої чаші. Опорне кільце прикріплюється до станини за допомогою з'єднувальних болтів та пружин, які додатково виконують функцію амортизаторів. Завдяки встановленим пружинам конструкція має захист від механічних пошкоджень у випадку потрапляння в дробильну зону сторонніх твердих предметів, які не піддаються подрібненню.

Коли до камери потрапляють великогабаритні металеві включення чи інші недробимі об'єкти, система спрацьовує таким чином, що корпус дробарки разом із закріпленою дробильною плитою починає підніматися, стискаючи при цьому попередньо навантажені пружини. Якщо ж відбувається аварійна зупинка або блокування обладнання, для швидкого розвантаження внутрішнього простору та стиснення пружин можуть застосовуватись гідравлічні домкрати. Конструкція нерухомої чаші представлена у вигляді литої деталі з зовнішнім різьбленням на циліндричній поверхні. Ця чаша загвинчується в опорне кільце, що дозволяє регулювати положення дробильної зони по висоті. Її внутрішня частина має конічну форму з розширенням у нижній частині та покривається спеціальним зносостійким покриттям з марганцевистої сталі.

Робочий конус, виготовлений у вигляді відливки з боковою поверхнею під кутом 100 градусів, має висоту, яка становить приблизно третину від діаметра його основи. По всій боковій частині встановлюється кільцева футерівка, що захищає поверхню від зношення. Щоб забезпечити надійне прилягання футеровки до конуса, зазор між ними заповнюється спеціальним цинковим сплавом. Встановлення дробильного конуса здійснюється на опорний сферичний підшипник завдяки внутрішній сферичній частині конуса. Зовнішня куляста частина цього вузла захищена від потрапляння пилу за допомогою занурення у гідравлічний затвор, що створює додаткову герметичність та забезпечує тривалу експлуатацію агрегату без забруднення внутрішніх елементів.

Конусна дробарка типу КМД 2200 функціонує за рахунок електродвигуна, з'єданого з робочими механізмами через пружну компенсаційну муфту.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Обертальний момент передається через привідний вал, який встановлений у підшипнику ковзання, далі через шків рух передається на ексцентричну втулку. Внутрішньо в ексцентричній та конічній втулці розміщено корінний вал, який забезпечує обертальний рух, передаючи його на дробильний конус. Завдяки особливій конструкції, де конічний вал розміщується в ексцентричному отворі втулки, яка обертається, створюється характерний робочий хід дробильного конуса.

У нижній частині робочої камери дробарки розташована звужена ділянка – вихідна щілина, де здійснюється часткова класифікація матеріалу за розміром. Після потрапляння в машину вихідна сировина падає вертикально на спеціальну розкидну тарілку, з якої рівномірно розподіляється у внутрішній простір. Тут, під дією руху дробильного конуса, матеріал щільно притискається до нерухомої дробильної поверхні, що утворює конічну чашу. Частина частинок затримується в зоні паралельного зазору, де повторно піддається подрібненню за рахунок багаторазового притискання конусом.

Циклічний характер дроблення забезпечує рівномірний розподіл матеріалу по ширині робочої зони, а також виключає ймовірність виникнення так званого «завалу» всередині дробарки, що дозволяє їй працювати безперервно й стабільно навіть при інтенсивному завантаженні. Важливу роль у роботі всіх вузлів відіграє система змащення – як підшипники ковзання, так і зубчаста передача змащуються маслом, що подається під тиском від мастильної станції, забезпечуючи надійність і довговічність експлуатації агрегату.

1.3 Розрахунок та вибір електродвигуна дробарки КМД 2200

Під час експлуатації конусної дробарки КМД 2200 варто враховувати, що пропускна здатність її робочої зони змінюється залежно від висоти перерізу. У місцях без забивання матеріалом вона зростає донизу через зменшення висоти перерізу.

Загальна продуктивність визначається критичним перерізом із найменшою пропускною спроможністю. У КМД 2200 він розташований ближче до верху, майже на рівні завантаження. У нижній частині камери матеріал стає

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

менш щільним, а коефіцієнт розпушення досягає максимуму біля розвантажувального отвору.

Максимальна продуктивність дробарки розраховується як добуток об'ємної пропускної спроможності критичного перерізу на насипну щільність матеріалу. Якщо критичний рівень – це вхід у паралельну зону, то продуктивність залежить від ширини розвантажувальної щілини. Тобто, вона є прямо пропорційна ширині розвантажувальної щілини, тому для КМД 2200 можна визначити питому продуктивність на кожен сантиметр цієї ширини.

Якщо прийняти, що за один оберт ексцентрика матеріал проходить відстань x , тоді з дробарки вивантажується кільце матеріалу об'ємом, який залежить від цієї величини та геометричних параметрів камери дроблення [3]:

$$V = x b \pi D, \quad (1.1)$$

де b – ширина щілини; D – нижній діаметр дробильного конусу.

У разі припущення, що матеріал проходить довжину паралельної зони за один або два оберти, тобто коли x дорівнює l або $x = l/2$, а сама довжина паралельної зони пропорційна діаметру конуса, тоді продуктивність дробарки КМД 2200:

$$V = 60 \pi b n l D = k_0 n b D^2, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (1.2)$$

де $k_0 = 1,4$.

$$V = 1,4 \cdot 242 \cdot 0,14 \cdot 2,2^2 = 229,57 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Для конусної дробарки КМД 2200 потужність електродвигуна приводу орієнтовно змінюється пропорційно до продуктивності, що в свою чергу визначається як nD^2 :

$$P_{\text{ов}} = 0,21 n D^2 = 0,21 \cdot 242 \cdot 2,2^2 = 245,969 \text{ кВт}. \quad (1.3)$$

Для приводу конусної дробарки дрібного дроблення типу КМД 2200 обирається спеціалізований трифазний асинхронний електродвигун з фазним ротором моделі АКЗ-13-52-12, основні технічні характеристики якого наведені у табл. 1.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 1.2. Паспортні дані АКЗ-13-52-12

$P_{ном}, кВт$	$n_{ном}, об / хв$	η	λ_{max}	$\cos \phi$	$GD^2, кг \cdot м^2$
250	490	0,923	2,2	0,76	420

Номінальний струм АКЗ-13-52-12:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,76 \cdot 0,923} = 34,29 \text{ А}, \quad (1.4)$$

Підключення електродвигуна конусної дробарки типу КМД 2200 безпосередньо до мережі живлення не є доцільним через особливості пускового режиму. У такому випадку виникає значне зростання пускового струму, який може перевищувати номінальний у вісім разів, що створює надмірне навантаження на мережу та комутаційне обладнання. Одночасно формується дуже високий пусковий момент, що має негативний вплив не лише на сам електродвигун, а й на привідні механізми дробильної машини. Тому основною метою вдосконалення приводу для дробарки КМД 2200 є виявлення ефективних рішень і підбір відповідних технічних засобів, які забезпечать покращення динаміки пуску та зменшення його негативного впливу на обладнання.

1.4 Пристрій плавного пуску для двигуна дробарки КМД 2200

Сучасні пристрої плавного пуску є одними з найефективніших засобів забезпечення контрольованого запуску електродвигуна, оскільки вони дозволяють поступово змінювати напругу від меншого значення до більшого. Завдяки спеціальним алгоритмам ці пристрої забезпечують регулювання як пускового струму, так і пускового моменту, а також надають повноцінний захист електродвигуна в процесі роботи. Для того щоб ці пристрої функціонували ефективно, необхідно правильно підібрати їх тип і параметри, орієнтуючись на технічні характеристики двигуна, характер навантаження та частоту запусків. Залежно від умов експлуатації можуть знадобитися різні пускові характеристики, тому вибір конкретного варіанта повинен базуватись на ретельному аналізі вимог до кожної конкретної ситуації. У випадку з

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

конусною дробаркою КМД 2200, яка належить до механізмів з ускладненими умовами запуску через високу інерційність і значні пускові струми, оптимальним рішенням буде використання пристроїв плавного пуску, розрахованих саме на такі навантаження. Доцільним варіантом є застосування моделі Schneider Electric Altistart 48, зокрема пускача типу ATS 48C32Y (див. табл. 1.3), який відповідає параметрам електродвигуна АКЗ-13-52-12 і здатен забезпечити надійну і безпечну експлуатацію дробарного обладнання в складних умовах.

Пристрій плавного пуску та зупинки ATS 48C32Y є тиристорним комутаційним модулем, який виконує функцію регулятора напруги та забезпечує контрольований запуск і зупинку трифазних асинхронних електродвигунів. Його застосування в системі приводу конусної дробарки КМД 2200 дозволяє знизити експлуатаційні витрати за рахунок зменшення механічних навантажень, підвищити надійність обладнання і зменшити негативний вплив пускових струмів на електромережу, обмежуючи стрибки струму та просадки напруги.

Таблиця 1.3. Дані ATS 48C32Y

Параметр	Значення
$P_{ном}, кВт$	250
$I_{ном}, А$	250
$I_{ном min} \leq I_{ном} \leq I_{ном max}, А$	$(0,2...1,3)I_{ном}$
$\Delta P, Вт$	695
$t_n, сек$	10-40

Цей пристрій поєднує функції запуску, гальмування та захисту двигуна дробарки КМД 2200. Він дозволяє підтримувати стабільний обертовий момент під час розгону і уповільнення, суттєво зменшуючи динамічні навантаження. Крім того, є можливість налаштовувати пусковий момент і час розгону, а також використовувати обвідний контактор для закорочення схеми після завершення

запуску при збереженні електронного захисту, що реалізується функцією «байпас».

В умовах складного технологічного навантаження, яке безсумнівно мають дробарки КМД 2200 на дробильній фабриці, модель Altistart 48 може здійснювати запуск з чотирикратним номінальним струмом протягом 48 секунд або з трикратним номінальним струмом протягом 90 секунд при пуску з холодного стану, що відповідає безперервному режиму S1. У випадку режиму з повторно-короткочасним навантаженням S4 допускається запуск з чотирикратним струмом протягом 25 секунд за умов тривалості включення 50% і п'яти пусків на годину.

Принцип дії базується на безконтактному управлінні напругою без застосування зворотного зв'язку. Схематичне зображення роботи тиристорного пускача ATS 48C32Y показано на рис. 1.2, тобто бачимо, що це схема ТРН-АД.

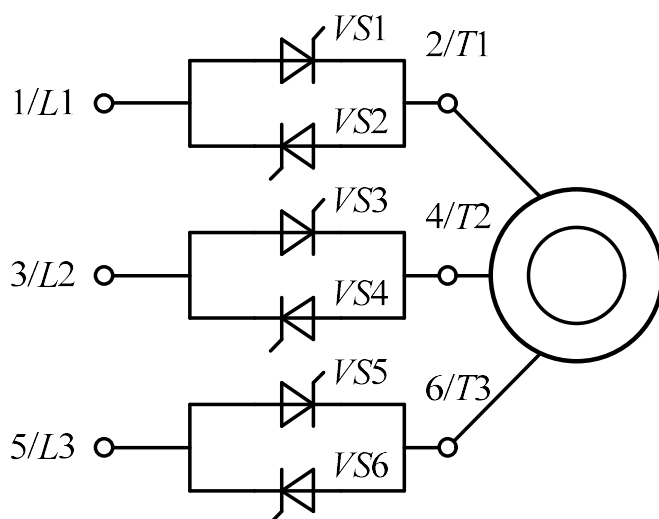


Рисунок 1.2 – Схема перетворювача у пристрої плавного пуску ATS 48C32Y

У регуляторі напруги, що застосовується для запуску електродвигуна конусної дробарки КМД 2200, передбачено шість тиристорів, які виконують функцію керованих перемикачів. Зміна фазної напруги на обмотках двигуна відбувається шляхом регулювання кута відкриття тиристорів, що забезпечує поступове підвищення напруги від заданого мінімального рівня до номінального значення мережі живлення. Це дозволяє точно керувати пусковим моментом та обмежити струм, що виникає під час запуску. Такий тип пристрою

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

повністю відповідає вимогам щодо електричних і механічних характеристик пуску і може працювати як у двофазному, так і в трифазному режимі керування напругою.

Під час запуску напруга на виході тиристорного регулятора змінюється відповідно до закладеної в пристрої програми, яку задає оператор, визначаючи початкову величину напруги та тривалість її підвищення до номінального рівня. Окрім плавного розгону, пристрій забезпечує функцію обмеження пускового струму, яка реалізується шляхом контролю рівня напруги впродовж пуску двигуна.

На схемі, зображеній на рис. 1.3, показано підключення пристрою плавного пуску без реверсування двигуна за допомогою мережевого контактора.

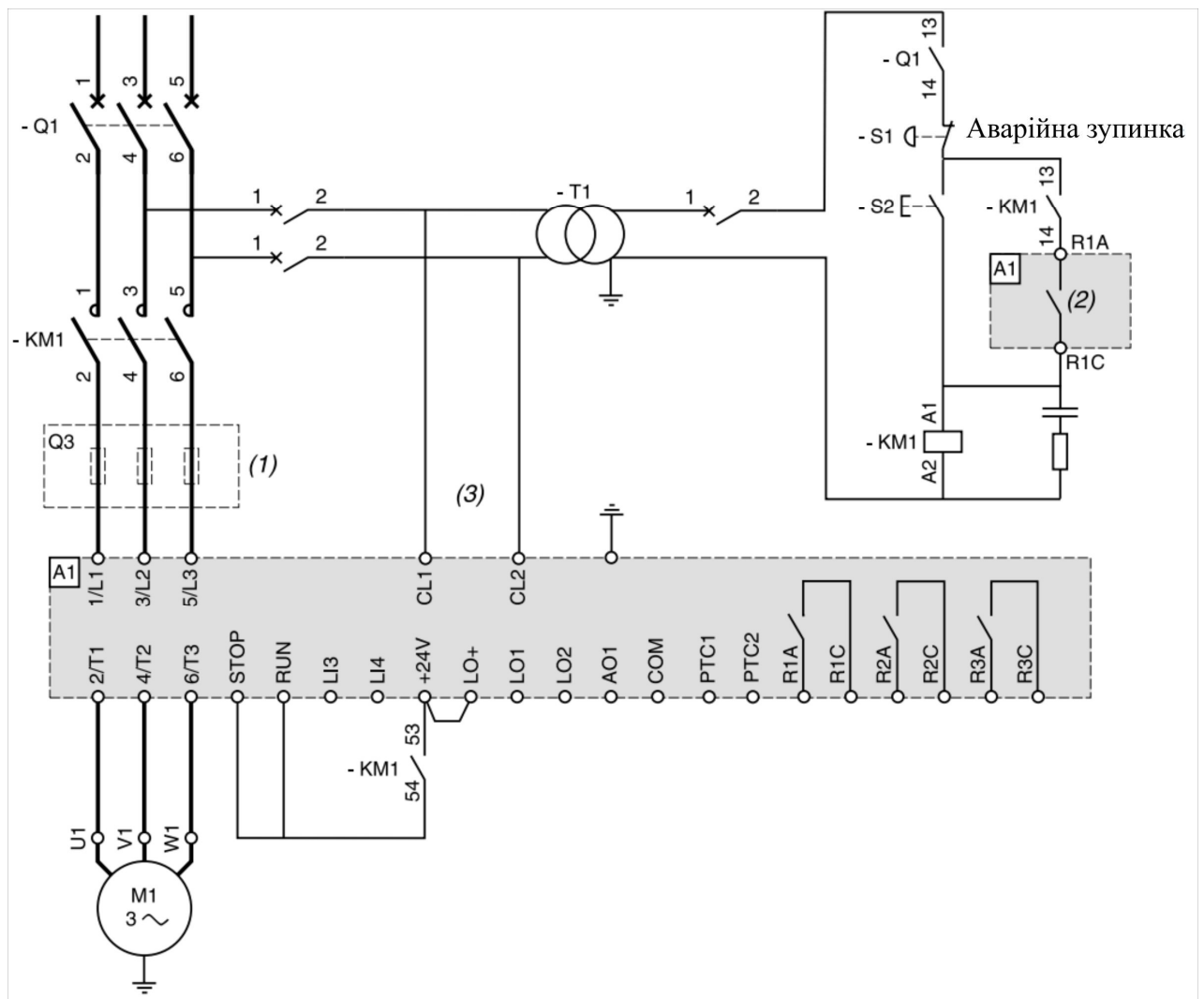


Рисунок 1.3 – Схема плавного пуску привода дробарки КМД 2200

Основні елементи: пускач А1, автомат Q1, запобіжники UR Q3, контактор КМ1, кнопки S1 та S2, а також ізоляційний трансформатор Т1.

Алгоритм роботи схеми наступний: при натисканні кнопки S2 струм подається на котушку контактора КМ1 через трансформатор Т1, контакт Q1 і контакт S1. Живлення поступає через клеми 2 і 3. У результаті контактор спрацює і замикає свої силові контакти, підключаючи пускач А1 до мережі. Одночасно замикається блокувальний контакт контактора, який шунтує кнопку S2, тож її можна відпустити, а живлення буде підтримуватись через блок-контакт. Для зупинки роботи достатньо натиснути кнопку S1, що розірве ланцюг живлення котушки, вимкне контактор і розімкне як силове коло, так і блокувальний контакт. Оскільки кнопка S2 є нормально розімкненою, система залишиться знеструмленою. Захист від перевантаження забезпечується автоматичним вимикачем Q1, який при спрацюванні розриває керуюче коло. Додатковий захист від струмових перевантажень реалізується запобіжниками UR Q3 та тиристорним регулятором А1.

Виводи пристрою плавного пуску А1 мають певне функціональне призначення, яке узагальнено у табл. 1.4. Під час запуску електродвигуна, що приводить у дію конусну дробарку КМД 2200, доцільним є використання режиму обмеження початкової напруги з подальшим її поступовим підвищенням до рівня номінального значення, як показано на рис. 1.4. Такий підхід дозволяє забезпечити контроль над пусковим обертовим моментом, який прямо залежить від квадрата прикладеної напруги. Тривалість збільшення напруги на виводах двигуна встановлюється в межах від 10 до 40 секунд, що сприяє плавному розгону електропривода без надмірних динамічних навантажень.

Таблиця 1.4. Функції виводів ATS 48C32Y

Клемма	Функція
1L1, 3L2, 5L3	Живлення
2T1, 4T2, 6T3	Двигун
CL1, CL2	Керування

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

R1A, R1C	Програмований контакт
R2A, R2C	Пускове реле
R3A, R3C	Програмований контакт
STOP	Стоп керування
RUN	Запуск керування
LI3, LI4	Програмовані входи
24 V	Живлення входів
LO+	Живлення виходів
LO1, LO2	Програмовані входи
AO1	Аналоговий вихід
COM	Точка загального потенціалу
PTC1. PTC2	Годинник
RJ-45	Modbus RS-485

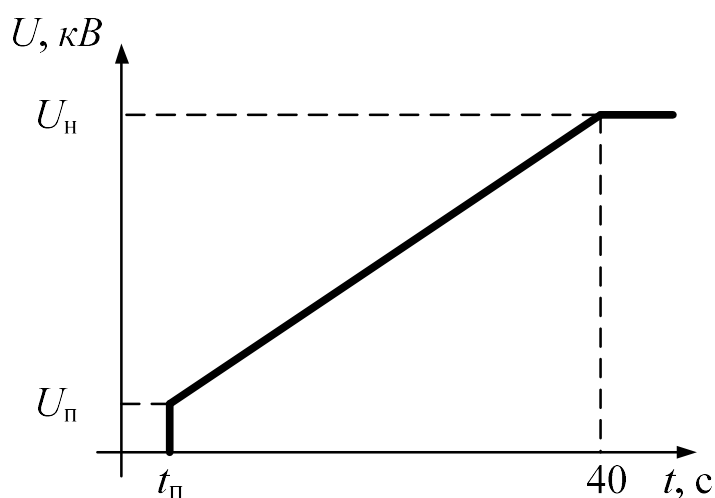


Рисунок 1.4 – Плавний пуск з обмеженням стартової напруги

Початковий рівень напруги при запуску двигуна конусної дробарки КМД 2200 зазвичай встановлюється в діапазоні від 10 до 50 відсотків від номінального значення U_n , з можливістю збільшення до 80 відсотків. Це налаштування визначає величини стартового струму і моменту. Якщо початкова напруга встановлена надто високо, це може призвести до ударних навантажень і суттєвого стрибка пускового струму, навіть у випадку, коли обмеження струму

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

задано на мінімальному рівні, адже в цьому режимі пріоритет надається саме напрузі, а не струму. У випадку надто низького стартового значення може виникнути затримка перед початком обертання вала електродвигуна. Загалом, необхідно вибрати таке значення, яке забезпечить негайний початок обертання після подачі команди на пуск.

Висновки до розділу

У першому розділі наведено загальну характеристику дробильного виробництва, що функціонує на підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Розглянуто технологічну схему дробильної фабрики з описом основних потоків транспортування сировини та встановленого обладнання. Детально описано принцип дії конусної дробарки дрібного дроблення, подано технічні характеристики дробарки моделі КМД 2200, її зовнішній вигляд і конструктивні особливості. Проведено розрахунок приблизної потужності електродвигуна для приводу дробарки, на основі якого обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна. Також виконано підбір відповідного пристрою для реалізації плавного пуску.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 2. ВИБІР СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА І РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>						
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Вибір системи електропривода і розрахунок статичних характеристик</i>			<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>	
<i>Розроб.</i>		<i>Москаленко Д.С.</i>							<i>Н</i>	<i>22</i>	
<i>Перевір.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>						<i>ЕЕМ-22ск</i>			
<i>Н.контр.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>									
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>									

2.1 Схеми заміщення двигуна дробарки КМД 2200

Для приводу конусної дробарки КМД 2200, що розглядається у пункті 1.3, обрано спеціалізований асинхронний трифазний електродвигун типу АКЗ-13-52-12 з фазним ротором, основні номінальні характеристики якого подані в табл. 1.2.

Для проведення повного аналізу та розрахунку параметрів електропривода асинхронного двигуна, який застосовується для приводу конусної дробарки типу КМД 2200, необхідно послідовно визначити основні електромеханічні характеристики через визначення параметрів заступної схеми (рис. 2.1).

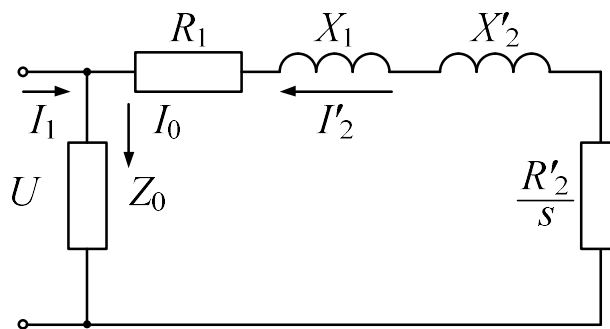


Рисунок 2.1 –Г-подібна заступна схема двигуна дробарки КМД

$$U_{1\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{6 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 3,464 \cdot 10^3 \text{ В.} \quad (2.1)$$

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{250 \cdot 10^3}{3 \cdot 3,464 \cdot 10^3 \cdot 0,76 \cdot 0,923} = 34,294 \text{ А.} \quad (2.2)$$

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ном}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 490}{30} = 51,313 \text{ с}^{-1}. \quad (2.3)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 500}{30} = 52,36 \text{ с}^{-1}. \quad (2.4)$$

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{250 \cdot 10^3}{51,313} = 4872 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (2.5)$$

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{52,36 - 51,313}{52,36} = 0,02. \quad (2.6)$$

$$M_{кр} = \lambda_{max} \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 4872 = 10720 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7)$$

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right) = 0,02 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,083. \quad (2.8)$$

Для побудови природної електромеханічної характеристики двигуна дробарки КМД 2200 необхідно провести розрахунок додаткових параметрів. Особливу увагу слід приділити таким величинам, як струм намагнічування, приведений струм ротора:

$$I_{0ном} = I_{1ном} \left[\sin \varphi_{ном} - \frac{s_{ном}}{s_{кр}} \cdot \cos \varphi_{ном} \right] = 34,294 \left[0,65 - \frac{0,02}{0,083} \cdot 0,76 \right] = 16,022 \text{ А}.$$

$$\text{де } \sin \varphi_{ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ном}} = \sqrt{1 - 0,76^2} = 0,65.$$

$$\frac{I'_{2ном}}{I_{1ном}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_{0ном}}{I_{1ном}} \right)^2 - 2 \left(\frac{I_{0ном}}{I_{1ном}} \right) \sin \varphi_{ном}} = \sqrt{1 + \left(\frac{16,022}{34,294} \right)^2 - 2 \frac{16,022}{34,294} 0,65} = 0,782.$$

$$I'_{2ном} = 0,782 \cdot I_{1ном} = 0,782 \cdot 34,294 = 26,806 \text{ А}. \quad (2.9)$$

Далі переходимо до обчислень активного та реактивного опорів обмоток двигуна дробарки КМД 2200.

Приведений активний опір ротора двигуна дробарки КМД 2200:

$$R'_{2ном} = \frac{M_{ном} \cdot \omega_0 \cdot s_{ном}}{3(I'_{2ном})^2} = \frac{4872^2 \cdot 52,36 \cdot 0,02}{3 \cdot 26,806^2} = 2,367 \text{ Ом}. \quad (2.10)$$

Для виконання подальших розрахунків треба отримати кратність пускового моменту, так як її немає в паспортних даних. Визначити приблизну кратність можемо через формулу Клосса:

$$M_n = \frac{2M_{кр}}{\frac{s_n}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_n}} = \frac{2 \cdot 10720}{\frac{1}{0,083} + \frac{0,083}{1}} = 1771 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Звідки:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\lambda_n = \frac{M_n}{M_{ном}} = \frac{1771}{4872} = 0,364. \quad (2.11)$$

Пусковий коефіцієнт потужності двигуна дробарки КМД 2200:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_n &= \cos \varphi_{ном} \left[\frac{\lambda_n}{\lambda_I} \cdot \frac{\eta_{ном}}{1 - s_{ном}} + \lambda_I \cdot g(1 - \eta_{ном}) \right] = \\ &= 0,76 \left[\frac{0,364}{4} \cdot \frac{0,932}{1 - 0,02} + 4 \cdot 0,25(1 - 0,923) \right] = 0,124. \end{aligned}$$

де $g = \frac{\Delta P_M}{\Delta P_H} = 0,25 \dots 0,4$.

Повний опір короткого замикання двигуна або ж при самому КЗ, або ж у пусковому режимі, коли ковзання максимально:

$$Z_{кз} = \frac{U_{1\phi}}{I_{ном} \left(\lambda_I - \frac{I_{0ном}}{I_{1ном}} \right)} = \frac{3,464 \cdot 10^3}{34,294 \left(4 - \frac{16,022}{34,294} \right)} = 28,593 \text{ Ом}. \quad (2.12)$$

Активний опір статора двигуна дробарки КМД 2200:

$$\begin{aligned} R_1 &= Z_{кз} \cdot \cos \varphi_n - \sigma_1 \cdot R'_{2ном} = \\ &= 28,593 \cdot 0,124 - 1,058 \cdot 2,367 = 1,028 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

де:

$$\sigma_1 = 1 + \frac{I_{0ном}}{2 \cdot I_n} = 1 + \frac{16,022}{2 \cdot 137,174} = 1,058. \quad (2.14)$$

де $I_n = \lambda_I \cdot I_{ном} = 4 \cdot 34,294 = 137,174 \text{ А}$.

Індуктивний опір статора двигуна дробарки КМД 2200:

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1 \cdot R'_{2ном}}{s_{max}} \right)^2 - R_{2ном}^2} = \sqrt{\left(\frac{1,058 \cdot 2,367}{0,083} \right)^2 - 2,367^2} = 33,019 \text{ Ом}.$$

Індуктивність статора двигуна дробарки КМД 2200:

$$L_1 = \frac{x_1}{2\pi f} = \frac{33,019}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,096 \text{ Гн}.$$

Індуктивний опір КЗ двигуна дробарки КМД 2200:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$x_{\kappa} = Z_{\kappa 3} \cdot \sin \varphi_n = Z_{\kappa 3} \cdot \sqrt{1 - \cos \varphi_n} = 28,593 \cdot 0,992 = 28,374 \text{ Ом.}$$

Або:

$$x_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{R'_{2\text{ном}}}{s_{\kappa p}}\right)^2 - R_1^2} = \sqrt{\left(\frac{2,367}{0,083}\right)^2 - 1,028^2} = 28,432 \text{ Ом.}$$

Або:

$$x_{\kappa} = \frac{R'_{2\text{ном}}}{s_{\kappa p}} = \frac{2,367}{0,083} = 28,45 \text{ Ом.}$$

Як можна помітити, отримані результати демонструють лише незначну різницю між собою, що свідчить про достатню точність розрахунків і правильність застосованих методик для аналізу параметрів електроприводу дробарки типу КМД 2200.

2.2 Статичні характеристики (природні) двигуна дробарки КМД 2200

Для побудови природної механічної характеристики $s = f(M)$ для асинхронного двигуна, що використовується у дробарці типу КМД 2200, звернемося до графічного представлення цієї залежності, яка показано на рис. 2.2. Оскільки потужність АКЗ-13-52-12 перевищує 5 кВт, це дає підстави застосувати формуле Клосса, що дозволяє наближено, але досить точно описати в робочому діапазоні механічну характеристику АД.

$$M(s) = \frac{2M_{\kappa p}}{\frac{s}{s_{\kappa p}} + \frac{s_{\kappa p}}{s}}. \quad (2.15)$$

З графіка, поданого на рис. 2.2, можна зробити висновок, що робоча частина механічної характеристики АД, яка відповідає значенням ковзання, меншим за критичне, має високу жорсткість. Причому модуль цієї жорсткості залишається майже незмінним, поки момент АД не досягає номінального значення. Коли ж навантаження перевищує номінальний момент, але ще не

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

досягає критичного, жорсткість поступово знижується. У точці, коли ковзання дорівнює критичному значенню, жорсткість стає рівною нулю. Подальше зростання ковзання призводить до падіння електромагнітного моменту.

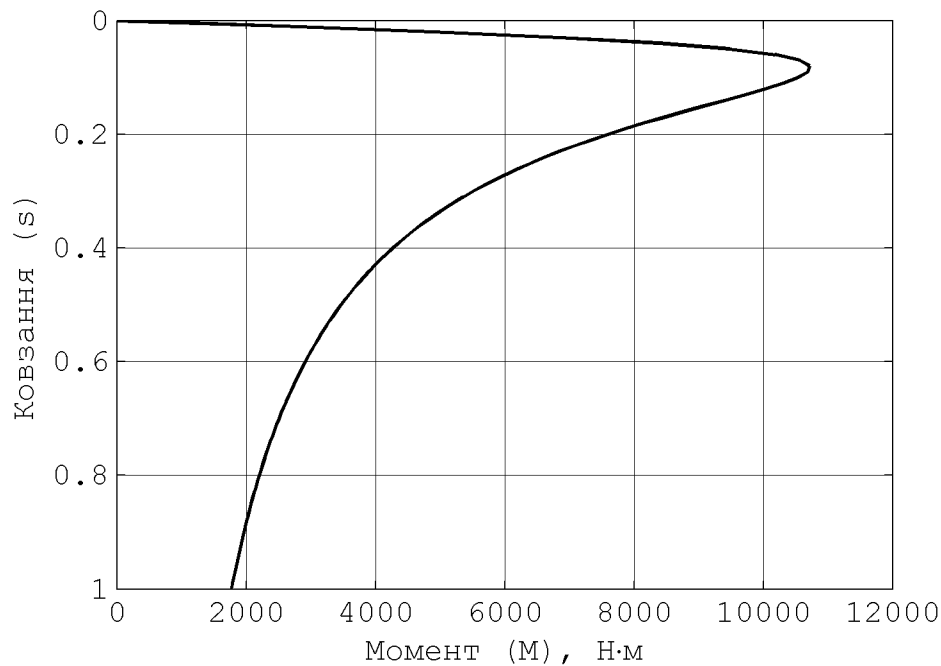


Рисунок 2.2 – Механічна характеристика (природна) двигуна АКЗ-13-52-12

Щоб побудувати природну електромеханічну характеристику $s = f(I'_{2ном})$ (рис. 2.3) для АКЗ-13-52-12 дробарки КМД 2200, звернемося до аналітичного виразу:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2ном}}{s}\right)^2 + x_k^2}}. \quad (2.16)$$

У режимі роботи двигуна АКЗ, коли ковзання перевищує нуль, тобто $s > 0$, спостерігається поступове зростання струму в обмотці ротора. У міру збільшення навантажувального моменту це зростання є монотонним, і при подальшому наближенні ковзання до нескінченності струм ротора прагне до певного граничного значення:

$$I'_{2.меж} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} = \frac{3464}{\sqrt{1,028^2 + 28,432^2}} = 121,76 \text{ А}. \quad (2.17)$$

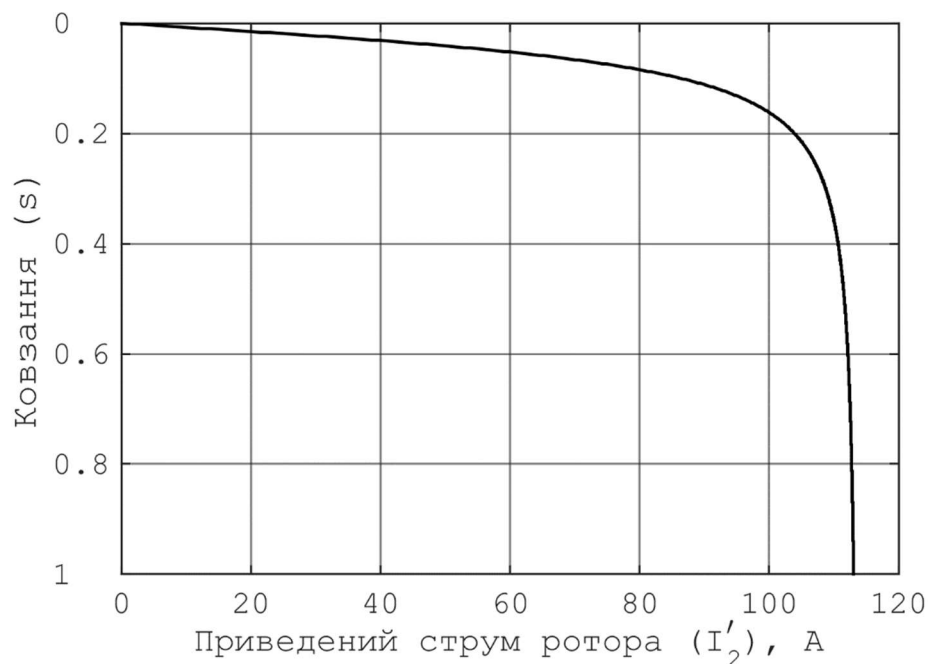


Рисунок 2.3 - Електромеханічна характеристика (природна) двигуна АКЗ-13-52-12

З аналізу поданих графіків видно, що при запуску АКЗ-13-52-12, встановленого на дробарці типу КМД 2200, шляхом прямого підключення обмотки статора до мережі з номінальною напругою при частоті живлення 50 Гц, спостерігаються незадовільні показники струму та моменту при старті. Такий спосіб пуску створює значне навантаження на електромережу та не забезпечує достатнього моменту для ефективного розгону. У зв'язку з цим доцільно розглянути альтернативні варіанти запуску, зокрема реостатний, а також плавний на зниженій напрузі.

2.3 Характеристики при реостатному пуску двигуна дробарки КМД 2200

Щоб здійснити ефективний пуск асинхронного двигуна з фазним ротором, який застосовується в дробарці типу КМД 2200, необхідно забезпечити підвищення пускового моменту при одночасному зменшенні пускового струму. Для досягнення цього в ланцюг ротора вводять додатковий активний опір, що дозволяє оптимізувати процес запуску.

Такий підхід не впливає на величину максимального моменту, який здатен розвивати двигун, однак змінює значення критичного ковзання, що дозволяє змістити точку досягнення цього моменту ближче до пускового режиму і забезпечити більш плавний розгін без перевантаження мережі:

$$s_{кр} = \frac{R'_2 + R'_{2Д}}{X_{\kappa}}, \quad (2.18)$$

де $R'_{2Д}$ – додатковий приведений до статора опір, увімкнений у коло ротора.

Введення додаткового опору в ланцюг ротора двигуна АКЗ-13-52-12 конусної дробарки КМД-2200 збільшує загальний опір роторного кола, що призводить до зменшення пускового струму та зростання коефіцієнта потужності $\cos \phi_2$. Це сприяє підвищенню активної складової струму ротора та збільшенню пускового моменту. Усі механічні характеристики при різних опорах сходяться в точці холостого ходу $s=0$, що відповідає швидкості обертання магнітного поля статора, при цьому жорсткість робочої ділянки характеристики знижується пропорційно загальному опору $R_2 + R_{од}$.

Процес пуску починається з введення максимального додаткового опору $R_{1од}$. При досягненні певної швидкості обертання, коли електромагнітний момент наближається до моменту опору, відбувається ступінчасте шунтування пускового резистора через контактори. Це переводить двигун на нову характеристику з меншим опором ($R_{2од}$), що збільшує момент і прискорює розгін. Подальше закорочування решти ступенів резистора дозволяє двигуну плавно перейти на природну електромеханічну характеристику, що відповідає роботі без додаткових опорів.

У процесі розрахунку пускових характеристик АКЗ-13-52-12, приймають за основу певне значення моменту M_1 . Це значення визначає момент, при якому здійснюється перемикання між окремими ступенями пускового реостата. У свою чергу, пусковий момент наступної стадії M_2 становить:

$$M_2 = \lambda' M_1.$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\text{Тут } \lambda' = \sqrt[m+1]{\frac{1}{s_n(M_1/M_n)}} = \sqrt[4]{\frac{1}{0,02 \cdot 0,7}} = 2,9. \quad m \text{ використовується для}$$

визначення кількості ступенів, які передбачені у схемі пуску електродвигуна, що застосовується в дробарці КМД 2200.

Отже:

$$M_2 = 2,9 \cdot 0,7 M_n = 2 M_n.$$

Побудова пускових механічних характеристик для електродвигуна, встановленого у дробарці типу КМД 2200, виконується з припущенням, що на ділянці від нульового моменту до певного значення моменту, який визначає межу робочої зони, форма характеристик є лінійною. Початкову пускову пряму, що відповідає повному підключенню пускового резистора до роторного кола, формують шляхом з'єднання початкової точки з ковзанням $s=0$ і моментом $M=0$ з точкою, де $s=1$, а момент дорівнює значенню M_2 . У межах цієї характеристики двигун прискорюється до такого значення ковзання, при якому відбувається перетин з горизонтальною лінією, що відповідає моменту M_1 , який служить сигналом для перемикання на наступний режим.

Після досягнення цієї точки частина пускового резистора вимикається із схеми за допомогою контактора, і двигун починає працювати відповідно до другої пускової характеристики. Для її побудови з'єднують точку, знайдену на лінії пікових моментів M_2 , з точкою, що відповідає режиму холостого ходу. Аналогічно формується третя пускова характеристика для подальшого етапу пуску.

Для точного визначення параметрів пускового резистора необхідно виконати аналітичний розрахунок кожного ступеня.

Номінальний опір ротора, який є вихідною величиною для подальшого визначення величин додаткових опорів:

$$R_{2n} = \frac{E_{2n \text{ лін}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2n}} = \frac{525}{\sqrt{3} \cdot 295} = 1,027 \text{ Ом.}$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Значення опору для третьої ступені пускового резистора визначається як найменше і відповідає заключному етапу зменшення опору в роторному колі:

$$R_{3\partial\partial\partial} = R_{2н} s_n (\lambda' - 1) = 1,027 \cdot 0,02 (2,9 - 1) = 0,039 \text{ Ом.}$$

Опір другої ступені, відповідно, є середнім за величиною і використовується на проміжному етапі розгону двигуна:

$$R_{2\partial\partial\partial} - R_{3\partial\partial\partial} = R_{3\partial\partial\partial} \lambda' = 0,039 \cdot 2,9 = 0,114 \text{ Ом.}$$

Опір першої ступені є найбільшим, адже саме з нього починається пуск, і він забезпечує максимальне обмеження пускового струму:

$$R_{1\partial\partial\partial} - R_{2\partial\partial\partial} = (R_{2\partial\partial\partial} - R_{3\partial\partial\partial}) \lambda' = 0,114 \cdot 2,9 = 0,331 \text{ Ом.}$$

Загальний додатковий опір утворюється як сума опорів усіх трьох ступенів і застосовується на початку пуску для забезпечення м'якого старту двигуна при максимальному ковзанні:

$$R_{\partial\partial\partial} = 0,331 + 0,114 + 0,039 = 0,484 \text{ Ом.}$$

Пускова діаграма показана на рис. 2.4.

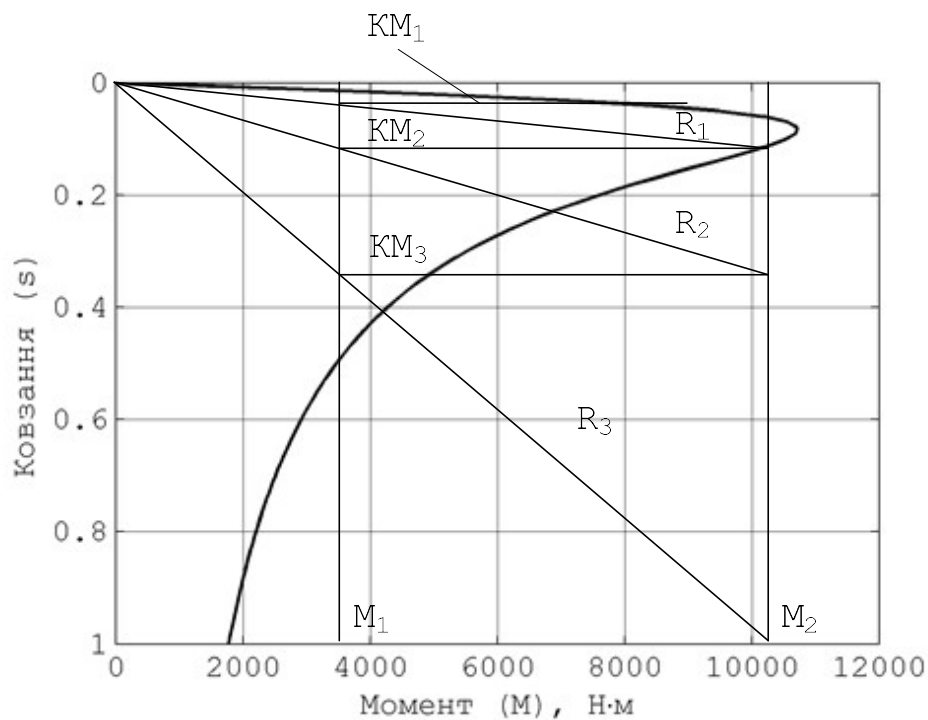


Рисунок 2.4 - Механічна характеристика дробарки КМД 2200 при реостатному пуску

У попередньому розділі було розглянуто доцільність використання системи, що базується на тиристорному регуляторі напруги, з метою забезпечення плавного запуску електродвигуна. Для того щоб оцінити ефективність такого підходу порівняно з традиційним реостатним пуском, проаналізуємо статичні характеристики електродвигуна, який використовується у приводі конусної дробарки типу КМД 2200, при умовах змінної напруги живлення. Такий аналіз дає змогу виявити переваги або недоліки кожного з методів пуску з урахуванням реальних умов експлуатації обладнання.

2.4 Характеристики плавного пуску привода дробарки КМД 2200 по схемі ТРН-АД

Характер вигляду механічних характеристик при застосуванні системи ТРН-АД для пуску дробарки КМД 2200, визначається тим, що синхронна швидкість ω_0 обертання залишається сталою, оскільки вона залежить лише від частоти живлення, яка в даному випадку не змінюється. Також у разі якщо двигун не перебуває в режимі магнітного насичення, критичне значення моменту $M_{кр} \approx \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2\omega_0 \cdot X_k}$ змінюється пропорційно до квадрата прикладеної напруги. Додатково враховують, що критичне ковзання $s_{кр} \approx \frac{R'_2}{X_k}$ зберігає своє значення незалежно від рівня напруги.

Для побудови більш механічних характеристик ТРН-АД доцільно скористатися формулою, яка враховує залежність моменту від змінної напруги в системі тиристорного регулювання:

$$M(s) = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 R'_{2ном}}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2ном}}{s} \right)^2 + x_k^2 \right]}, \quad (2.19)$$

З графіка, наведеного на рис. 2.5, стає очевидним, що штучно сформовані характеристики, отримані за допомогою тиристорної системи керування

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

напругою АКЗ-13-52-12, мають обмежену практичну ефективність для зміни швидкості обертання. Це пояснюється тим, що при зниженні напруги критичний момент помітно зменшується, а разом з ним істотно погіршується здатність двигуна працювати в режимі перевантаження. Діапазон зміни швидкості є вкрай обмеженим, оскільки регулювання виконується лише в бік зменшення від номінальної швидкості.

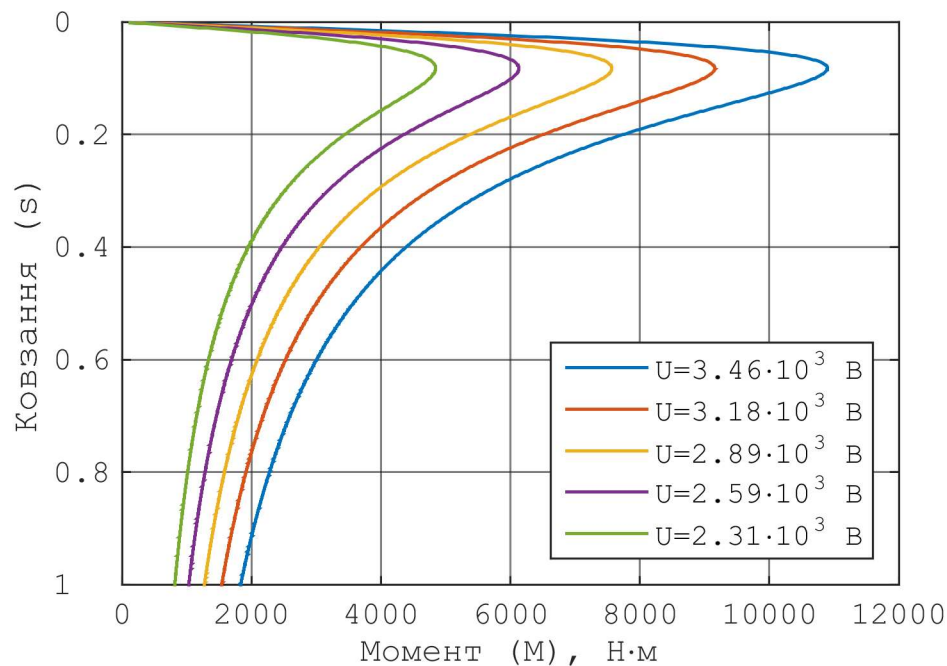


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики ТРН-АД приводу дробарки КМД 2200

Для побудови електромеханічних характеристик використовується формула, що дозволяє обчислити приведений струм ротора, враховуючи дію змінної напруги на параметри електричного кола:

$$I'_2(s) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2ном}}{s}\right)^2 + x_\kappa^2}}. \quad (2.20)$$

З аналізу залежностей з рис. 2.6, видно, що протягом майже всього діапазону зміни ковзання від максимальної величини до нульової значення струму залишається значно нижчим за пусковий струм. Лише в безпосередній

близькості до номінального ковзання струм починає знижуватись до свого номінального рівня.

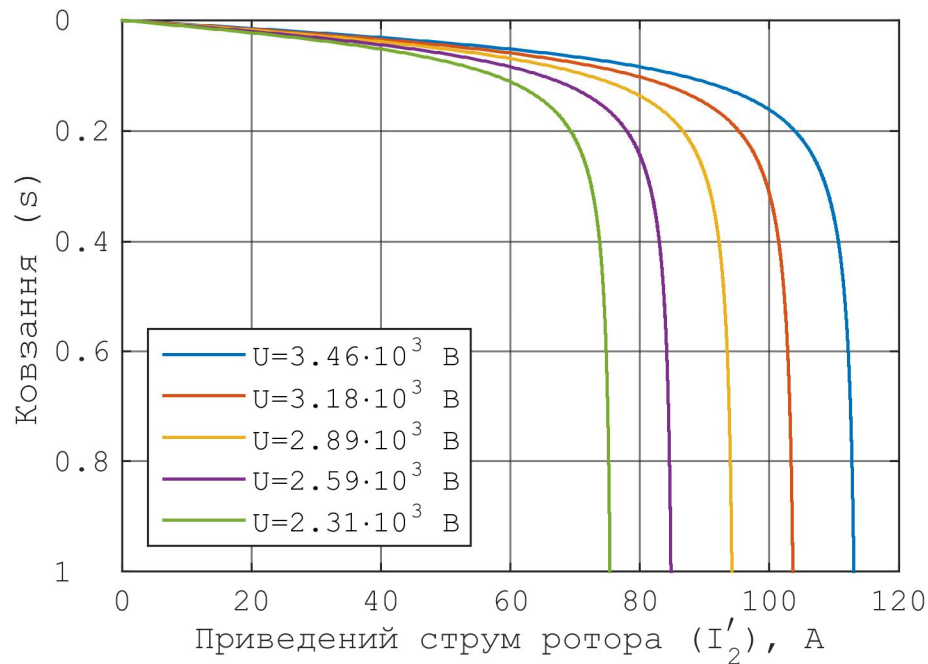


Рисунок 2.6 – Електромеханічні характеристики ТРН-АД приводу дробарки КМД 2200

Така поведінка характерна для АД, що працює в умовах тиристорного регулювання напруги.

2.5 Електричні втрати при пуску приводу дробарки КМД 2200

Щоб виконати розрахунок електричних втрат у системі пуску двигуна дробарки КМД 2200, спочатку потрібно встановити значення ковзання, при яких відбувається перехід з однієї пускової характеристики на наступну. Згідно з даними, що представлені на діаграмі пуску на рис. 2.4, перше перемикання має відбутися при ковзанні, що дорівнює 0,333. Наступний перехід повинен відбуватися вже при ковзанні 0,12, а третій – при значенні 0,04. Враховуючи ці дані, можна перейти до подальших розрахунків, які дозволять визначити втрати електроенергії в процесі пуску двигуна.

$$s_{n1} = 0,333,$$

$$s_{n2} = 0,12,$$

$$s_{n3} = 0,04.$$

Наступні етапи розрахунку проводяться з урахуванням фактичних значень опору роторного кола електродвигуна, що працює у приводі конусної дробарки КМД 2200.

Втрати електричної енергії під час реостатного пуску на першій характеристиці:

$$\begin{aligned}\Delta A_{n1} &= \frac{J\omega_0^2}{2}(1-s_{n1}^2)\left(1+\frac{R_1}{R'_{2ном}+r_1+r_2+r_3}\right)\frac{M_{cp}}{M_n-M_{cp}}= \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2}(1-0,33^2)\left(1+\frac{1,028}{2,367+0,484+0,114+0,039}\right)\frac{4397,9}{4872-4397,9}= \\ &= 6388 \text{ КДж},\end{aligned}$$

Втрати електроенергії на другій пусковій характеристиці:

$$\begin{aligned}\Delta A_{n2} &= \frac{J\omega_0^2}{2}(s_{n1}^2-s_{n2}^2)\left(1+\frac{R_1}{R'_{2ном}+r_2+r_3}\right)\frac{M_{cp}}{M_n-M_{cp}}= \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2}(0,33^2-0,12^2)\left(1+\frac{1,028}{2,367+0,114+0,039}\right)\frac{4397,9}{4872-4397,9}= \\ &= 710,6 \text{ КДж}.\end{aligned}$$

Втрати електроенергії на третій пусковій характеристиці:

$$\begin{aligned}\Delta A_{n3} &= \frac{J\omega_0^2}{2}(s_{n2}^2-s_{n3}^2)\left(1+\frac{R_1}{R'_{2ном}+r_3}\right)\frac{M_{cp}}{M_n-M_{cp}}= \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2}(0,12^2-0,04^2)\left(1+\frac{1,028}{2,367+0,039}\right)\frac{4397,9}{4872-4397,9}= \\ &= 97,6 \text{ КДж}.\end{aligned}$$

Втрати електроенергії на механічній характеристиці (природній):

$$\begin{aligned}\Delta A_{n4} &= \frac{J\omega_0^2}{2}s_{n3}^2\left(1+\frac{R_1}{R'_{2ном}}\right)\frac{M_{cp}}{M_n-M_{cp}}= \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2}0,04^2\left(1+\frac{1,028}{2,367}\right)\frac{4397,9}{4872-4397,9}=12,3 \text{ КДж}.\end{aligned}$$

Після завершення пускового процесу двигун переходить у сталий режим роботи, де ці втрати стають відносно стабільними.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Загальні електричні втрати, які супроводжують увесь процес пуску за допомогою реостатної схеми:

$$A_{n.p.} = 6388 + 710,6 + 97,6 + 12,3 = 7208,5 \text{ КДж},$$

що у кВт·год:

$$A_{n.p.} = \frac{7208,5}{3,6} = 2002,36 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Щоб порівняти ефективність різних способів розгону АКЗ-13-52-12 розрахуємо втрати при прямому і плавному пуску.

Прямий пуск:

$$\begin{aligned} A_{n.пр.} &= \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2ном}} \right) \frac{M_{cp}}{M_n - M_{cp}} = \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2} \left(1 + \frac{1,028}{2,367} \right) \frac{4397,9}{4872 - 4397,9} = 7660 \text{ КДж}. \end{aligned}$$

Або у кВт·год:

$$A_{n.пр.} = \frac{7660}{3,6} = 2127,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Плавний пуск:

$$\begin{aligned} A_{n.пл.} &= \frac{J\omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R'_{2ном}} \right) \frac{M_{cp}}{M_n - M_{cp}} = \\ &= \frac{420 \cdot 52,36^2}{2} \left(1 + \frac{1,028}{2,367} \right) \frac{3822,4}{4872 - 3822,4} = 3007 \text{ КДж}. \end{aligned}$$

Або у кВт·год:

$$A_{n.пл.} = \frac{3007}{3,6} = 835,28 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Результати розрахунків свідчать про те, що найбільші енергетичні втрати спостерігаються у разі прямого підключення електродвигуна до мережі. Використання реостатного пуску для двигуна, встановленого на дробарці КМД

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2200, забезпечує зменшення втрат електроенергії на $125,44 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.
Найефективнішим з точки зору енергозбереження виявляється запуск за допомогою тиристорного регулятора напруги, що забезпечує плавний розгін. У порівнянні з прямим способом, плавний пуск дозволяє зменшити витрати на $1292,52 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а у порівнянні з реостатним – на $1167,08 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто модель двигуна дробарки КМД 2200 та проведено обчислення відсутніх параметрів його схеми заміщення. Здійснено побудову механічної та електромеханічної характеристик (природних), а також отримано такі ж характеристики (штучні) для системи тиристорного регулювання напруги, яка використовується з метою плавного запуску двигуна. З метою порівняння прорахований реостатний спосіб пуску. Визначено величини електричних втрат, що виникають у двигуні залежно від способу запуску. На основі результатів аналізу зроблено висновок про те, що найбільш ефективним з погляду енергозбереження є застосування системи пуску з задіянням тиристорного регулятора напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 3. ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Москаленко Д.С.</i>			<i>Динамічні характеристики системи електропривода</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>				<i>Н</i>	<i>38</i>	
						<i>ЕЕМ-22ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Барановська М.Л.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Модель двигуна дробарки КМД 2200

Прямий пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором характеризується виникненням значних електромагнітних моментів та струмів. Такі великі імпульси електромагнітного моменту можуть створювати небезпечні динамічні навантаження на обмотки електродвигуна, а також механічні навантаження частин кінематичної схеми. У межах побудови моделі асинхронного двигуна розглядається реалізація прямого пуску на частоті 50 Гц.

Другий закон Кірхгофа лежить в основі рівнянь рівноваги електрорушійної сили в обмотках статора і ротора:

$$\begin{aligned} U_A &= R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \quad U_a = R_a \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \\ U_B &= R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \quad U_b = R_b \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, \\ U_C &= R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}, \quad U_c = R_c \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

де U_A, U_B, U_C – статор; U_a, U_b, U_c – ротор.

У рівняннях (3.1) розглядаються миттєві значення напруг, струмів, потокозчеплень статора і ротора, а також активні опори їх обмоток. Як правило, обмотки виготовляються симетричними, тому активні опори фаз обмотки статора є рівними між собою та позначаються R_s , а для роторної обмотки – R_r . У цьому контексті КМД приймає до уваги такі допущення. Також застосовується закон Ампера, який встановлює залежність між потокозчепленнями обмоток і струмами, що протікають у них. Цей закон стосується як статора, так і ротора:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c, \\ \Psi_B &= L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c, \\ \Psi_C &= L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c. \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Psi_a &= L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c, \\ \Psi_b &= L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c, \\ \Psi_c &= L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Крім того, в аналізі двигуна КМД важливу роль відіграє ще один фундаментальний закон – другий закон Ньютона, який описує рівновагу моментів, що діють на вал машини:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \quad (3.4)$$

Завершальним законом, що формує основу аналізу електромеханічних процесів у системі КМД, є закон Ленца:

$$M = k(\bar{\Psi} \cdot \bar{i}). \quad (3.5)$$

Варто одразу зауважити, що, попри повний і строгий математичний опис, застосування рівнянь (3.1–3.5) для аналізу двигуна дробарки КМД 2200 вельми складне.

Щоб зменшити складність математичного опису асинхронної машини дробарки КМД 2200, як і всіх машин змінного струму, застосовується метод просторового вектора:

$$\bar{i} = (2/3)(i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C) \quad (3.6)$$

де $\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$; $i_A = I_m \cdot \cos \omega t$, $i_B = I_m \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3)$, $i_C = I_m \cdot \cos(\omega t + 2\pi/3)$.

Якщо підставити миттєві значення струмів у рівняння (3.6):

$$\bar{i}_s = \frac{2}{3} \cdot I_m \left(\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t}. \quad (3.7)$$

Після проведення попередніх перетворень можна перейти до спрощення системи рівнянь. Перетворюємо рівняння (3.1) до просторових векторів:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} \\ \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} \\ \bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m(\theta) \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= L_m(\theta) \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R \end{aligned} \right\}, \quad (3.8)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Перепишемо рівняння (3.8) в єдиній системі координат, яка обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k :

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \omega_k \cdot \bar{\Psi}_S \\ \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_R \\ \bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= L_m \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R \end{aligned} \right\}, \quad (3.9)$$

Електромагнітний момент, який фігурує у рівнянні (3.5), може бути визначений як векторний добуток:

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{3}{2} p \cdot L_m \cdot \text{Mod} |\bar{i}_S \times \bar{i}_R| \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot \text{Mod} |\bar{\Psi}_S \times \bar{i}_S| \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot \text{Mod} |\bar{\Psi}_R \times \bar{i}| \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Переходимо до відносних одиниць:

$$U_b = \sqrt{2} \cdot U_1, I_b = \sqrt{2} \cdot I_1, \omega_b = \omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1. \quad (3.11)$$

$$R_b = \frac{U_b}{I_b}, L_b = \frac{U_b}{\omega_b I_b}, \Psi_b = \frac{U_b}{\omega_b}, M_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{U_b \cdot I_b}{\omega_b}, t_b = \frac{1}{\omega_b}. \quad (3.12)$$

Перехід (3.9) до відносних величин завершує етап математичного узагальнення моделі двигуна дробарки КМД. Рівняння отримані при переході можна побачити далі:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\Psi}_S \\ \bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - p \cdot \nu) \cdot \bar{\Psi}_R \\ \bar{\Psi}_S &= X_S \bar{i}_S + X_m \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= X_m \bar{i}_S + X_R \bar{i}_R \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\Psi}_S \\ 0 &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - p \cdot \nu) \cdot \bar{\Psi}_R \\ \bar{\Psi}_S &= X_S \bar{i}_S + X_m \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= X_m \bar{i}_S + X_R \bar{i}_R \\ m &= k \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_i \times \bar{i}_j) \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_S &= r \cdot \bar{i}_S + X'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot X'_S \cdot \bar{i}_S - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_r + j \cdot k_R p \cdot \nu \cdot \bar{\Psi}_r \\ 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot \bar{i}_S + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \bar{\Psi}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - p \cdot \nu) \cdot \bar{\Psi}_R \\ m &= k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\Psi}_R \times \bar{i}_S) \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

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

У випадку, коли система координат залишається нерухомою:

$$\left. \begin{aligned} U_{S\alpha} &= r \cdot i_{S\alpha} + X'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot \nu \cdot \Psi_{R\beta} \\ U_{S\beta} &= r \cdot i_{S\beta} + X'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot \nu \cdot \Psi_{R\alpha} \\ 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \Psi_{R\alpha} + \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} + p \cdot \nu \cdot \Psi_{R\beta} \\ 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot \Psi_{R\beta} + \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} - p \cdot \nu \cdot \Psi_{R\alpha} \\ m &= k_R \cdot (\Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}) \\ \bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Переводимо (3.16) до операторного варіанту:

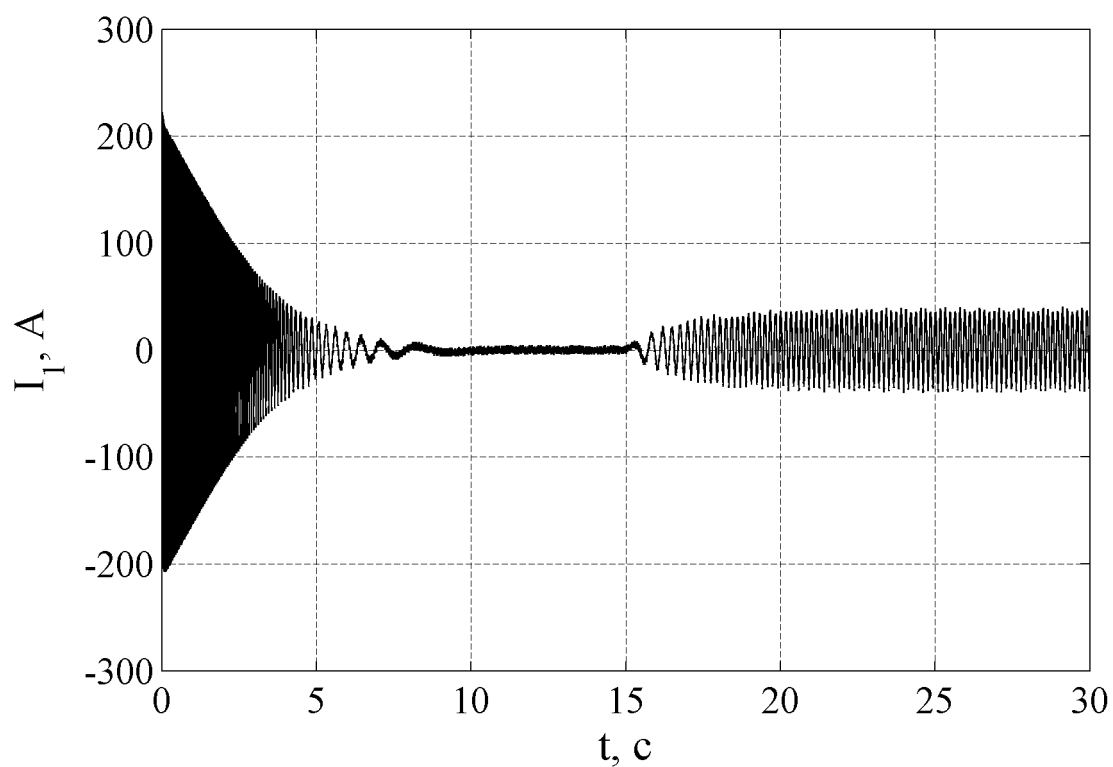


Рисунок 3.2 – Перехідний процес двигуна АКЗ-13-52-12 по струму ротора

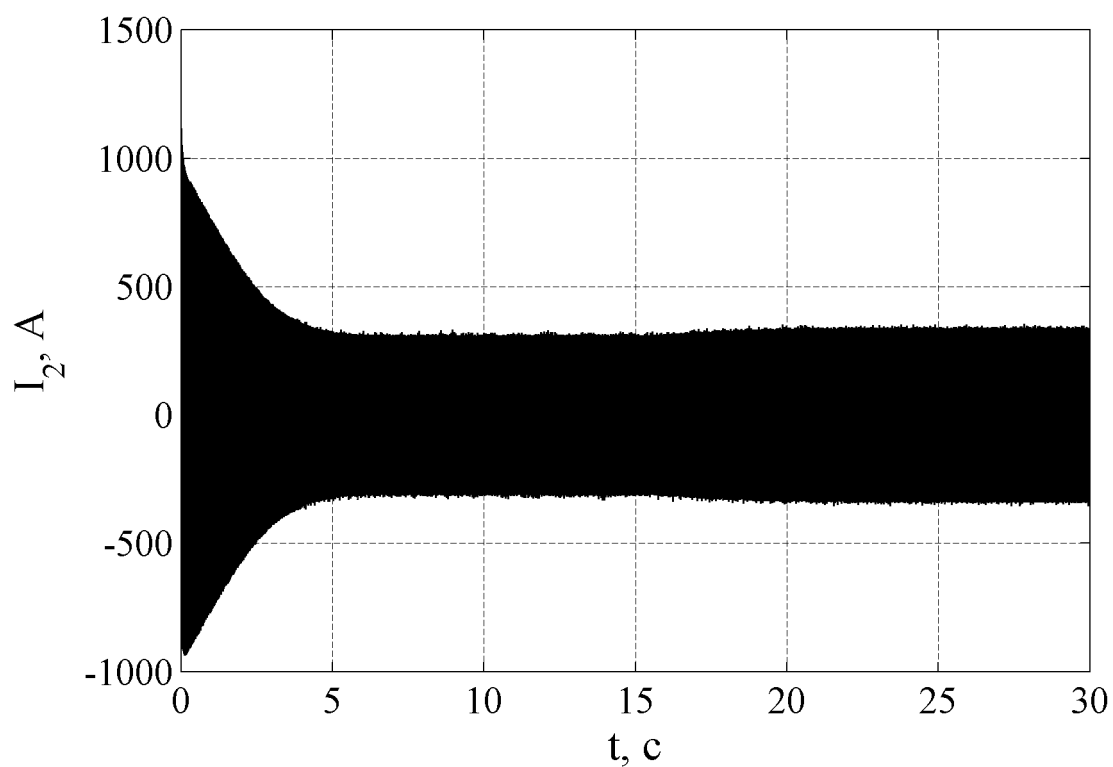


Рисунок 3.3 – Перехідний процес двигуна АКЗ-13-52-12 по струму статора

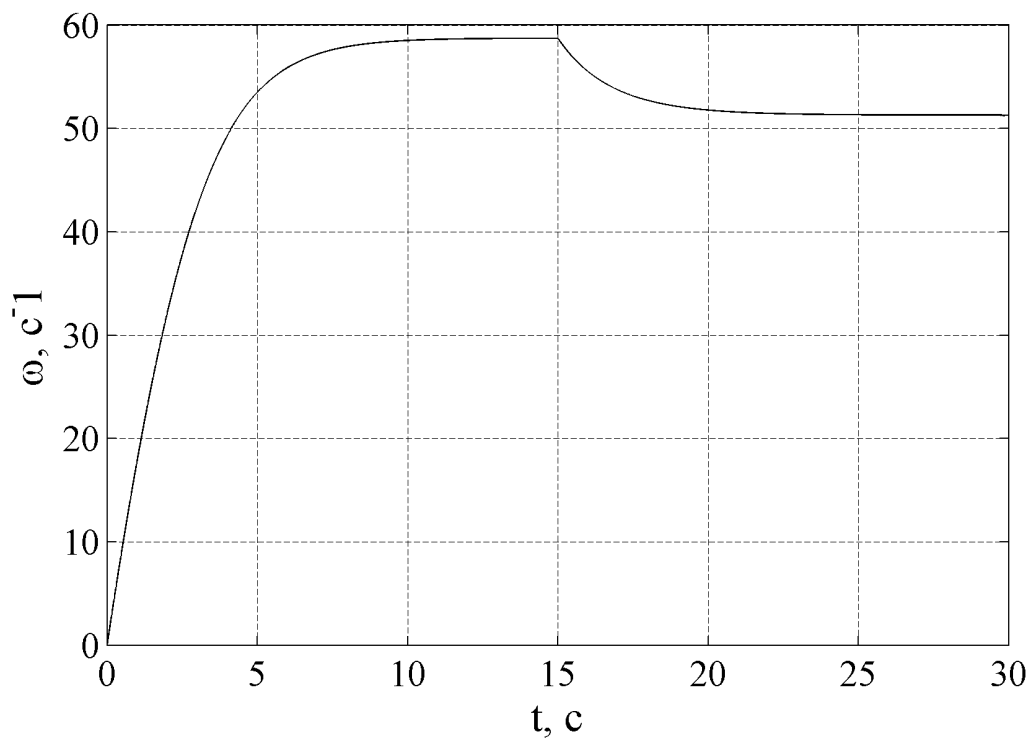


Рисунок 3.4 – Перехідний процес двигуна АКЗ-13-52-12 по швидкості

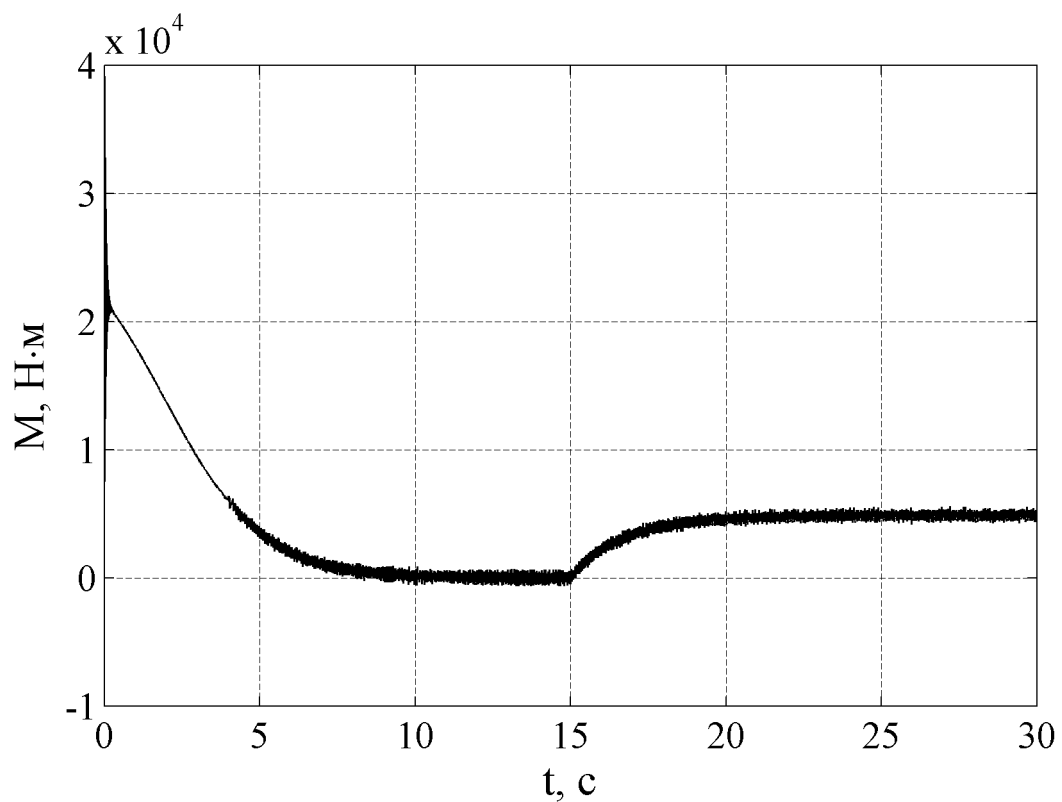


Рисунок 3.5 – Перехідний процес двигуна АКЗ-13-52-12 по моменту

Аналіз перехідних процесів показав, що у момент включення двигуна спостерігається миттєве зростання пускового струму. Одночасно зі струмовими навантаженнями фіксується різкий пік моменту, що створює механічні удари

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

навантаження на всі елементи привідного механізму. Такі динамічні удари особливо небезпечні для редукторів, муфт та інших передавальних елементів, що може призводити до передчасного зносу підшипників, пошкодження зубчастих пар та інших критичних вузлів дробарки. Моделювання також виявило, що тривалість цих ударних навантажень може становити від 0,1 до 0,5 секунди в залежності від параметрів мережі живлення та інерційних характеристик системи.

Особливу увагу привертає факт, що під час пуску спостерігається нестабільність електромагнітного моменту, що викликає механічні коливання в привідній системі.

3.2 Модель системи плавного пуску двигуна дробарки КМД 2200 по системі ТРН-АД

Плавний пуск АКЗ-13-52-12, реалізований за допомогою ТРН, дозволяє значно знизити рівень пускових струмів і уникнути динамічних ударів, які виникають у момент запуску. Це сприяє створенню стабільних перехідних процесів як під час запуску, так і під час зупинки, що, своєю чергою, дозволяє запобігти виникненню надмірних динамічних навантажень на механізми. Такий режим роботи істотно подовжує термін експлуатації електродвигунів і зменшує зношення механічних елементів обладнання. Особливо важливою перевагою використання ТРН є здатність зменшувати вплив ударних навантажень на мережу живлення в умовах використання потужного електропривода. Це дозволяє уникнути перевантаження електромережі та зберегти стабільність роботи інших споживачів електроенергії, що підключені до тієї ж мережі. У результаті забезпечується більш ефективна, безпечна й надійна робота всієї електротехнічної системи.

Під час створення математичних моделей систем типу ТРН-АД приймаються певні допущення, характерні для узагальненої теорії електричних машин, зокрема ті, що відображають ідеалізовану модель. Зазвичай не враховується насичення магнітопроводу, втрати в сталевих елементах конструкції, вважається, що параметри фазних обмоток однакові, повітряний

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

зазор між статором і ротором є рівномірним, а також ігноруються впливи вищих просторових гармонік магнітного поля. Такі припущення значно спрощують розрахунки, водночас зберігаючи адекватність моделі для аналітичного аналізу та інженерного проектування.

У процесі керування напругою при пуску двигуна дробарки за допомогою тиристорного регулятора двигун може працювати в кількох характерних станах, рівняння яких приводяться далі:

Три фази АД під'єднані до мережі: режим провідності ABC:

$$\frac{2 \cdot U_{AB} + U_{BC}}{3} = R_S \cdot I_S^A + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^A}{dt} + \frac{L_M}{L_R} \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt}$$

$$\frac{U_{AB} + U_{BC}}{3} = R_S \cdot I_S^B + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^B}{dt} + \frac{L_M}{L_R} \cdot \left(-0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$-\frac{U_{AB} + 2 \cdot U_{BC}}{3} = R_S \cdot I_S^C + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^C}{dt} + \frac{L_M}{L_R} \cdot \left(-0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} - 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$0 = -R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot I_{SA} + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\alpha + \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\alpha$$

$$0 = -R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot ((2 \cdot I_{SB} + I_{SA})/1.73) + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\beta + \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\beta$$

$$M_E = 1.5 \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot (\Psi_R^\alpha \cdot (2 \cdot I_{SB} + I_{SA})/1.73 - \Psi_R^\beta \cdot I_{SA})$$

Тільки В і С під'єднані до мережі: режим двофазної провідності 0BC:

$$I_S^A = 0; I_S^C = -I_S^B; U_S^A = \frac{L_R}{L_M} \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt}$$

$$\frac{U_{BC}}{2} = R_S \cdot I_S^B + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^B}{dt} + \frac{L_R}{L_M} \cdot \left(0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$0 = \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\alpha + \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\alpha$$

$$0 = -R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot ((2 \cdot I_{SB})/1.73) + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\beta + \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\beta$$

$$M_E = 1.5 \cdot p \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot (\Psi_R^\alpha \cdot (2 \cdot I_{SB})/1.73)$$

Тільки А і С під'єднані до мережі: режим двофазної провідності A0C:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$0.5 \cdot (U_{AB} + U_{BC}) = R_S \cdot I_S^A + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^A}{dt} + \frac{L_M}{L_R} \cdot \left(0.75 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + 0.433 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$I_S^B = 0; I_S^C = -I_S^A; U_S^B = \frac{L_R}{L_M} \cdot \left(-0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$0 = -R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot I_{SA} + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\alpha + \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\alpha$$

$$M_E = 1.5 \cdot p \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot (\Psi_R^\alpha \cdot I_{SA} / 1.73 - \Psi_R^\beta \cdot I_{SA})$$

Тільки А і В під'єднані до мережі: режим двофазної провідності АВ0:

$$\frac{U_{AB}}{2} = R_S \cdot I_S^A + \delta \cdot L_S \cdot \frac{dI_S^A}{dt} + \frac{L_R}{L_M} \cdot \left(0.75 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} - 0.433 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$I_S^C = 0; I_S^B = -I_S^A; U_S^C = -\frac{L_R}{L_M} \cdot \left(0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$0 = -R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot I_{SA} + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\alpha + \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + \omega_R \cdot \Psi_R^\alpha$$

$$0 = R_R \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot (I_{SA} / 1.73) + \frac{R_R}{L_R} \cdot \Psi_R^\beta + \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} - \omega_R \cdot \Psi_R^\beta$$

$$M_E = 1.5 \cdot p \cdot \frac{L_M}{L_R} \cdot (-\Psi_R^\alpha \cdot I_{SA} / 1.73 - \Psi_R^\beta \cdot I_{SA})$$

Три фази відключені: режим нульової провідності 000:

$$I_S^A = I_S^B = I_S^C = 0;$$

$$U_{SA} = \frac{L_R}{L_M} \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt}$$

$$U_{SB} = \frac{L_R}{L_M} \cdot \left(-0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} + 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$U_{SB} = \frac{L_R}{L_M} \cdot \left(-0.5 \cdot \frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} - 0.866 \cdot \frac{d\Psi_R^\beta}{dt} \right)$$

$$M_E = 0$$

Диференціальні рівняння ТРН-АД:

$$\frac{dI_S^A}{dt} = K \cdot K_{10} + K \cdot K_{11} \cdot I_S^A + K \cdot K_{13} \cdot \Psi_R^\alpha + K \cdot K_{14} \cdot \Psi_R^\beta$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\frac{dI_S^B}{dt} = K \cdot K_{20} + K \cdot K_{22} \cdot I_S^A + K \cdot K_{23} \cdot \Psi_R^\alpha + K \cdot K_{24} \cdot \Psi_R^\beta$$

$$\frac{d\Psi_R^\alpha}{dt} = K_{31} \cdot I_S^A - \tau \cdot \Psi_R^\alpha - \omega_R \cdot \Psi_R^\beta$$

$$\frac{d\Psi_R^\beta}{dt} = K_{41} \cdot I_S^A + K_{42} \cdot I_S^B - \omega_R \cdot \Psi_R^\alpha - \tau \cdot \Psi_R^\beta$$

Коефіцієнти K_y для різних режимів:

ABC.

$$K_{10} = U_A; K_{11} = R_\Sigma; K_{13} = \tau \cdot K_L; K_{14} = \omega \cdot K_L$$

$$K_{20} = U_B; K_{22} = R_\Sigma; K_{23} = -K_L \cdot (1.732 \cdot \omega + \tau) / 2; K_{24} = K_L \cdot (1.732 \cdot \tau - \omega) / 2;$$

$$K_{31} = L_M \cdot \tau$$

$$K_{41} = K_{31} / 1.732; K_{42} = 2 \cdot K_{41};$$

0BC:

$$K_{10} = 0; K_{11} = 0; K_{13} = 0; K_{14} = 0;$$

$$K_{20} = U_{BC} / 2; K_{22} = R_\Sigma; K_{23} = -0.866 \cdot K_L \cdot \omega; K_{24} = 0.866 \cdot K_L \cdot \tau;$$

$$K_{41} = 0; K_{42} = 1.1547 \cdot K_L \cdot R_R; K_{31} = 0$$

A0C:

$$K_{10} = (U_{AB} + U_{AC}) / 2; K_{11} = R_\Sigma; K_{13} = (0.75 \cdot K_L \cdot \tau - 0.433 \cdot K_L \cdot \omega);$$

$$K_{14} = (0.75 \cdot K_L \cdot \omega + 0.433 \cdot K_L \cdot \tau); K_{20} = 0; K_{22} = 0; K_{23} = 0; K_{24} = 0;$$

$$K_{31} = L_M \cdot \tau; K_{41} = K_{31} / 1.732; K_{42} = 0$$

AB0:

$$K_{10} = U_{AB} / 2; K_{11} = R_\Sigma; K_{13} = (0.75 \cdot K_L \cdot \tau - 0.433 \cdot K_L \cdot \omega);$$

$$K_{14} = (0.75 \cdot K_L \cdot \omega - 0.433 \cdot K_L \cdot \tau); K_{20} = 0; K_{22} = 0; K_{23} = 0; K_{24} = 0$$

$$K_{31} = L_M \cdot \tau; K_{41} = -K_{31} / 1.732; K_{42} = 0$$

000:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$K_{31} = 0; K_{41} = 0; K_{42} = 0$$

$$K_L = L_M/L_R; \tau = R_R/L_R; R_\Sigma = -(R_S + R_R \cdot K_L^2). \quad (3.18)$$

Одним із найбільш раціональних рішень є побудова системи на основі функціональних блоків, математичні моделі яких уже реалізовані у вигляді готових компонентів. У цьому контексті доцільним є використання модуля **SimPowerSystem** із середовища MATLAB.

Виходячи з таких міркувань, була побудована модель (рис. 3.), яка за структурою повторює реальну систему ТРН-АД. За основу взято структуру [16].

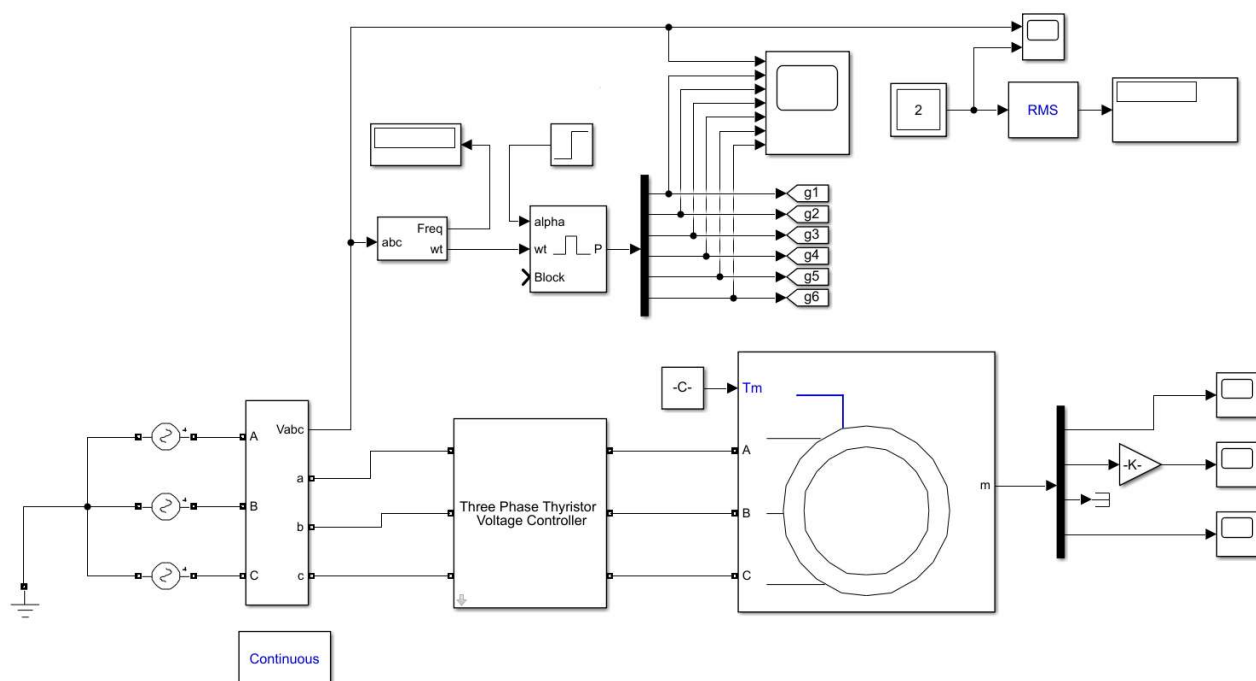


Рисунок 3.6 – Модель пристрою плавного пуску двигуна дробарки в MATLAB

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

У моделі представлено трифазне джерело змінного струму, зібране з трьох однофазних джерел зі зсувом фаз на 120 електричних градусів. Як і у фізичній системі, в моделі реалізована система синхронізованої напруги, яка формує імпульси для керування тиристорами відповідно до певного алгоритму. Ключову роль у цьому відіграє стандартний модуль СІФК, що є частиною бібліотеки MATLAB, з якого подаються імпульси керування на тиристори блоку ТРН.

Хоча в стандартній бібліотеці готового модуля тиристорного регулятора ТРН не існує, його можна легко змоделювати за допомогою базових елементів, зокрема елементарних тиристорів, які об'єднуються у необхідну конфігурацію. Далі до цього блоку підключається асинхронний двигун, після чого вся модель системи ТРН-АД вважається повністю зібраною. Для забезпечення контролю та аналізу процесів до основних точок схеми додаються вимірювальні пристрої – датчики напруги, струму в фазах статора і ротора, а також швидкості обертання. Ці сигнали подаються на блоки візуалізації – осцилографи.

На основі розробленої моделі було проведено низку симуляцій. Основною метою цих випробувань було отримання графіків перехідних процесів, зокрема змін швидкості обертання ротора, динаміки електромагнітного моменту та струмів фаз. Зокрема, було змодельовано плавний пуск електропривода КМД 2200 із початковим кутом відмикання тиристорів 90 електричних градусів, після чого, по завершенні пуску, кут змінився на 40 електричних градусів. Отримані результати у вигляді графіків були представлені на рис. 3.7–3.10.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

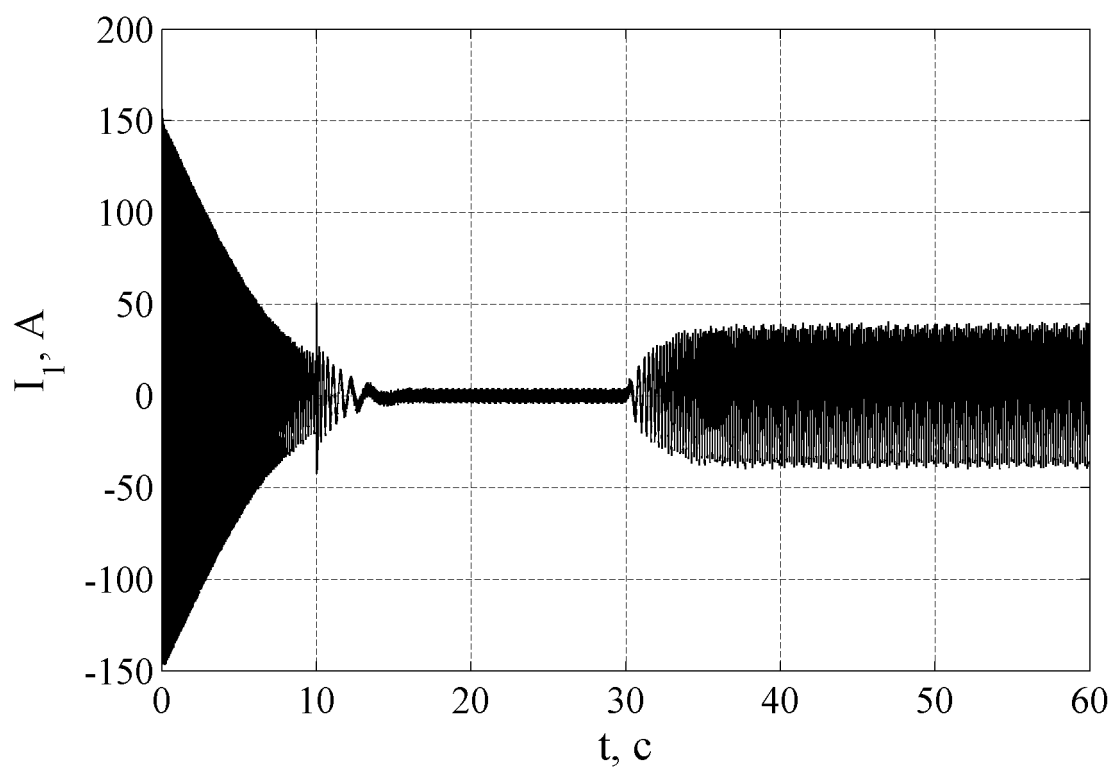


Рисунок 3.7 Перехідний процес в ТРН-АД дробарки по струму ротора

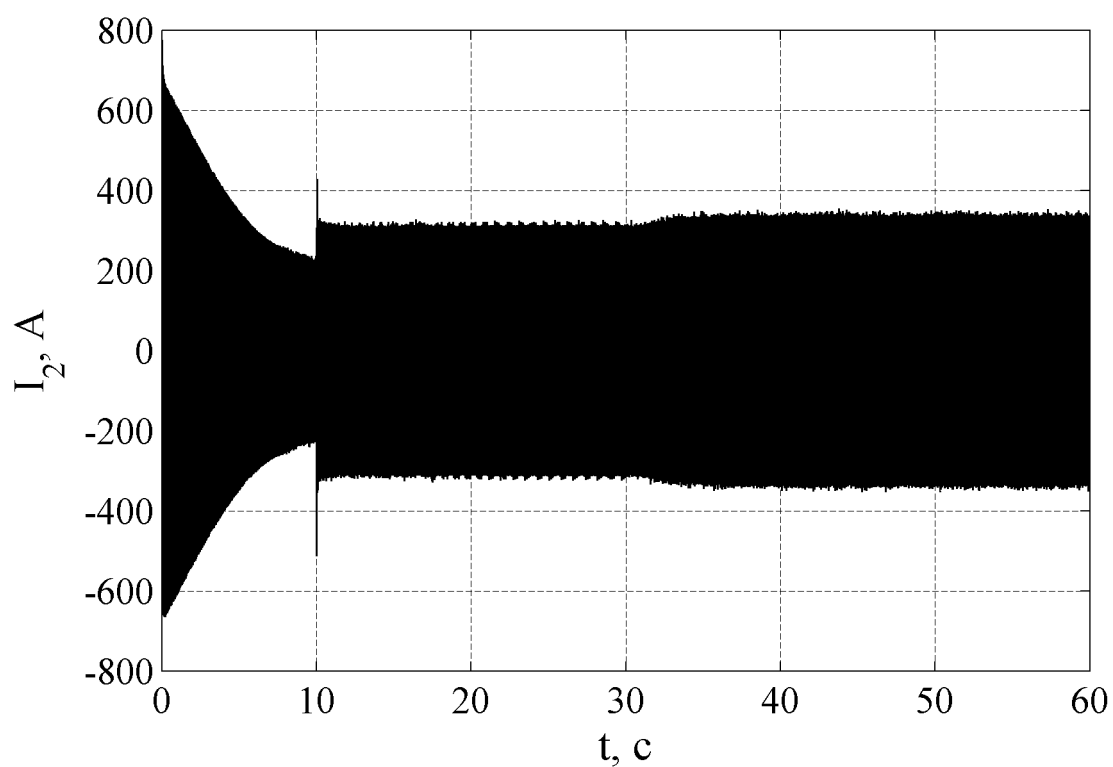


Рисунок 3.8 – Перехідний процес в ТРН-АД дробарки по струму статора системи

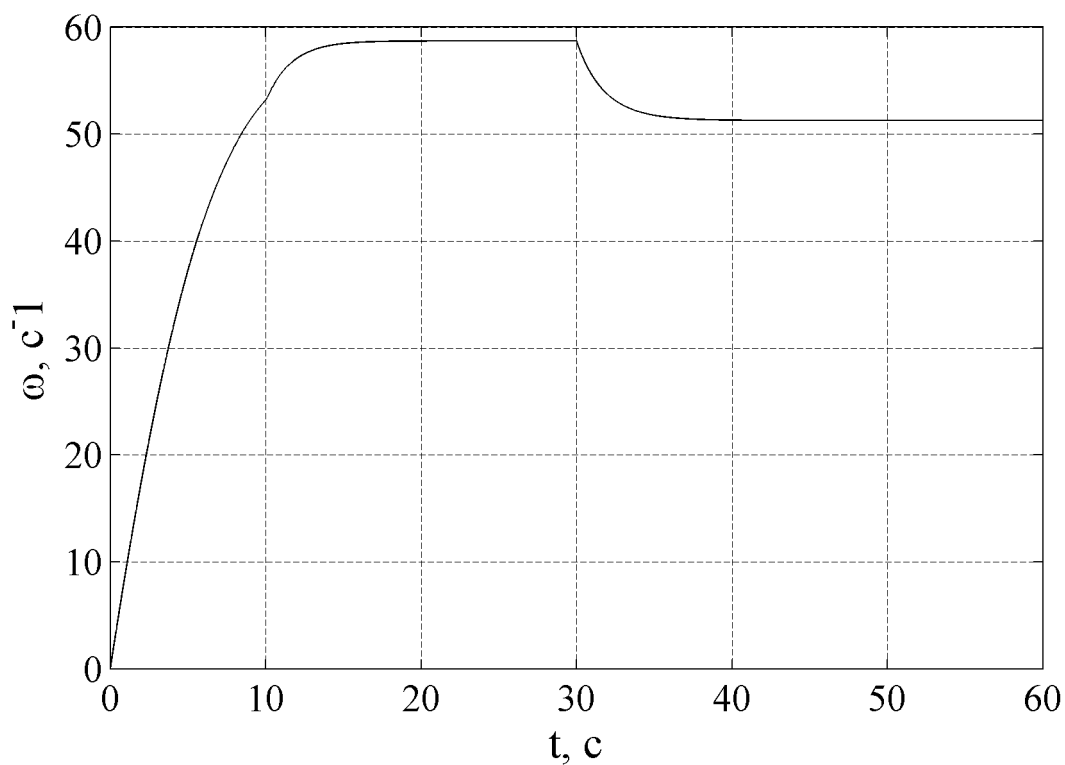


Рисунок 3.9 – Перехідний процес в ТРН-АД дробарки по швидкості

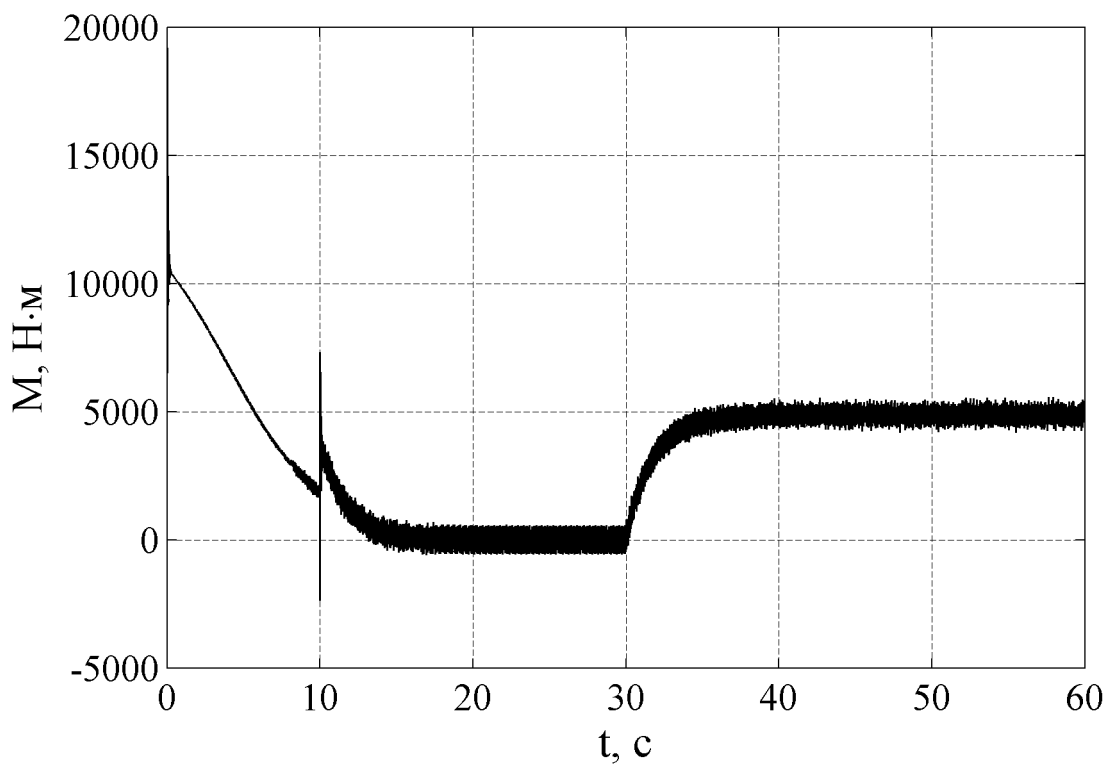


Рисунок 3.10 – Перехідний процес в ТРН-АД дробарки по моменту

У результаті проведеного аналізу видно, що при використанні плавного пуску асинхронного двигуна струмові й моментні кидки значно зменшуються –

приблизно у півтора раза у порівнянні з прямим пуском. Така особливість дозволяє знизити механічне й електричне навантаження на систему, покращуючи загальні умови роботи електропривода.

У випадку застосування плавного режиму розгону негативний вплив пускових струму та моменту на стан обладнання, що викликає додаткові втрати енергії, а також перевантаження у ланцюгах живлення значно зменшується, однак для досягнення бажаного результату важливим є контроль темпу розгону, що визначається параметром часу задатчика інтенсивності.

Висновки до розділу

У розділі була виконана імітаційна модельна перевірка роботи двигуна дробарки КМД 2200 при двох типах запуску: безпосередньому підключенні до мережі та під час пуску з поступовим підвищенням напруги живлення. Аналіз результатів моделювання показав, що плавний пуск дозволяє значно знизити динамічні навантаження в системі. Зокрема, струмові та моментні кидки зменшуються орієнтовно в півтора рази у порівнянні з прямим пуском. Подальше вдосконалення цього результату можливе завдяки реалізації алгоритму поступової зміни кута відкриття тиристорів відповідно до заданої траєкторії зміни. Такий підхід дозволяє ще ефективніше контролювати процес запуску, забезпечуючи м'який розгін електродвигуна без різких стрибків навантажень.

					<i>ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06</i>	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. Проаналізовано виробничі процеси гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з акцентом на особливості роботи дробильної фабрики №2.

2. Детально досліджено функціональні принципи роботи конусної дробарки дрібного дроблення, зокрема проаналізовано технічні параметри та конструктивні рішення КМД-2200, що застосовується на підприємстві.

3. На підставі проведених розрахунків визначено раціональну продуктивність дробарки КМД 2200, обґрунтовано вибір двигуна приводу, як-то асинхронний двигун та запропоновано впровадження сучасного пристрою плавного пуску Schneider Electric ATS 48C32Y для підвищення енергоефективності системи.

4. Статичні характеристики двигуна дробарки КМД 2200 показали суттєві переваги тиристорного регулювання напруги порівняно з традиційними прямим і реостатним пуском. Застосування тиристорного регулятора забезпечує не тільки плавний розгін, але й значно менші енергетичні втрати – до 25–30% менше, ніж при реостатному методі. Це пов'язано з більш точним керуванням напругою та відсутністю додаткових резистивних втрат у пусковій схемі.

5. Проведене комп'ютерна симуляція динамічних властивостей роботи двигуна дробарки КМД 2200 при двох варіантах пуску: прямому та плавному. Аналіз графіків перехідних режимів виявив, що застосування системи плавного пуску дозволяє зменшити навантаження через кидки струму й моменту на елементи приводу приблизно на 30-40% співставляючи з прямим запуском.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.250с-06	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		