

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Підвищення енергоефективності електромеханічного обладнання консольного
крана розливального відділення ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Здобувач групи ЗЕЕМ-23ск _____ Володимир ВОЛКОВСЬКИЙ

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

2026

Факультет: *електротехнічний*

Освітній рівень: *бакалавр*

Спеціальність: *141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка*

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Волковського Володимира Олександровича

1. Тема роботи: Підвищення енергоефективності електромеханічного обладнання консольного крана розливального відділення ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: підвищення ефективності, точності позиціонування, надійності та енергоефективності допоміжних технологічних операцій (переміщення вогнетривких матеріалів, шибєрних затворів тощо) шляхом модернізації системи керування електроприводом з використанням векторного керування з орієнтацією за полем
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): характеристика електромеханічного консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; розрахунок і вибір електромеханічного обладнання консольного крану; розробка системи векторного керування привідним двигуном консольного крану з орієнтацією за полем
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): загальний вигляд консольного крану; природні характеристики привідного двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z консольного крану; штучні характеристики привідного двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z консольного крану в системі ПЧ-АД; симуляційна модель електроприводу консольного крану; динамічні характеристики електроприводу консольного крану

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	18.05.26–24.05.26
2	Спеціальна частина	25.05.26–30.05.26
3	Проектна розробка	31.05.26–31.05.26
4	Оформлення пояснювальної записки	01.06.26–10.06.26
5	Оформлення презентації	11.06.26–15.06.26

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти

Володимир ВОЛКОВСЬКИЙ

Керівник роботи

Олексій МИХАЙЛЕНКО

Реферат

Кваліфікаційна робота присвячена модернізації системи електропривода консольного крана розливального відділення ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з метою підвищення ефективності, точності позиціонування та енергоефективності допоміжних технологічних операцій. У ході виконання роботи здійснено комплексний інженерний розрахунок електромеханічного обладнання на основі реальних навантажувальних діаграм, за результатами якого обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна Siemens 1LE1503-1EB43-4FA4-Z потужністю 22 кВт, що підтверджено перевіркою за умовами нагрівання та перевантаження. Проаналізовано статичні та динамічні властивості обраного двигуна шляхом розрахунку параметрів заступної Т-схеми, що дозволило довести неефективність класичного прямого пуску та скалярного частотного регулювання через значні пускові струми та критичне ослаблення магнітного потоку на низьких частотах. Для усунення виявлених недоліків розроблено систему автоматичного керування на базі методу векторного керування з орієнтацією за полем ротора, яка забезпечує математичне розв'язування каналів керування потоком збудження та електромагнітним моментом. Це дозволяє підтримувати повний критичний момент на низьких швидкостях, усуваючи просадки швидкості під навантаженням та небезпечні маятникові коливання вантажу. Адекватність запропонованих рішень підтверджено шляхом розробки імітаційної моделі електропривода в середовищі MATLAB/SimcapePS з використанням трирівневого інвертора з фіксацією нейтральної точки, який забезпечує зниження гармонічних спотворень та навантаження на ізоляцію обмоток.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розливальне відділення, консольний кран, асинхронний електродвигун, позиціонування, частотне регулювання швидкості, керування орієнтоване за полем, симуляції.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.Р</i>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Загальна частина	8
1.1 Характеристика металургійного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».....	9
1.2 Характеристика механізмів та електромеханічного обладнання консольного крану	11
1.3 Підбір електромеханічного обладнання консольного крану	13
1.3.1 Прорахунок потужності електродвигуна	13
1.3.2 Прорахунок динамічних моментів консольного крану.....	16
Висновки до розділу 1	19
Розділ 2. Спеціальна частина	20
2.1 Розрахунок заступної Т-схеми привідного двигуна консольного крану та побудова статичних характеристик.....	21
2.2 Статичні характеристики привідного двигуна консольного крану в системі ПЧ-АД	25
2.3 Симуляційна модель привідного двигуна консольного крану	28
Висновки до розділу 2	35
Розділ 3. Проектна розробка	36
3.1 Обґрунтування системи керування електроприводом консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	37
3.2 Принцип векторного керування з орієнтацією за полем ротора для САК електроприводу консольного крану.....	38
3.3 Симуляційна модель для аналізу системи керування електроприводом консольного крану	41
Висновок до розділу 3	47
Висновки	49
Список використаної літератури	51

Вступ

Актуальність модернізації системи електропривода консольного крану розливающего цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» визначається необхідністю підвищення ефективності допоміжних технологічних операцій, від яких безпосередньо залежить безперервність і стабільність процесу розливу металу. На відміну від основних підйомно-транспортних механізмів, консольний кран у розливающего цеху виконує функції переміщення вогнетривких матеріалів, стартових сумішей, затворів, шиберних механізмів та іншого допоміжного оснащення, що забезпечує підготовку і обслуговування розливающего обладнання. Незважаючи на допоміжний характер цих операцій, їх своєчасність, точність і надійність мають критичне значення, оскільки будь-які затримки або відхилення можуть призвести до порушення технологічного циклу, простоїв основного обладнання та зниження продуктивності цеху.

Більшість існуючих електроприводів таких кранів базується на застарілих технічних рішеннях із релейно-контакторним або тиристорним керуванням, які не забезпечують достатньої плавності руху, точності позиціонування та енергоефективності. У процесі переміщення вогнетривких виробів і елементів затворів важливо уникати різких пусків і зупинок, оскільки це може призводити до механічних пошкоджень матеріалів, їх передчасного руйнування або втрати експлуатаційних властивостей. Крім того, динамічні навантаження, що виникають при роботі застарілих електроприводів, негативно впливають на металоконструкції крана, редуктори, підшипникові вузли та канатні системи, що скорочує строк служби обладнання та збільшує витрати на його обслуговування.

В умовах сучасного металургійного виробництва особливої актуальності набуває питання енергоефективності, оскільки навіть допоміжні механізми при інтенсивній експлуатації формують значну частку енергоспоживання. Використання сучасних частотно-регульованих електроприводів із векторним керуванням дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи електродвигунів,

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.ВС</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		6

знизити пускові струми, мінімізувати втрати електроенергії та підвищити коефіцієнт потужності. Одночасно досягається висока точність регулювання швидкості та положення, що особливо важливо при встановленні затворів або роботі з елементами, які потребують акуратного позиціонування.

Таким чином, модернізація системи електропривода консольного крану, який забезпечує переміщення вогнетривких матеріалів, стартових сумішей і елементів затворів, є важливим напрямом підвищення ефективності функціонування розливального цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.ВС</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 1. Загальна частина

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Волковський В.О.</i>			<i>Загальна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>8</i>	<i>51</i>
<i>Конс.</i>						<i>ЗЕЕМ-23ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

1.1 Характеристика металургійного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Металургійне виробництво ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» являє собою складний багатостадійний технологічний комплекс із повним металургійним циклом, що включає видобуток та збагачення залізної руди, агломераційне виробництво, коксохімічне виробництво, доменне плавлення, сталеплавильні процеси та прокатне виробництво. Особливістю даного підприємства є масштабність, безперервність технологічних процесів і тісний взаємозв'язок між окремими переділами, що вимагає високого рівня координації роботи обладнання, надійності електропостачання та ефективного функціонування систем автоматизації. Виробничий процес характеризується значними матеріальними потоками, високими температурами, агресивними умовами експлуатації обладнання та суттєвими енергетичними витратами, що обумовлює підвищені вимоги до технічного стану всіх елементів технологічного ланцюга.

Однією з ключових ланок металургійного виробництва є сталеплавильне та розливальне відділення, де відбувається завершальний етап формування властивостей сталі перед її подальшою обробкою. Розливальний цех відіграє критично важливу роль у забезпеченні якості готової продукції, оскільки саме на цьому етапі визначаються структура, однорідність та відсутність внутрішніх дефектів металу. Умови роботи розливального цеху характеризуються високою температурою розплаву, необхідністю точного дотримання технологічних режимів, синхронізацією дій різних механізмів та високою відповідальністю персоналу. Процеси розливу можуть здійснюватися як у виливниці, так і на машинах безперервного лиття заготовок, що потребує високої точності керування потоками металу, стабільності температурного режиму та чіткої роботи допоміжного обладнання.

Функціонування розливального цеху забезпечується значною кількістю підйомно-транспортних і допоміжних механізмів, серед яких важливе місце займають крани різного призначення, у тому числі консольні крани, що

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використовуються для переміщення вогнетривких матеріалів, стартових сумішей, шибєрних затворів та інших елементів, необхідних для підготовки і обслуговування розливального обладнання. Незважаючи на те, що ці операції не пов'язані безпосередньо з транспортуванням розплавленого металу, їх значення є визначальним для забезпечення безперервності процесу розливу, оскільки своєчасна підготовка ковшів, заміна футерівки, встановлення затворів і подача допоміжних матеріалів впливають на стабільність технологічного процесу і запобігають аварійним ситуаціям.

Робота розливального цеху характеризується високою інтенсивністю, циклічністю та необхідністю мінімізації простоїв, оскільки будь-яке порушення ритму роботи призводить до значних економічних втрат. У цих умовах особливо важливою є надійність електромеханічного обладнання, включаючи електроприводи кранових механізмів, системи подачі матеріалів та допоміжні агрегати. Високі динамічні навантаження, вплив пилу, температури та вібрацій створюють складні умови експлуатації, що прискорює знос обладнання і підвищує вимоги до його технічного обслуговування.

Сучасні тенденції розвитку металургійного виробництва на підприємстві спрямовані на підвищення рівня автоматизації, впровадження цифрових технологій, оптимізацію енергоспоживання та покращення якості продукції. У розливальному цеху це проявляється у впровадженні автоматизованих систем керування процесом розливу, систем моніторингу температури, рівня металу, стану обладнання, а також у модернізації електроприводів і підйомно-транспортних механізмів. Важливим напрямом є інтеграція окремих агрегатів у єдину інформаційно-керуючу систему, що дозволяє забезпечити узгоджену роботу всіх елементів технологічного процесу та підвищити ефективність виробництва.

Таким чином, металургійне виробництво АрселорМіттал Кривий Ріг характеризується складною структурою, високою енергоємністю та вимогами до надійності обладнання, а розливальний цех є однією з найвідповідальніших ділянок, де формуються ключові показники якості сталі. Ефективність його роботи значною мірою залежить від стану допоміжних механізмів, зокрема

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

кранового господарства та їх електроприводів, що обумовлює необхідність їх постійного вдосконалення та модернізації в умовах сучасного промислового виробництва.

1.2 Характеристика механізмів та електромеханічного обладнання консольного крану

Консольний кран металургійного виробництва (рис. 1.1) [1] є важливим елементом допоміжної інфраструктури розливального цеху, який забезпечує виконання широкого спектра технологічних операцій, пов'язаних із обслуговуванням основного процесу розливу сталі.

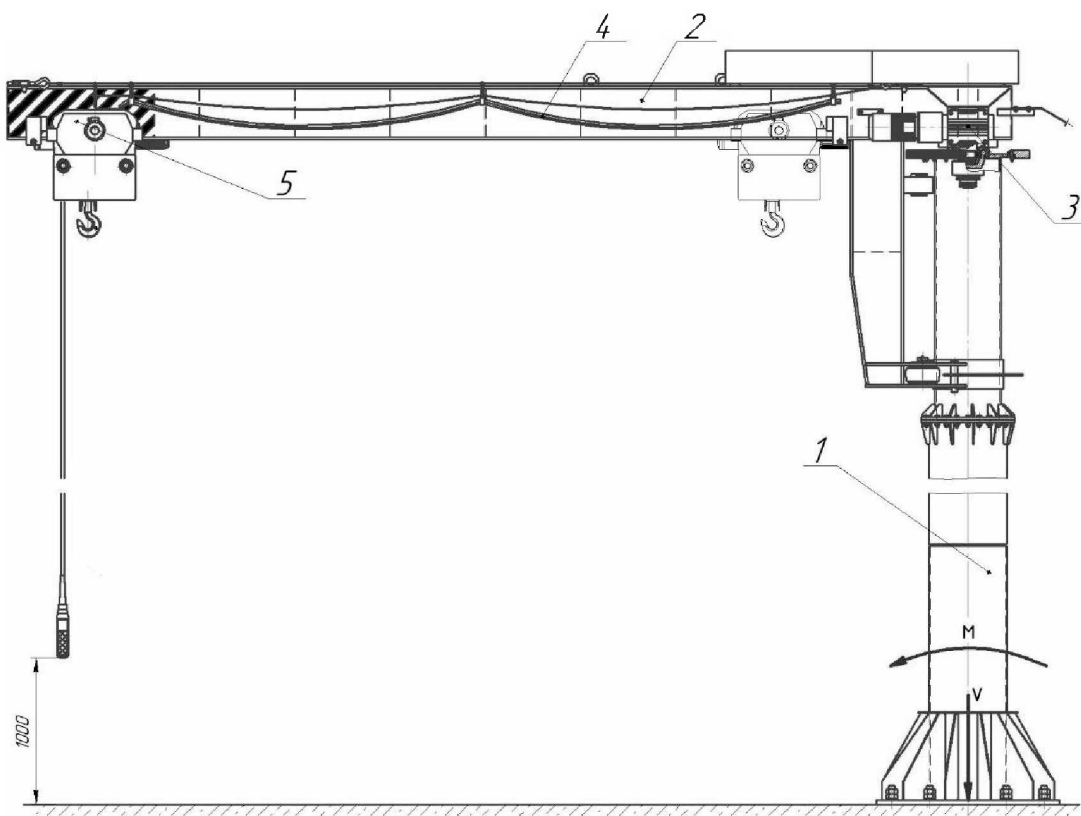


Рис. 1.1. Загальний вигляд консольного крану: 1 – опора; 2 – стріла; 3 – електропривід повороту; 4 – електроустаткування; 5 – таль [1]

Конструктивно та функціонально такий кран призначений для переміщення вогнетривких матеріалів, стартових сумішей, шибєрних затворів, елементів футерівки та іншого технологічного оснащення, що використовується при підготовці ковшів, проміжних ємностей і вузлів

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

розливого обладнання. Робота консольного крана характеризується відносно невеликими вантажами порівняно з головними розливними кранами, але при цьому висуває підвищені вимоги до точності позиціонування, плавності рухів і надійності, оскільки ці операції виконуються в умовах обмеженого простору, підвищеної температури, запиленості та інтенсивного виробничого ритму.

Електромеханічна частина консольного крана включає механізми підйому, пересування візка та повороту або переміщення консолі, кожен з яких оснащується індивідуальним електроприводом. У більшості випадків на діючих металургійних підприємствах, зокрема на об'єктах із тривалим терміном експлуатації, застосовуються асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що обумовлено їх простотою конструкції, надійністю, відносно низькою вартістю та здатністю працювати в складних умовах. Проте системи керування такими двигунами часто залишаються на застарілому рівні розвитку, що істотно впливає на експлуатаційні характеристики крана.

Найбільш поширеним варіантом є використання релейно-контакторних систем керування асинхронними двигунами, які реалізують ступінчасте регулювання швидкості шляхом перемикання обмоток статора або зміни схем їх з'єднання. У таких системах застосовуються двигуни з фазним або короткозамкненим ротором із можливістю дво- або багатошвидкісного режиму роботи, що дозволяє реалізувати обмежену кількість фіксованих швидкостей. Пуск і гальмування при цьому відбуваються з великими динамічними навантаженнями, що призводить до ривків, коливань вантажу та підвищеного механічного зносу елементів крана. Крім того, такі системи характеризуються значними пусковими струмами, що негативно впливає на електричну мережу підприємства.

Іншим варіантом, який також широко застосовується, є використання асинхронних електроприводів із тиристорними регуляторами напруги або частоти, що забезпечують певне покращення характеристик пуску та регулювання швидкості. Проте у випадку тиристорного регулювання напруги

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором діапазон ефективного регулювання швидкості є обмеженим, а зниження напруги супроводжується значним падінням моменту, що ускладнює роботу при змінних навантаженнях. Такі системи також створюють додаткові гармонічні спотворення в мережі живлення та не забезпечують високої точності керування.

На більш модернізованих ділянках можуть застосовуватися частотно-регульовані асинхронні електроприводи, що базуються на перетворювачах частоти з широтно-імпульсною модуляцією. У таких системах використовується скалярне або векторне керування, яке дозволяє плавно регулювати швидкість обертання двигуна в широкому діапазоні, забезпечувати м'який пуск і гальмування, зменшувати динамічні навантаження та підвищувати точність позиціонування. Проте навіть у цих випадках часто використовуються відносно прості алгоритми керування без повної реалізації потенціалу сучасних систем автоматизації, що обмежує можливості оптимізації роботи крана.

Загалом існуючі системи асинхронного електроприводу консольних кранів металургійного виробництва характеризуються недостатнім рівнем автоматизації, обмеженою функціональністю та невисокою енергоефективністю, що обумовлює необхідність їх подальшої модернізації. Перехід до сучасних частотно-регульованих електроприводів із векторним керуванням, інтеграцією в автоматизовані системи керування та використанням засобів діагностики дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи крана, знизити знос обладнання та забезпечити стабільність виконання технологічних операцій у складних умовах металургійного виробництва.

1.3 Підбір електромеханічного обладнання консольного крану

1.3.1 Прорахунок потужності електродвигуна

Потужність двигуна [2]:

$$P_c = \frac{F_k v_n}{\eta_n} = \frac{31065 \cdot 0,517}{0,9} = 17833,61 \text{ Вт}, \quad (1.1)$$

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$F_{\kappa} = \frac{\beta \cdot (m_z + m_0) \cdot 9,81 \cdot 10^3}{D_{\kappa}} (2f + \mu d_y) =$$

$$= \frac{2 \cdot (10 + 15) \cdot 9,81 \cdot 10^3}{0,6} \cdot (2 \cdot 0,004 + 0,15 \cdot 0,2) = 31065 \text{ Н}, \quad (1.2)$$

$$P'_{\text{пред}} = \kappa P_c = 1,2 \cdot 17833,61 = 21400,33 \text{ кВт}, \quad (1.3)$$

Прораховуємо тривалість включення:

$$TB_{cp} = \frac{K_1 \cdot t_p}{t_y} 100\% = \frac{1,5 \cdot 11,613}{30} 100\% = 58,07\%, \quad (1.4)$$

$$t_p = \frac{L}{v} = \frac{6}{0,517} = 11,613 \text{ сек}, \quad (1.5)$$

$$t_y = \frac{3600}{N_y} = \frac{3600}{120} = 30 \text{ сек}, \quad (1.6)$$

Прорахована потужність при наміченій тривалості включення:

$$P_{\text{пред}} = P'_{\text{пред}} \sqrt{\frac{TB_{cp}}{TB_{кат}}} = 21400,33 \sqrt{\frac{58,07}{60}} = 21052,34 \text{ кВт}. \quad (1.7)$$

З каталогу Siemens [3] вибираємо двигун 1LE1503-1EB43-4FA4-Z (див. табл. 1.1).

Табл. 1.1. Паспортні дані електродвигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z

№	Характеристика	Значення	Одиниця
1	ω_0	1500	об/хв
2	$\omega_{ном}$	1470	об/хв
3	$P_{ном}$	22	кВт
4	η	0,93	%
5	$\cos \varphi$	0,83	
6	I_1	41	А
7	U_1	400	В
8	I_n / I_n	6,8	

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

9	M_n/M_n	2,3	
10	$M_{\max}/M_n$	3,3	
11	J	0,14	кг·м ²

Перевіряємо 1LE1503-1EB43-4FA4-Z за нагріванням.

Момент інерції:

$$J_{\Sigma} = 1,5J_{\partial\partial} + \frac{m_z + m_0}{\omega_n^2 \cdot \eta} = 1,5 \cdot 0,14 + \frac{(10+15)}{153,94^2 \cdot 0,93} = 1,344 \text{ кг·м}^2 \quad (1.9)$$

тут:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{3,14 \cdot 1470}{30} = 153,94 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (1.8)$$

Тоді з умови $\frac{J_{\Sigma}}{1,2J_n} = \frac{1,344}{1,2 \cdot 0,14} = 8,002 > 5$ двигун підходить.

Прораховуємо параметри:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{22000}{153,94} = 143,92 \text{ Н·м}, \quad (1.9)$$

Прораховуємо навантажувальну діаграму:

$$M = M_c + M_{\partial\partial n}, \quad (1.10)$$

$$M_{c2} = \frac{F_{\kappa} D_{\kappa}}{2i\eta_n} = \frac{31065 \cdot 0,6}{2 \cdot 90 \cdot 0,93} = 112,11 \text{ Н·м}, \quad (1.11)$$

$$i = \frac{\omega_n D_{\kappa}}{2v_n} = \frac{153,94 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,517} = 89,383 \approx 90. \quad (1.12)$$

$$\begin{aligned} M_{c0} &= \frac{\beta \cdot m_0 \cdot 9,81 \cdot 10^3}{D_{\kappa}} (2f + \mu d_u) \frac{D_{\kappa}}{2 \cdot i \cdot \eta_0} = \\ &= \frac{2 \cdot (10+15) \cdot 9,81 \cdot 10^3}{0,6} \cdot (2 \cdot 0,004 + 0,15 \cdot 0,2) \cdot \frac{0,6}{2 \cdot 90 \cdot 0,6} = \\ &= 173,77 \text{ Н·м}, \end{aligned} \quad (1.13)$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\kappa_3 = \frac{m_0}{m_0 + m_z} = \frac{15}{10 + 15} = 0,6. \quad (1.14)$$

Отримуємо $\eta_0 = 0,7$.

1.3.2 Прорахунок динамічних моментів консольного крану

Динамічний момент:

$$M_{дин} = J_{\varphi} \frac{d\omega}{dt} H \cdot m, \quad (1.15)$$

Моменти інерції консольного крану:

$$\begin{aligned} J_{e2} &= K \cdot z (J_{\partial\theta} + J_{\omega} + J_M) + J_{n\partial z} = \\ &= 1,2 \cdot 1 \cdot (0,14 + 0,042 + 0,021) + 0,282 = 0,525 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$J_{\omega} = 0,3 J_{\partial\theta} = 0,3 \cdot 0,14 = 0,042 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (1.17)$$

$$J_M = 0,15 J_{\partial\theta} = 0,15 \cdot 0,14 = 0,021 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.18)$$

$$J_{n\partial z} = \frac{(m_z + m_0) v_n^2}{\omega_n^2} = \frac{(10 + 15) \cdot 10^3 \cdot 0,517^2}{153,94^2} = 0,282 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} J_{e0} &= K \cdot z (J_{\partial\theta} + J_{\omega} + J_M) + J_{n\partial 0} = \\ &= 1,2 \cdot 1 \cdot (0,14 + 0,042 + 0,021) + 0,169 = 0,413 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$J_{n\partial 0} = \frac{m_0 v_n^2}{\omega_n^2} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 0,517^2}{153,94^2} = 0,169 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (1.21)$$

Моменти та прискорення консольного крану:

$$\left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\partial\theta} = \frac{2 \cdot i \cdot a_{\partial\theta}}{D_K} = \frac{2 \cdot 90 \cdot 0,2}{0,6} = 59,58 \text{ м} / \text{с}^2, \quad (1.22)$$

$$a_p = \frac{v_n}{t'_p} = \frac{0,517}{3,6} = 0,144 \text{ м} / \text{с}^2, \quad (1.23)$$

$$M_{дин.z} = J_{e2} \frac{2 \cdot i \cdot a_{\partial\theta}}{D_K} = 0,525 \cdot \frac{2 \cdot 90 \cdot 0,2}{0,6} = 31,298 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.24)$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$M_{дин.0} = J_{e0} \frac{2 \cdot i \cdot a_{дон}}{D_k} = 0,413 \cdot \frac{2 \cdot 90 \cdot 0,2}{0,6} = 24,585 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.25)$$

$$M_{ср.нз} = M_{сз} + M_{дин.з} = 112,11 + 31,298 = 143,41 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.26)$$

$$M_{ср.нз} \text{ не більше } 1,7z M_n = 1,7 \cdot 1 \cdot 142,92 = 242,96 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

$$M_{ср.н0} = M_{с0} + M_{дин.0} = 173,78 + 24,585 = 198,359 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.27)$$

$$M_{ср.мз} = M_{дин.з} - M_{сз} = 24,585 - 112,11 = -80,815 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.28)$$

$$M_{ср.м0} = M_{дин.0} - M_{с0} = 24,585 - 173,774 = -149,189 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.29)$$

Час вивантаження та гальмування консольного крану:

$$t_{pz} = J_{e2} \frac{\omega_{кон} - \omega_{нач}}{M_{ср.нз} - M_{сз}} = 0,525 \cdot \frac{153,94 - 0}{143,41 - 112,11} = 2,583 \text{ сек}, \quad (1.30)$$

$$t_{p0} = J_{e0} \frac{\omega_{кон} - \omega_{нач}}{M_{ср.н0} - M_{с0}} = 0,413 \cdot \frac{153,94 - 0}{198,359 - 173,774} = 2,583 \text{ сек}. \quad (1.31)$$

$$t_{mz} = J_{e2} \frac{\omega_{нач} - \omega_{кон}}{M_{ср.мз} + M_{сз}} = 0,525 \cdot \frac{0 - 153,94}{-149,189 + 112,11} = 2,181 \text{ сек}. \quad (1.32)$$

$$t_{m0} = J_{e0} \frac{\omega_{нач} - \omega_{кон}}{M_{ср.м0} + M_{сз}} = 0,5 \cdot \frac{153,94 - 0}{-80,815 + 112,11} = 2,029 \text{ сек}. \quad (1.33)$$

Шлях візка консольного крану при пуску і гальмуванні:

$$S_{nz} = \frac{v_n}{2} \cdot t_{pz} = \frac{0,517}{2} \cdot 2,583 = 0,667 \text{ м}. \quad (1.34)$$

$$S_{n0} = \frac{v_n}{2} \cdot t_{p0} = \frac{0,517}{2} \cdot 2,583 = 0,667 \text{ м}. \quad (1.35)$$

$$S_{mz} = \frac{v_n}{2} \cdot t_{mz} = \frac{0,517}{2} \cdot 2,181 = 0,564 \text{ м}. \quad (1.36)$$

$$S_{m0} = \frac{v_n}{2} \cdot t_{m0} = \frac{0,517}{2} \cdot 2,029 = 0,524 \text{ м}. \quad (1.37)$$

$$S_{yz} = L - S_{nz} - S_{mz} = 6 - 0,667 - 0,564 = 4,77 \text{ м};. \quad (1.38)$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$S_{y0} = L - S_{n0} - S_{m0} = 6 - 0,667 - 0,524 = 4,81 \text{ м.} \quad (1.39)$$

Час паузи і сталої роботи консольного крану:

$$t_{y0} = \frac{S_{y0}}{v_n} = \frac{4,77}{0,517} = 9,23 \text{ сек.} \quad (1.40)$$

$$t_{yz} = \frac{S_{yz}}{v_n} = \frac{4,81}{0,517} = 9,3 \text{ сек.} \quad (1.41)$$

$$\begin{aligned} \sum t_p &= t_{pz} + t_{yz} + t_{mz} + t_{pz} + t_{yo} + t_{mo} = \\ &= 9,23 + 9,3 + 2,583 + 2,583 + 2,181 + 2,029 = 27,9 \text{ сек.} \end{aligned} \quad (1.42)$$

$$t_n = \frac{t_y - \sum t_p}{2} = \frac{30 - 27,9}{2} = 1,05 \text{ сек.} \quad (1.43)$$

Перевіримо двигун 1LE1503-1EB43-4FA4-Z за нагріванням і перевантаженням.

$$TB\%_{\phi} = \frac{t_{pz} + t_{yz} + t_{mz} + t_{pz} + t_{mo}}{t_y} 100\% = \frac{18,677}{30} 100\% = 62,3\%.$$

Момент еквівалентний:

$$\begin{aligned} M_{ep} &= \sqrt{\frac{M_{сер.нз}^2 t_{nz} + M_{сер.но}^2 t_{p0} + M_{сз}^2 t_{yz} + M_{сер.мз}^2 t_{mz} + M_{сер.м0}^2 t_{mo} + M_{со}^2 t_{yo}}{t_{pz} + t_{yz} + t_{mz} + t_{pz} + t_{yo} + t_{m0}}} = \\ &= \sqrt{\frac{143,41^2 \cdot 2,538 + 198,359^2 \cdot 2,583 + (-149,189)^2 \cdot 2,181 +}{27,9}} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{(-80,815)^2 \cdot 2,029 + 112,11^2 \cdot 9,3 + 173,77^2 \cdot 9,23}{27,9} = 145,89 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned} \quad (1.44)$$

$$M_e = M_{ep} \sqrt{\frac{ПВ_{ср}}{ПВ_{кат}}} = 145,89 \sqrt{\frac{62,3}{80}} = 128,75 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (1.45)$$

Маємо $128,75 \text{ Н} \cdot \text{м} < 143,92 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

$$M_{макснагр} \leq 0,85 z M_{максдв}, \quad (1.46)$$

$$M_{максдв} = \lambda M_n; \quad (1.47)$$

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Маємо $143,92 H \cdot m < 0,85 \cdot 3,3 \cdot 143,92 = 403,69 H \cdot m$.

Умови дотримані, тобто 1LE1503-1EB43-4FA4-Z приймаємо.

Висновки до розділу 1

У межах виконаного розділу 1 було здійснено комплексний інженерний розрахунок електромеханічного обладнання консольного крана ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», в ході якого визначено необхідну потужність електродвигуна з урахуванням реальних навантажувальних діаграм та тривалості включення. На основі проведених розрахунків динамічних моментів, шляхів гальмування та еквівалентних навантажень було обґрунтовано вибір асинхронного електродвигуна Siemens 1LE1503-1EB43-4FA4-Z, перевірка якого за умовами нагрівання та перевантаження підтвердила його повну відповідність жорстким умовам експлуатації, що забезпечить стабільну, безаварійну та енергоефективну роботу кранового механізму в складних умовах металургійного виробництва.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.01.3Ч</i>	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 2. Спеціальна частина

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.02.СЧ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Волковський В.О.</i>			<i>Спеціальна частина</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>20</i>	<i>51</i>
<i>Конс.</i>						<i>ЗЕЕМ-23ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

2.1 Розрахунок заступної Т-схеми привідного двигуна консольного крану та побудова статичних характеристик

Визначимо параметри заступної Т-схеми 1LE1503-1EB43-4FA4-Z (рис. 2.1). Практична необхідність побудови такої схеми полягає у здатності точно визначати ключові робочі показники двигуна в усталених режимах, зокрема споживані струми, активну та реактивну потужності, коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності за будь-якого заданого навантаження. Крім того, заступна схема є математичною основою для виведення рівнянь механічної характеристики, що дозволяє аналізувати пускові режими, визначати критичні моменти та оцінювати стійкість роботи приводу під час змін статичного навантаження.

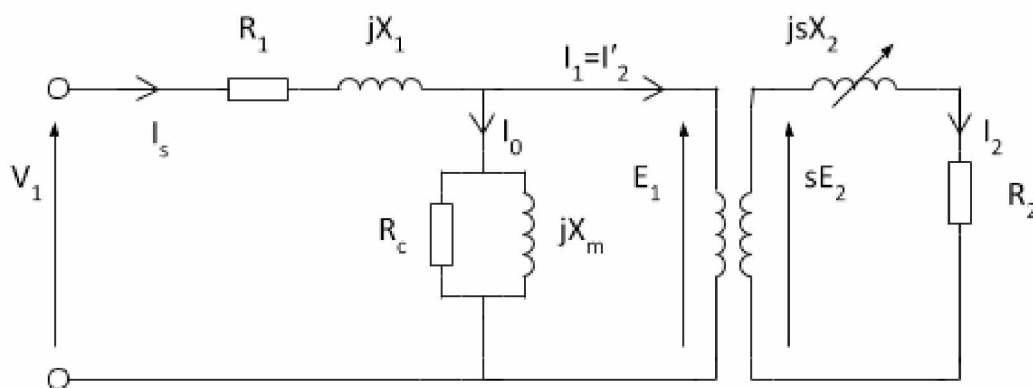


Рис. 2.1. Заступна Т-схема 1LE1503-1EB43-4FA4-Z

$$U_{1\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ В.} \quad (2.1)$$

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{22 \cdot 10^3}{0,93} = 23,66 \text{ кВт.} \quad (2.2)$$

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном}}{3U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{ном}} = \frac{23,66 \cdot 10^3}{3 \cdot 230,94 \cdot 0,83} = 41,138 \text{ А.} \quad (2.3)$$

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi \cdot n_{ном}}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1470}{60} = 153,94 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.4)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.5)$$

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{157,08 - 153,94}{157,08} = 0,02. \quad (2.6)$$

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{22 \cdot 10^3}{153,94} = 142,91 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.7)$$

Втрати потужності [4, 5]:

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}(1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{22 \cdot 10^3(1 - 0,93)}{0,93} = 1655,9 \text{ Вт}. \quad (2.8)$$

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

$$\Delta P_{мех ном} = 0,1 \cdot \Delta P_{ном} = 0,1 \cdot 1655,9 = 165,59 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{доо} = 0,05 \cdot \Delta P_{ном} = 0,05 \cdot 1655,9 = 82,795 \text{ Вт}.$$

Моменти холостого ходу і електромагнітний [4, 5]:

$$M_0 = \frac{\Delta P_{мех ном} + \Delta P_{доо}}{\omega_0} = \frac{165,59 + 82,795}{157,08} = 1,583 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

$$M_{е ном} = M_{ном} + M_0 = 142,91 + 1,5813 = 144,49 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.11)$$

Змінні втрати потужності статора і ротора [4, 5]:

$$\Delta P_{зм 2 ном} = M_{е ном} \omega_0 s_{\min} = 144,49 \cdot 157,08 \cdot 0,02 = 453,7 \text{ Вт}. \quad (2.12)$$

$$\Delta P_{зм ном} = \frac{\Delta P_{ном}}{1 + k_{зм}^2} = \frac{1655,9}{1 + 0,8^3} = 1009,695 \text{ Вт}, \quad (2.13)$$

$$\Delta P_{зм 1 ном} = \Delta P_{зм ном} - \Delta P_{зм 2 ном} = 1009,695 - 453,7 = 555,99 \text{ Вт}. \quad (2.14)$$

Постійні втрати потужності [4, 5]:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ном} - \Delta P_{зм ном} = 1655,9 - 1009,695 = 646,21 \text{ Вт}. \quad (2.15)$$

Активний опір статора [4, 5]:

$$R_1 = \frac{\Delta P_{зм 1 ном}}{3 I_{1 ном}^2} = \frac{555,92}{3 \cdot 41,138^2} = 0,1095 \text{ Ом}. \quad (2.16)$$

Піковий момент:

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.02.СЧ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$M_{e \max} = M_{\max} + M_0 = 471,603 + 1,581 = 473,18 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.17)$$

$$\text{де } M_{\max} = \lambda_{\max} \cdot M_{\text{ном}} = 3,3 \cdot 142,9 = 471,603 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Опори короткого замикання і ротора [4, 5]:

$$Z = \frac{3}{2} \frac{U_{\phi \text{ ном}}^2}{\omega_0 M_{e \max}} - R_1 = \frac{3 \cdot 230,94^2}{2 \cdot 157,08 \cdot 473,18} - 0,1095 = 0,967 \text{ Ом}. \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} R'_2 &= \frac{1}{2} s_{\text{ном}} \left(b + \sqrt{b^2 - 4Z^2} \right) = \\ &= \frac{1}{2} 0,02 \left(6,831 + \sqrt{6,831^2 - 4 \cdot 0,967^2} \right) = 0,134 \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\text{де } b = \frac{3U_{\phi \text{ ном}}^2}{\Delta P_{\text{зм } 2 \text{ ном}}} s_{\text{ном}} - 2R_1 = \frac{3 \cdot 230,94^2}{453,7} 0,02 - 2 \cdot 0,1095 = 6,831.$$

Індуктивність короткого замикання [4, 5]:

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z^2 - R_1^2} = \sqrt{0,967^2 - 0,1095^2} = 0,961 \text{ Ом}.$$

Критичне ковзання:

$$s_{\max} = s_{\text{ном}} \left(\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1} \right) = 0,02 \left(3,3 + \sqrt{3,3^2 - 1} \right) = 0,129. \quad (2.20)$$

Механічна характеристика $s = f(M)$ 1LE1503-1EB43-4FA4-Z приводу консольного крану (рис. 2.2):

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

Електромеханічна характеристика $s = f(I'_2)$ 1LE1503-1EB43-4FA4-Z приводу консольного крану (рис. 2.3):

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

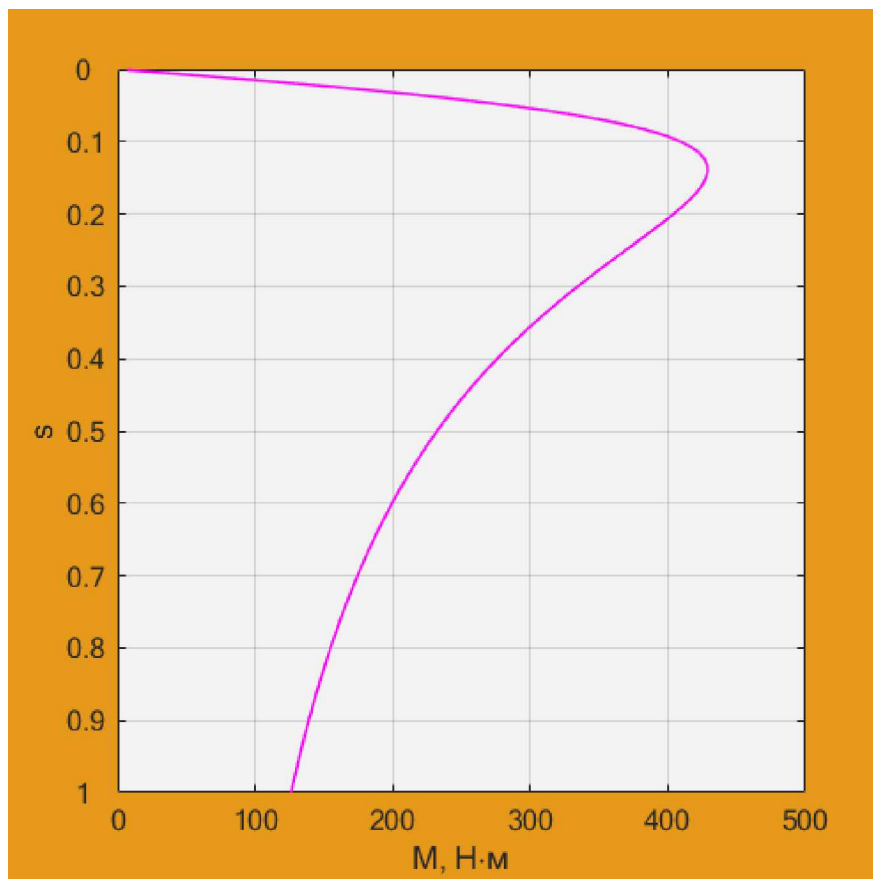


Рис. 2.2. Механічна характеристика 1LE1503-1EB43-4FA4-Z

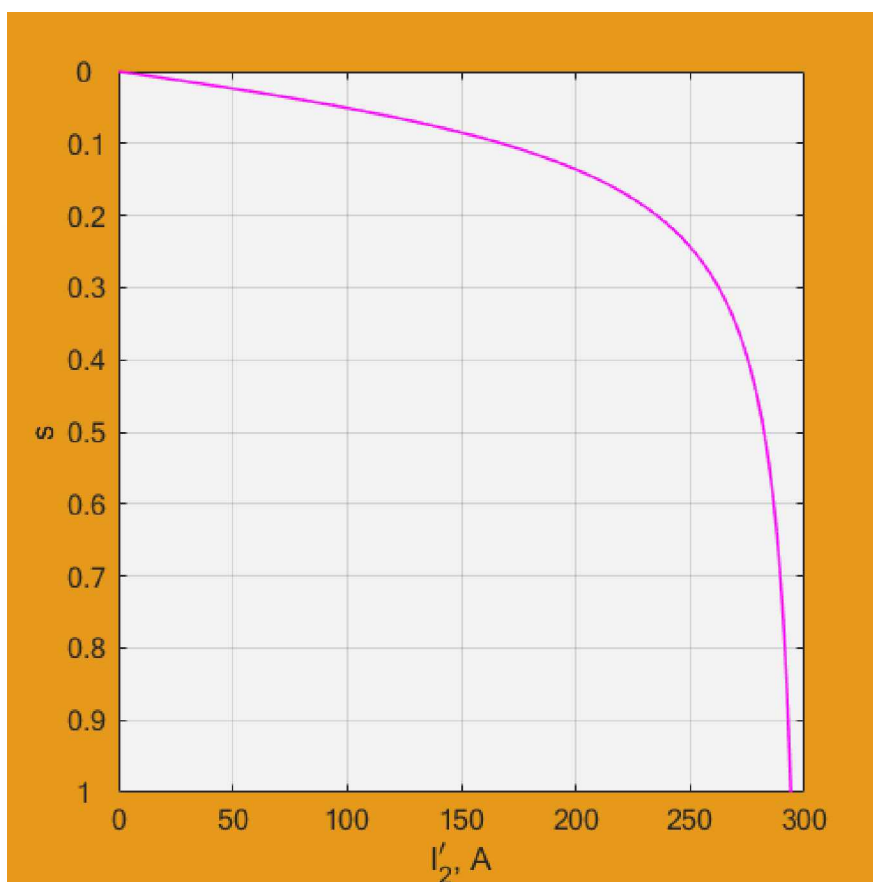


Рис. 2.3. Електромеханічна характеристика 1LE1503-1EB43-4FA4-Z

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.02.СЧ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Аналіз отриманих графічних залежностей чітко вказує на те, що класичний прямий пуск асинхронного двигуна, який передбачає жорстке підключення його статора до мережі з номінальною напругою та стандартною частотою 50 Гц, супроводжується небажаними піковими значеннями пускового струму та незадовільною динамікою електромагнітного моменту. З огляду на ці суттєві недоліки, для подальшої оптимізації роботи приводу доцільно перейти до детального дослідження статичних характеристик електродвигуна в умовах застосування частотного методу регулювання.

2.2 Статичні характеристики привідного двигуна консольного крану в системі ПЧ-АД

Можливість керування швидкістю обертання асинхронного електродвигуна через варіювання частоти живильної напруги базується на прямій пропорційній залежності швидкості обертання магнітного поля статора від цього параметра. Однак, оскільки будь-яка корекція частоти неминуче призводить до зміни магнітного потоку машини, для забезпечення стабільної та ефективної роботи системи критично важливо синхронно регулювати також і амплітудне значення напруги. Варто зазначити, що в умовах такого частотного керування величина відносного ковзання двигуна перебуває в прямій залежності від відносної частоти прикладеної живильної напруги, що формує єдиний взаємопов'язаний механізм налаштування електропривода. Усі означене описують вирази:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad (2.23)$$

$$\Phi_1 \approx \frac{U_1}{k \cdot f_1}; \quad (2.24)$$

$$\frac{f_{1i}}{f_{ном}} = f_1', \quad (2.25)$$

тут f_{1i} – регульована частота ;

$f_{ном}$ – номінальна базова частота.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.02.СЧ</i>	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Дослідження статичних властивостей електричної машини в умовах частотного керування традиційно базується на використанні її заступної Т-схеми (рис. 2.1). Ключовим аспектом такого симулювання є обов'язкове врахування прямої залежності реактивних опорів обмоток від частотних параметрів прикладеної напруги, що є критично важливим для коректної оцінки реальної поведінки та характеристик електропривода під час регулювання:

$$\begin{aligned}x_{1i} &= x_{1ном} f_1'; \\x_2' &= x_{2ном}' f_1'; \\x_{\mu i} &= x_{\mu ном} f_1'; \\x_{\kappa} &= x_{\kappa ном} f_1',\end{aligned}\tag{2.26}$$

де $x_{1ном}$, $x_{\mu ном}$, $x_{2ном}'$, $x_{\kappa ном}$ – індуктивні опори обмоток.

З вираження:

$$P = M \omega_{0i} s_i = 3 I_2'^2 R_2',\tag{2.27}$$

впливає, що

$$M = \frac{3 I_2'^2 R_2'}{\omega_{0i} s_i}\tag{2.28}$$

З урахуванням $x_{1ном}/x_{\mu ном} \ll 1$ і маємо електромеханічні характеристики ПЧ-АД консольного крану:

$$I_2'(s_i) = \frac{U_{1i}}{\sqrt{x_{\kappa ном}^2 f_1'^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_i}\right)^2 + \left(\frac{R_1 R_2'}{s_i x_{\mu ном} f_1'}\right)^2}}.\tag{2.29}$$

Механічні характеристики ПЧ-АД консольного крану маємо з:

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

Для сталості пікового моменту напругу на статорі змінюватимемо як [5]:

$$\frac{U'_1}{f'_1} = const, \text{ де } U'_1 = \frac{U_{1i}}{U_{ном}}$$

Механічні й електромеханічні характеристики 1LE1503-1EB43-4FA4-Z в системі ПЧ-АД консольного крану приведені на рис. 2.4 і 2.5.

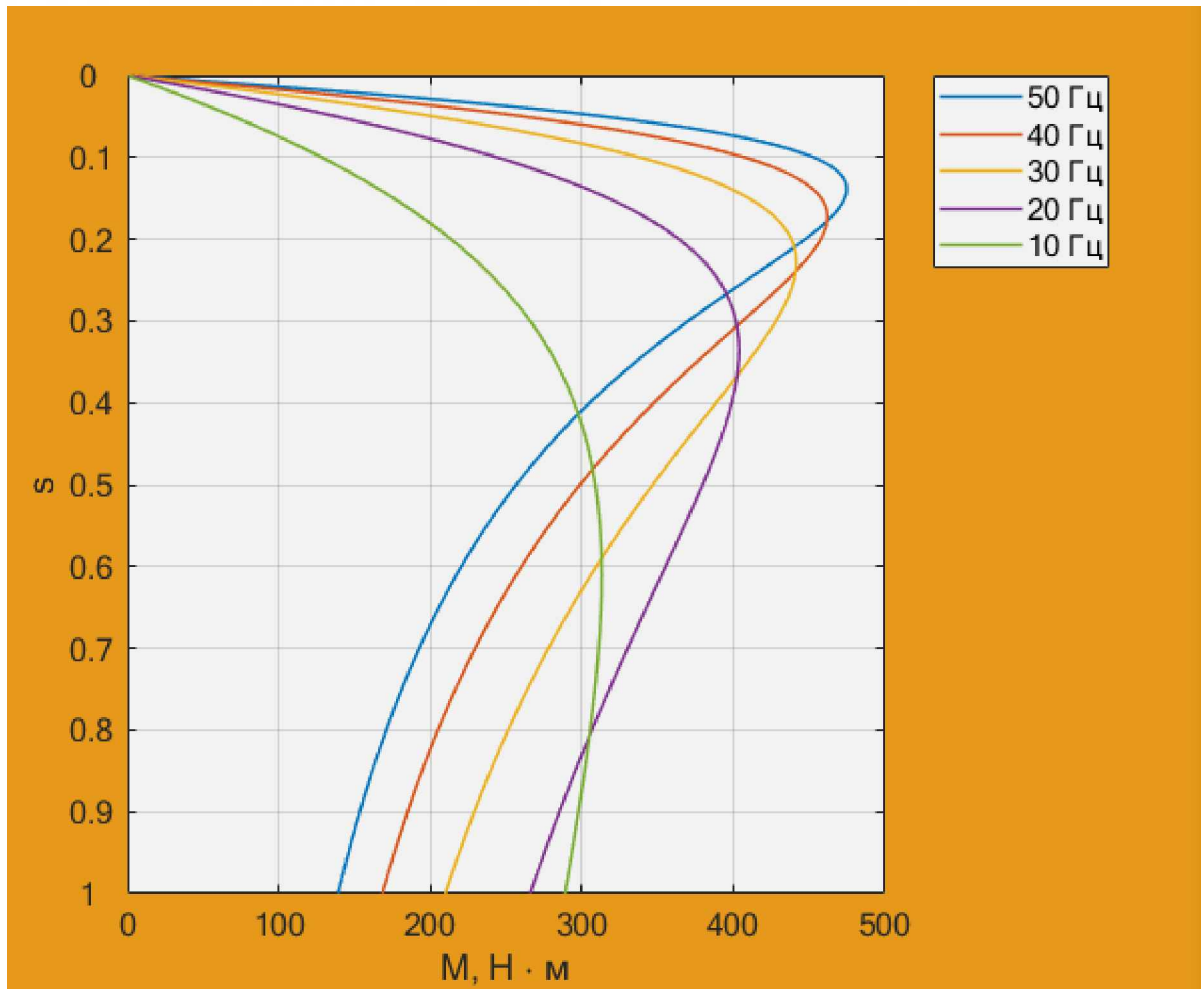


Рис. 2.4. Механічні характеристики 1LE1503-1EB43-4FA4-Z в системі ПЧ-АД

У разі використання електродвигуна моделі 1LE1503-1EB43-4FA4-Z зниження частоти живлення спричиняє суттєве відносне падіння напруги на активному опорі, що неминуче призводить до ослаблення магнітного потоку та, як наслідок, до зменшення критичного моменту машини (як це відображено на рис. 2.4). З огляду на цю особливість, для успішного регулювання швидкості обертання зі збереженням незмінного значення критичного моменту необхідно забезпечити такий режим роботи, за якого амплітуда напруги зменшується в меншій пропорції порівняно зі зниженням частоти.

$$U_1 \approx U_{ном} f_1' + I_{ном} R_1 (1 - f_1'). \quad (2.30)$$

Пусковий струм згідно рис. 2.5 спадає пропорційно з частотою, що є позитивно діє на частини двигуна.

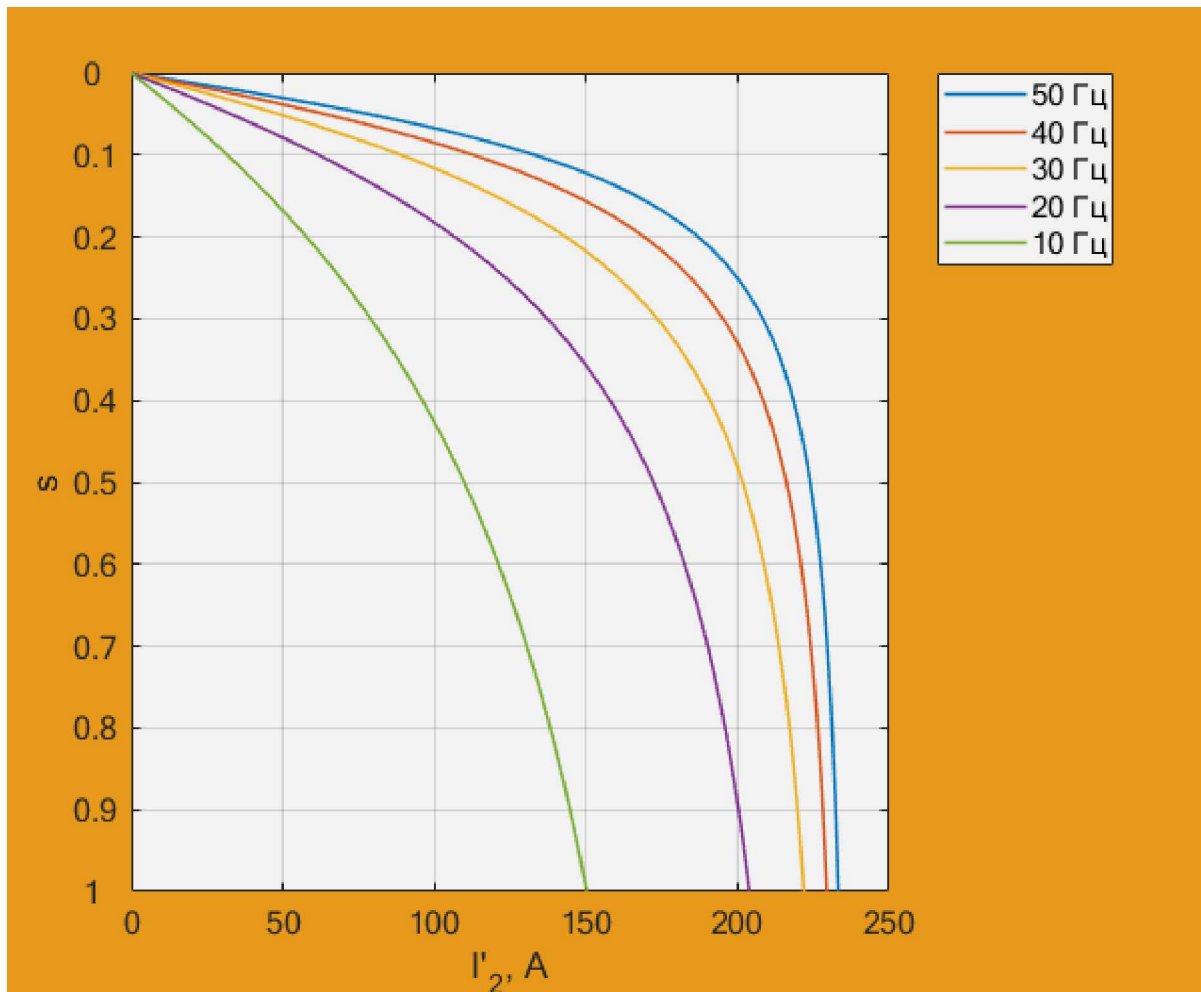


Рис. 2.5. Електромеханічні характеристики 1LE1503-1EB43-4FA4-Z в системі ПЧ-АД

Далі розглядатимемо динаміку ПЧ-АД консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

2.3 Симуляційна модель привідного двигуна консольного крану

Побудова симуляційної моделі динаміки асинхронного двигуна на основі рівнянь узагальненої електричної машини передбачає комплексний математичний опис електромагнітних та механічних процесів у системі взаємно перпендикулярних осей координат, що обертаються, зазвичай позначуваних як d і q . Фундаментом такої моделі виступає система

диференціальних рівнянь напруг для контурів статора та ротора, які враховують падіння напруги на активних опорах, швидкість зміни потоків зчеплення та електрорушійні сили обертання, що виникають через відносний рух ротора. Потоки зчеплення при цьому виражаються через власні індуктивності розсіювання обмоток та спільну індуктивність намагнічування, що дозволяє чітко пов'язати миттєві значення струмів статора і ротора в єдину нелінійну магнітну систему. Ключовим елементом, що забезпечує енергетичний зв'язок між електричною та механічною підсистемами, є електромагнітний момент, який обчислюється як векторний добуток векторів потоків зчеплення та струмів або через добуток взаємної індуктивності на відповідні ортогональні компоненти струмів осей d і q. Отримане значення моменту передається в рівняння механічного руху, де воно діє разом із моментом статичного навантаження, враховуючи сумарний момент інерції приводу та коефіцієнт в'язкого тертя, що в результаті інтегрування дає поточні значення кутової швидкості та кута повороту валу.

Усі залежності відомі та взяті з [5, 6]:

$$\begin{aligned} U_A &= R_A \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ U_B &= R_B \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ U_C &= R_C \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} U_a &= R_a \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \\ U_b &= R_b \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, \\ U_c &= R_c \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}. \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c, \\ \Psi_B &= L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c, \\ \Psi_C &= L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c. \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned}
\Psi_a &= L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c, \\
\Psi_b &= L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c, \\
\Psi_c &= L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c.
\end{aligned} \tag{2.34}$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \tag{2.35}$$

$$M = k(\bar{\Psi} \cdot \bar{i}). \tag{2.36}$$

Спростуємо модель до векторного формату:

$$\bar{i}_S = \frac{2}{3} \cdot I_m \left(\cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) = I_m \cdot e^{j\omega t}. \tag{2.37}$$

$$\left. \begin{aligned}
\bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} \\
\bar{U}_R &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} \\
\bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m(\theta) \bar{i}_R \\
\bar{\Psi}_R &= L_m(\theta) \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R
\end{aligned} \right\}, \tag{2.38}$$

$$\left. \begin{aligned}
M &= \frac{3}{2} p \cdot L_m \cdot |\bar{i}_S \times \bar{i}| \\
M &= \frac{3}{2} p \cdot |\bar{\Psi}_S \times \bar{i}_S| \\
M &= \frac{3}{2} p \cdot k_R \cdot |\bar{\Psi}_R \times \bar{i}|
\end{aligned} \right\} \tag{2.39}$$

Перехід до представлення параметрів у відносних одиницях дає:

$$\left. \begin{aligned}
\bar{U}_S &= R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j \cdot \alpha_k \cdot \bar{\Psi}_S \\
0 &= R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j \cdot (\alpha_k - p \cdot \nu) \cdot \bar{\Psi}_R \\
\bar{\Psi}_S &= X_S \bar{i}_S + X_m \bar{i}_R \\
\bar{\Psi}_R &= X_m \bar{i}_S + X_R \bar{i}_R \\
m &= k \cdot |\bar{\Psi}_i \times \bar{i}_j| \\
\bar{T}_m \frac{d\nu}{dt} &= m - m_H
\end{aligned} \right\} \tag{2.40}$$

$$\left. \begin{aligned}
 U_{S\alpha} &= r \cdot (1 + \bar{T}'_S \cdot p) \cdot i_{S\alpha} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\alpha} - k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 U_{S\beta} &= r \cdot (1 + \bar{T}'_S \cdot p) \cdot i_{S\beta} - \frac{k_R}{\bar{T}_R} \cdot \psi_{R\beta} + k_R \cdot p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\alpha} + \frac{1}{\bar{T}_r} \cdot (1 + \bar{T}_R \cdot p) \cdot \Psi_{R\alpha} + p \cdot v \cdot \Psi_{R\beta} \\
 0 &= -k_R \cdot r_R \cdot i_{S\beta} + \frac{1}{\bar{T}_R} \cdot (1 + \bar{T}_R \cdot p) \cdot \Psi_{R\beta} - p \cdot v \cdot \Psi_{R\alpha} \\
 m &= k_R \cdot (\Psi_{R\alpha} \cdot i_{S\beta} - \Psi_{R\beta} \cdot i_{S\alpha}) \\
 \bar{T}_m \cdot p \cdot v &= m - m_H
 \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

Тут $\bar{u} = \frac{\bar{u}}{U_b}, \bar{i} = \frac{\bar{i}}{I_b}, \bar{\Psi} = \frac{\bar{\Psi}}{\Psi_b} \quad \alpha_k = \frac{\omega_k}{\omega_b}, v = \frac{\omega_m}{\omega_b} \quad m = \frac{M}{M_b},$

$$r_S = \frac{R_S}{R_b}, r_R = \frac{R_R}{R_b}, X_S = \frac{\omega_b L_S}{R_b}, X_R = \frac{\omega_b L_R}{R_b}, X_m = \frac{\omega_b L_m}{R_b}, \bar{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b}.$$

Усі ці взаємообумовлені математичні залежності реалізуються в спеціалізованому середовищі для симуляцій у вигляді сукупності функціональних блоків інтегрування, множення, підсумовування та нелінійних перетворень (див. рис. 2.6).

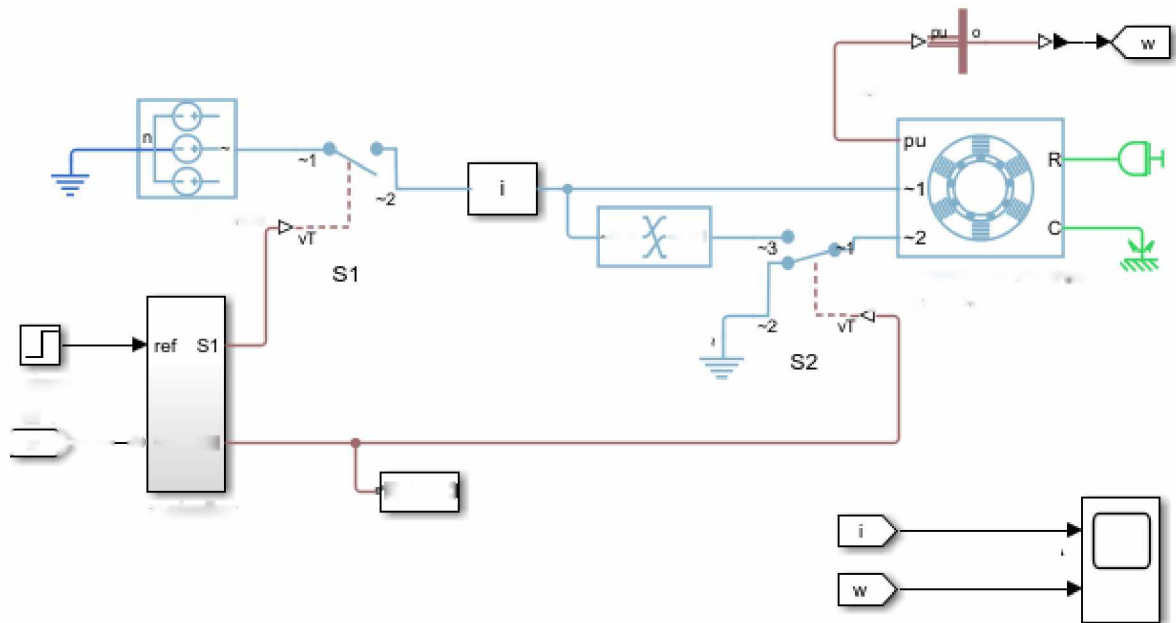


Рис. 2.6. Симуляційна модель динаміки привідного двигуна консольного крану (без перетворювача частоти) [7]

Динаміка привідного двигуна при частотах статорної напруги 50 Гц, 40 Гц і 30 Гц показуються далі.

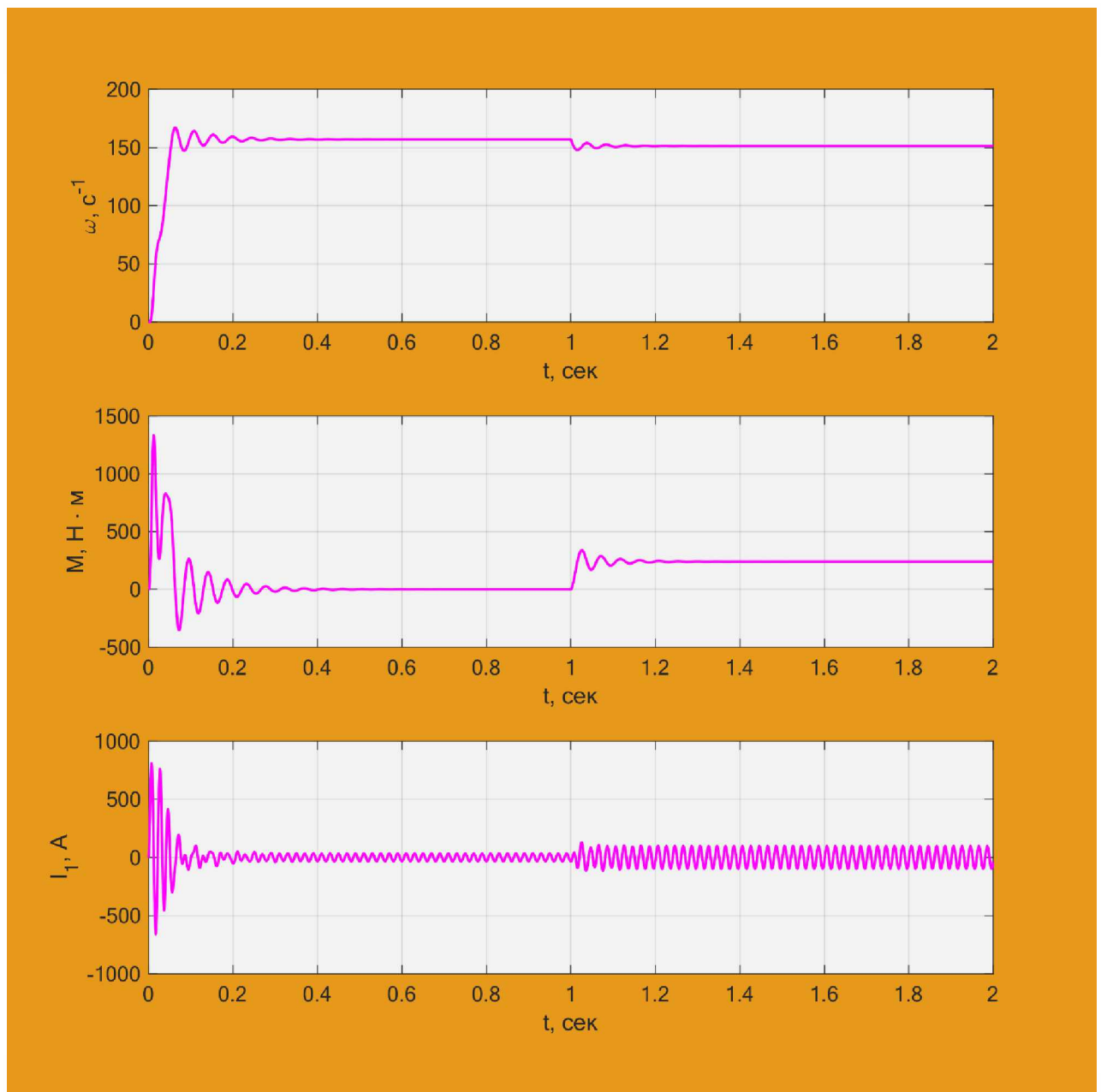


Рис. 2.7. Симуляція динамічних властивостей привідного двигуна консольного крану при частоті 50 Гц

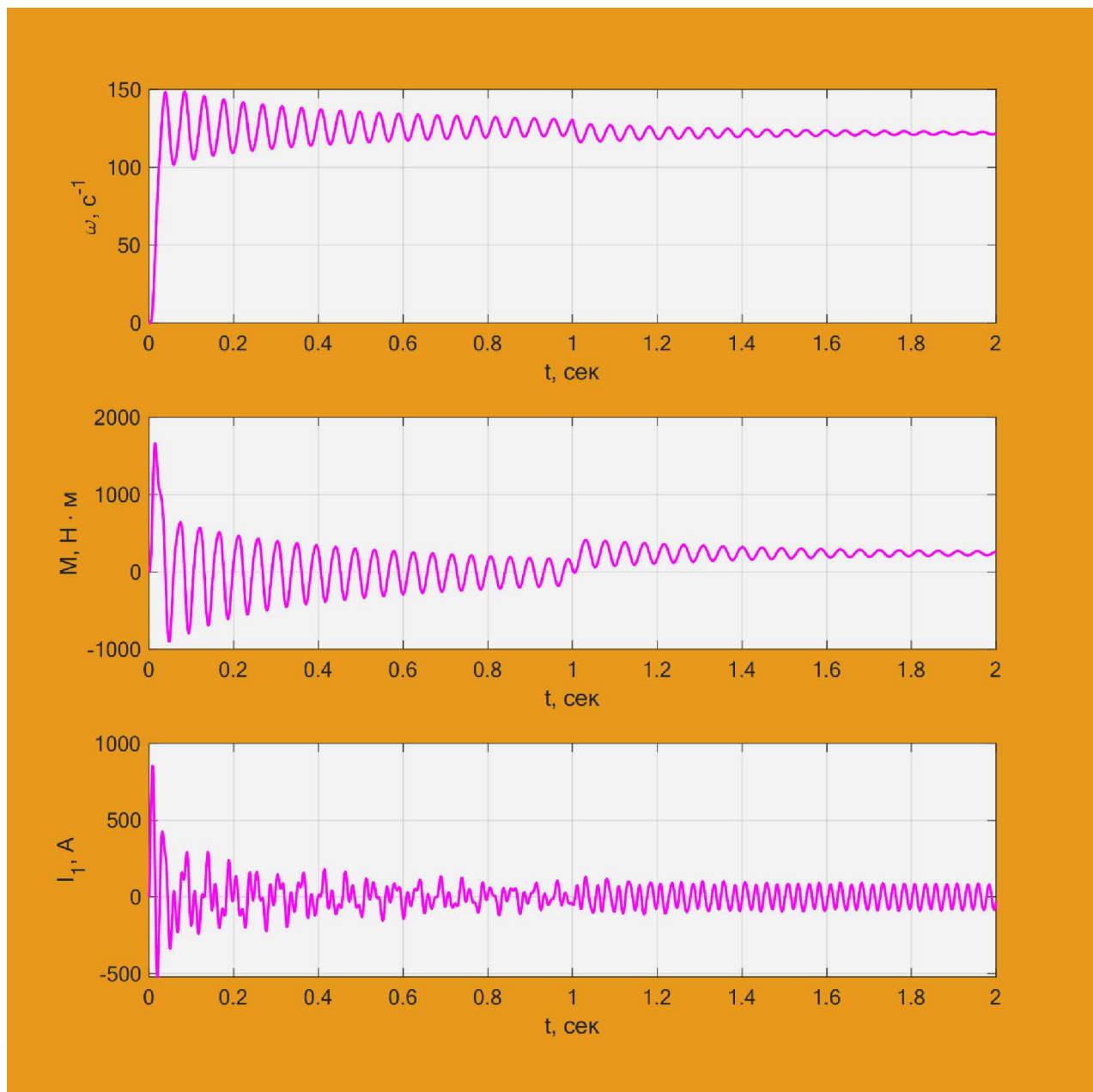


Рис. 2.8. Симуляція динамічних властивостей привідного двигуна консольного крану при частоті 40 Гц

Зниження частоти живильної напруги в асинхронному електроприводі неминуче призводить до зростання коливальності під час перехідних процесів, що зумовлено тим, що на низьких частотах активний опір обмоток статора починає відігравати домінуючу роль порівняно з індуктивним опором розсіювання, через що традиційні скалярні методи втрачають точність підтримки номінального магнітного потоку, а демпфуючі властивості електромагнітного поля значно погіршуються.

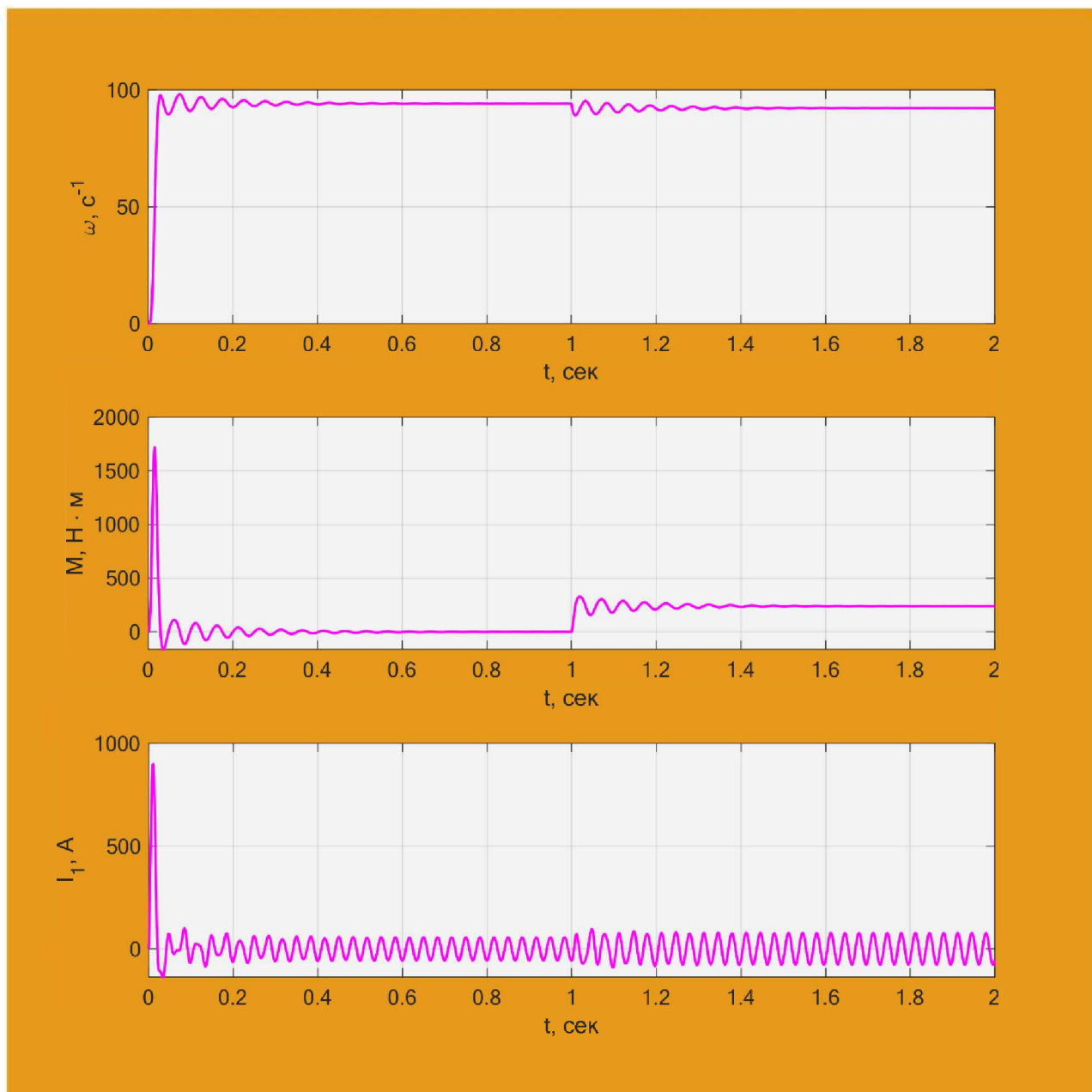


Рис. 2.9. Симуляція динамічних властивостей привідного двигуна консольного крану при частоті 30 Гц

Крім того, при прикладанні механічного навантаження, наприклад на першій секунді роботи, спостерігається помітна просадка кутової швидкості ротора, оскільки для генерації необхідного додаткового електромагнітного моменту двигуну фізично необхідно збільшити ковзання, а інерційні властивості мас та затримки в контурі зворотного зв'язку не дозволяють стандартному регулятору миттєво компенсувати цей енергетичний дисбаланс. Саме ці динамічні обмеження обумовлюють необхідність розробки системи керування, яка здатна майже миттєво реагувати на зміни навантаження

шляхом прямого вибору оптимальних комутаційних станів перетворювача частоти для корекції потоку, забезпечуючи високу швидкодію, мінімізацію швидкісних провалів та ефективне придушення небажаних електромагнітних коливань.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі проведено комплексне дослідження статичних та динамічних властивостей асинхронного двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z, який використовується в приводі консольного крану. На основі розрахунку параметрів заступної Т-схеми та побудови відповідних графічних залежностей доведено неефективність класичного прямого пуску двигуна від промислової мережі, який супроводжується значними піковими струмами та незадовільною динамікою електромагнітного моменту, що обґрунтовує необхідність переходу до системи частотного керування.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.02.СЧ</i>	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 3. Проєктна розробка

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ІР</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Волковський В.О.</i>			<i>Проєктна розробка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>36</i>	<i>51</i>
<i>Конс.</i>						<i>ЗЕЕМ-23ск</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Обґрунтування системи керування електроприводом консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Для САК ПЧ-АД консольного крану пропонується використанням векторного керування з орієнтацією за полем (КОП). На відміну від традиційних скалярних методів, які втрачають ефективність на низьких швидкостях через домінування падіння напруги на активному опорі статора над індуктивною складовою, КОП забезпечує точне математичне підтримання номінального магнітного потоку ротора незалежно від частоти обертання валу. Це є критично важливим для консольних кранів, де операції мікропереміщення, наведення та точного позиціонування вантажу є штатними режимами роботи. Збереження повного критичного моменту на швидкостях, близьких до нуля, дозволяє уникнути просідання швидкості під навантаженням, що є основною фізичною причиною виникнення небезпечних маятникових коливань підвішеного вантажу при старті, зупинці або зміні напрямку руху механізму.

Фундаментальна властивість КОП, яка полягає у математичному розв'язуванні каналів керування потоком збудження та електромагнітним моментом, надає приводу видатні динамічні характеристики, недоступні для скалярних систем. При раптовому накиданні механічного навантаження, наприклад, у момент відриву вантажу від землі або різкої зміни опору руху, контур квадратурного струму i_q миттєво формує необхідний додатковий момент, компенсуючи збурення за частки секунди. Така висока швидкодія внутрішніх контурів струму, посилена алгоритмами компенсації перехресних електромагнітних зв'язків, гарантує високу жорсткість механічної характеристики. Це робить рух крана плавним і передбачуваним навіть при значних змінах маси вантажу, що безпосередньо підвищує безпеку експлуатації та суттєво зменшує втомні навантаження на металоконструкції крана, редуктори та підйомні канати за рахунок мінімізації крутильних коливань та ударних моментів у механічній передачі.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР</i>	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Окремо слід відзначити беззаперечну ефективність КОП у чотириквadrантному режимі роботи, який є невід'ємною частиною технологічного циклу роботи консольного крану. При опусканні вантажу або інтенсивному гальмуванні механізму асинхронна машина переходить у генераторний режим. Векторне керування забезпечує плавний, стабільний і контрольований перехід між двигунним та генераторним режимами без втрати орієнтації за вектором потоку. Це дозволяє точно регулювати швидкість спуску важких вантажів виключно за рахунок електромагнітного моменту, що значно знижує теплове та механічне зношування традиційних колодкових або дискових гальм. Більше того, оптимізоване керування потоком дозволяє реалізувати рекуперативне гальмування з поверненням електроенергії в мережу або бортовий накопичувач, що підвищує загальну енергоефективність кранового комплексу та зменшує нагрівання гальмівних резисторів. Таким чином, впровадження КОП перетворює стандартний асинхронний електропривод на високоточний, енергоефективний та динамічно стійкий виконавчий механізм, який повністю відповідає суворим сучасним вимогам до безпеки, точності позиціонування та довговічності кранової техніки.

3.2 Принцип векторного керування з орієнтацією за полем ротора для САК електроприводу консольного крану

Принцип КОП асинхронним двигуном базується на ідеї математичного перетворення змінних трифазної системи в систему двох взаємно перпендикулярних осей, що обертаються синхронно з вектором потоку зчеплення ротора. Це дозволяє розв'язати рівняння електропривода так, щоб керування електромагнітним моментом і магнітним потоком стало незалежним, аналогічно до того, як це реалізовано в двигуні постійного струму з незалежним збудженням [8].

Фундаментом методу є послідовність координатних перетворень. Спочатку миттєві значення фазних струмів статора i_A, i_B, i_C перетворюються з нерухомої трифазної системи координат у нерухому двофазну систему ab . З

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР</i>	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

урахуванням умови відсутності струму в нульовому проводі ($i_A + i_B + i_C = 0$), ці рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} i_a &= i_A; \\ i_b &= \frac{1}{\sqrt{3}}(i_A + 2i_B). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Далі застосовується перетворення Парка, яке переводить змінні з нерухомої системи ab у систему координат dq , що обертається з кутовою швидкістю ω_e . Кут повороту θ_e визначається як інтеграл від кутової швидкості обертання вектора потоку [8]:

$$\begin{aligned} i_d &= i_a \cos(\theta_e) + i_\beta \sin(\theta_e); \\ i_q &= -i_a \sin(\theta_e) + i_\beta \cos(\theta_e); \end{aligned} \quad (3.2)$$

Послідовне перетворення отримало назву перетворення Парка-Горєва.

Ключовим припущенням векторного керування з орієнтацією за полем ротора є вирівнювання осі d системи координат, що обертається, з вектором потоку зчеплення ротора $\vec{\psi}_r$. Це означає, що проекція потоку ротора на вісь q дорівнює нулю ($\psi_{rq} = 0$), а весь потік зосереджений на осі d ($\psi_{rd} = |\vec{\psi}_r|$). Виходячи з рівнянь напруг ротора (які для короткозамкненого ротора дорівнюють нулю) та рівнянь потоків зчеплення, можна вивести диференціальне рівняння для потоку ротора на осі d [8]:

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} + \frac{1}{T_r}\psi_{rd} = \frac{L_m}{T_r}i_{sd}, \quad (3.3)$$

де $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постійна часу ротора; L_m – індуктивність намагнічування; L_r – повна індуктивність ротора; i_{sd} – проекція струму статора на вісь d .

(3.3) є критично важливим, оскільки воно показує, що струм i_{sd} виконує роль струму збудження і безпосередньо керує величиною магнітного потоку ротора, причому цей процес має інерційний характер, обумовлений постійною часу T_r .

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР</i>	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Електромагнітний момент двигуна в орієнтованій системі координат виражається через добуток потоку ротора та квадратурної складової струму статора [8]:

$$M_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} i_{sq}, \quad (3.4)$$

де p – пари полюсів.

Оскільки ψ_{rd} підтримується постійним (на швидкостях нижче номінальної), електромагнітний момент стає прямо пропорційним струму i_{sq} . Це і є суть КОП: зміна i_{sq} миттєво змінює момент, не впливаючи на магнітний потік.

Для того щоб система координат dq залишалася жорстко орієнтованою на вектор потоку ротора під час динамічних змін навантаження, необхідно точно розраховувати частоту ω_s . Вона визначається з умови $\psi_{rq} = 0$ і виражається через миттєві значення струмів та потік [8]:

$$\omega_s = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}} = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{i_{sq}}{\psi_{rd}}. \quad (3.5)$$

Повна електрична кутова швидкість обертання системи координат дорівнює сумі механічної кутової швидкості ротора ω_r (помноженої на пари полюсів p) та частоти $\omega_e = p\omega_r + \omega_s$. Інтегрування цієї швидкості дає необхідний кут θ_e для перетворень Парка-Горсва.

На практиці для забезпечення високої динаміки та незалежності контурів струму застосовується компенсація перехресних зв'язків. Рівняння напруг статора в осях dq містять члени, що залежать від швидкості обертання та струмів іншої осі. Для їх компенсації задаючі напруги для широтно-імпульсного модулятора формуються за такими виразами [8]:

$$\begin{aligned} u_{sd}^* &= \left(K_{pI} + \frac{K_{iI}}{s} \right) (i_{sd}^* - i_{sd}) - \omega_e \sigma L_s i_{sq}; \\ u_{sq}^* &= \left(K_{pI} + \frac{K_{iI}}{s} \right) (i_{sq}^* - i_{sq}) + \omega_e \sigma L_s i_{sd} + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – коефіцієнт розсіювання; K_{pI}, K_{iI} – коефіцієнти

пропорційного та інтегрального ПІ-контролерів струму.

Доданки з ω_e компенсують електрорушійні сили обертання, роблячи об'єкт керування для регуляторів струму схожим на просту аперіодичну ланку.

Алгоритмічно робота системи КОП виглядає як замкнений цикл: зовнішній контур регулювання швидкості формує завдання для квадратурного струму i_{sq}^* , а контур підтримки потоку задає i_{sd}^* . Виміряні фазні струми перетворюються в осі dq , порівнюються із заданими значеннями, а отримані помилки обробляються ПІ-регуляторами з урахуванням компенсаційних доданків. Отримані напруги u_{sd}^* і u_{sq}^* зворотним перетворенням Парка-Горєва переводяться в систему ab , після чого алгоритм просторово-векторної модуляції генерує керуючі імпульси для силових ключів перетворювача частоти, забезпечуючи високу точність, швидкодію та плавність регулювання моменту й швидкості асинхронного двигуна.

3.3 Симуляційна модель для аналізу системи керування електроприводом консольного крану

На рис. 3.1 показується застосована симуляційна модель системи електроприводу консольного крану в MATLAB/SimscapPS.

Джерелом живлення системи для спрощення виступає джерело постійного струму, що імітує живлення від некерованого випрямляча, яка передає енергію до статора машини через силовий напівпровідниковий інвертор. Зокрема, в даній моделі застосовано трифазний трирівневий перетворювач частоти з фіксацією нейтральної точки.

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

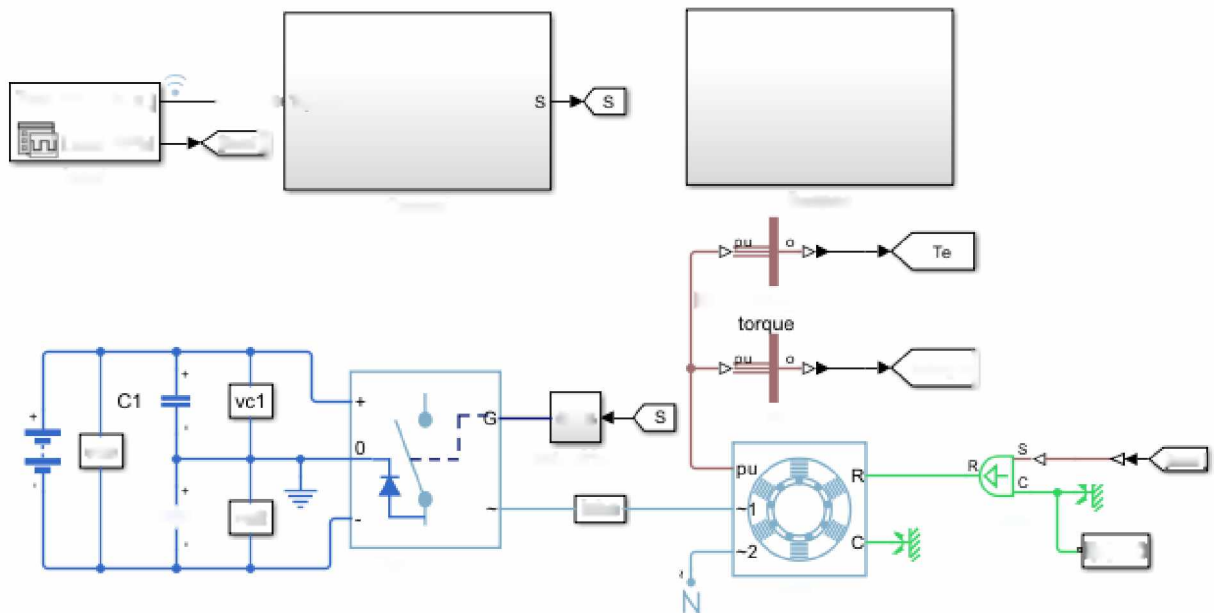


Рис. 3.1. Симуляційна модель електроприводу консольного крану з КОП у MATLAB [9]

Використання саме трирівневої топології, порівняно з класичними дворівневими схемами, дозволяє суттєво зменшити гармонічні спотворення вихідної напруги, знизити швидкість наростання напруги (du/dt), що зменшує електричне навантаження на ізоляцію обмоток двигуна, а також підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Функціонально асинхронна машина здатна працювати у двох основних енергетичних режимах: режимі двигуна, коли електрична енергія перетворюється на механічну для забезпечення руху транспортного засобу, та режимі генератора, який реалізується під час рекуперативного гальмування для повернення кінетичної енергії назад у високовольтну батарею. Для моделювання механічного навантаження на валу в даній симуляційній моделі використовується ідеальне джерело кутової швидкості. Такий підхід дозволяє задати необхідний профіль швидкості або опору руху без ускладнення моделі зайвими механічними інерційними ланками, що дає змогу досліднику зосередитися виключно на оцінці якості та швидкодії електричного керування в ізольованому вигляді.

The block diagram illustrates the control system for a three-phase, three-level inverter. Key components include:

- Reference Inputs:** Magnetizing current reference (0.7 p.u. at 0.4 s) and TqReq.
- Control Blocks:** Rate Limiter (2 p.u./s), PI (i_mr), PI(z), ASM Current Controller, Flux observer, Neutral point controller, and PWM Generator (Three-phase, Three-level).
- Intermediate Signals:** idqRef, idq, vdqFFvdqRef, VphMax, Reset, Vbase, dq0 abc, thetaM, VdcF, Vabc, Vdc, wr, iabc, imr, thetaM, we, vc1, vc2, VdcF, iabc, wr.
- Outputs:** Vabc, Vdc, wr.

Оскільки застосовується трирівневий перетворювач з фіксацією нейтральної точки, критично важливим аспектом стабільної роботи є підтримка балансу напруг на послідовно з'єднаних конденсаторах фільтра постійного струму. Для стабілізації потенціалу нейтральної точки та запобігання її перекосу, що може призвести до виходу з ладу силових ключів, в системі передбачено окремий пропорційний регулятор, який коригує алгоритм комутації, використовуючи надлишкові стани перетворювача.

					КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	

Для всебічного тестування та валідації розробленої системи керування в ході симуляції застосовується профіль у вигляді послідовності східчастих змін завдання, які по чергово подаються як у зоні двигуна, так і в зоні генератора. Це дозволяє комплексно оцінити динамічні властивості приводу, зокрема час перехідного процесу, величину перерегулювання та стійкість при різкій зміні напрямку потоку потужності. Для візуального аналізу отриманих даних модель оснащена спеціалізованим підрозділом осцилографів, який містить набір графічних інструментів для відображення у реальному часі ключових змінних системи: миттєвих значень фазних струмів, напруг, електромагнітного моменту та кутової швидкості, що є необхідним для глибокого інженерного аналізу ефективності запропонованого алгоритму керування.

У віртуальній симуляційній моделі системи ПЧ-АД [9] змінюємо параметри блоку ASM, підставляючи туди обчислені значення для 1LE1503-1EB43-4FA4-Z.

Швидкість, момент і струм привідного двигуна консольного крану в системі ПЧ-АД показані на рис. 3.3.

При симуляції спостерігається швидкість, момент, струм ротора двигуна (трифазний і у осях dq), вихідна напруга інвертора,.

При $t = 0$ завдання швидкості 0 об/хв.

При часі 0,4 сек задається половинна швидкість 800 об/хв і момент при повному навантаженні встановлюється на рівні 1 в.о. Тут зростання швидкості займає 0,2 сек. Далі швидкість задається на номінал 1470 об/хв. Для дотримання швидкості момент спочатку на 0,2 в.о., а після підйому до -1 в.о. Зазначаємо, що система підтримує плавну швидкість без просадок.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР</i>	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

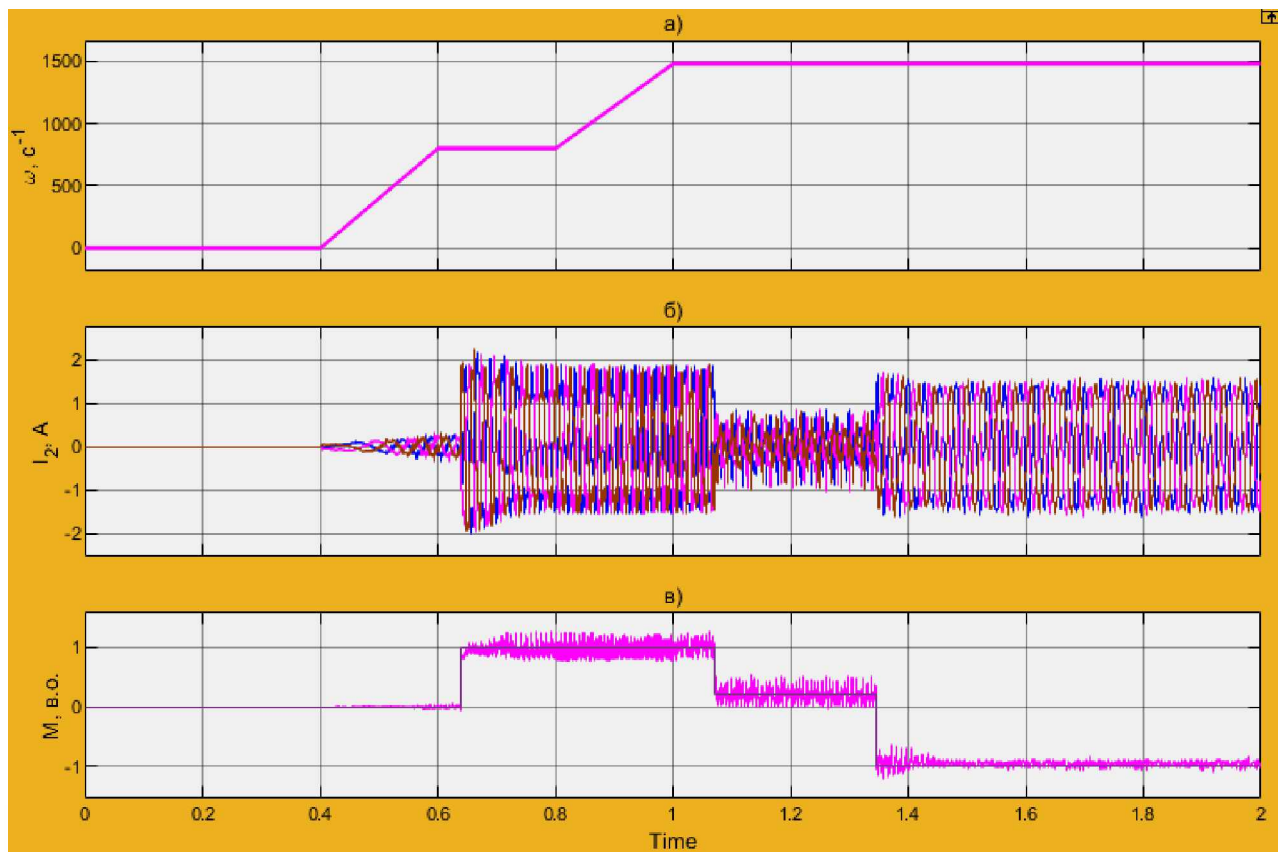


Рис. 3.3. Динаміка привідного двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z консольного крану при КОП

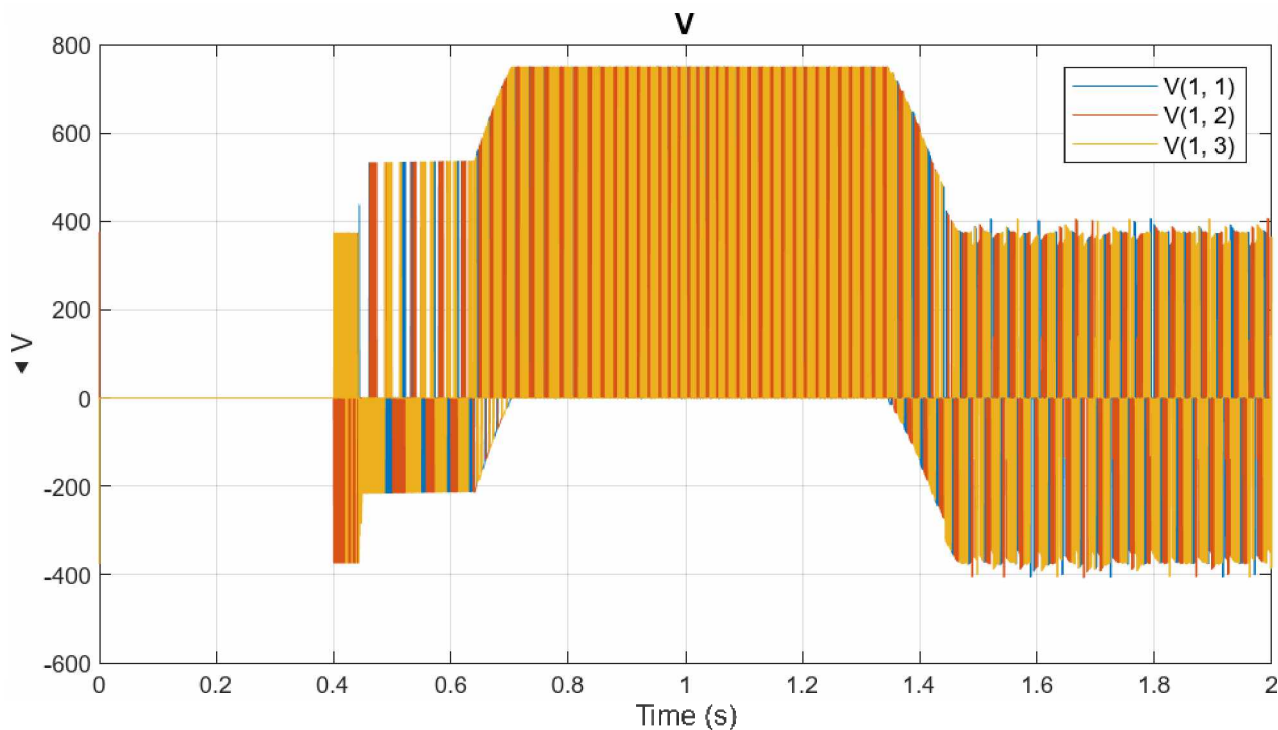


Рис. 3.4. Вихідна напруга трирівневого інвертора

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР

Арк.

45

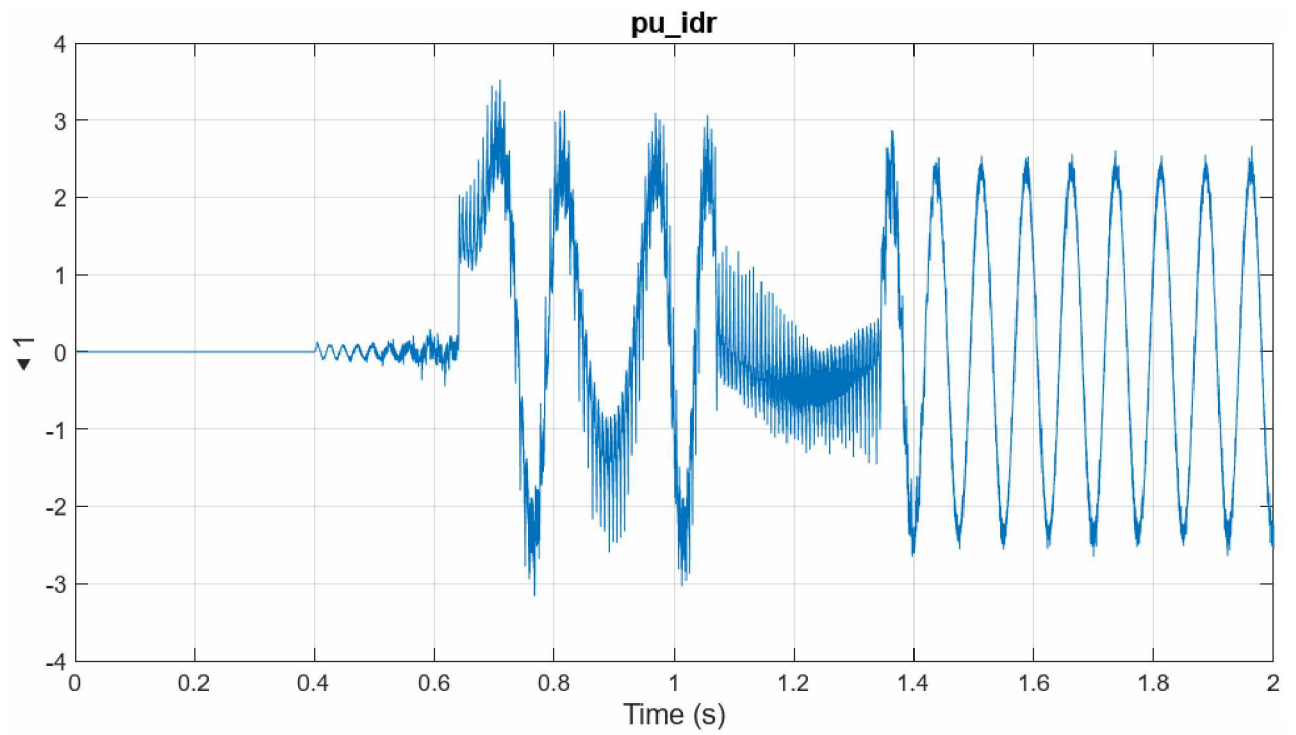


Рис. 3.5. Струм ротора 1LE1503-1EB43-4FA4-Z по вісі d при КОП

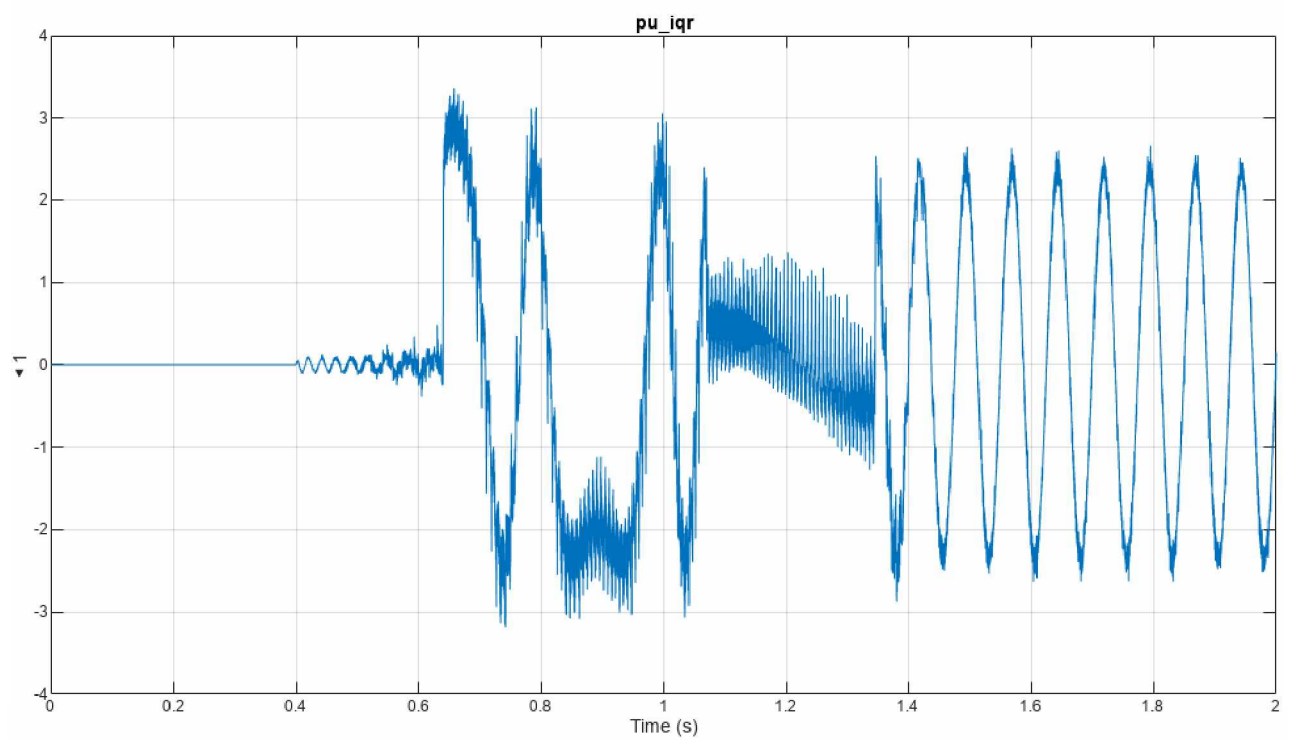


Рис. 3.6. Струм ротора 1LE1503-1EB43-4FA4-Z по вісі q при КОП

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

KHY.PB.141.26.251c.04.03.ПР

Арк.

46

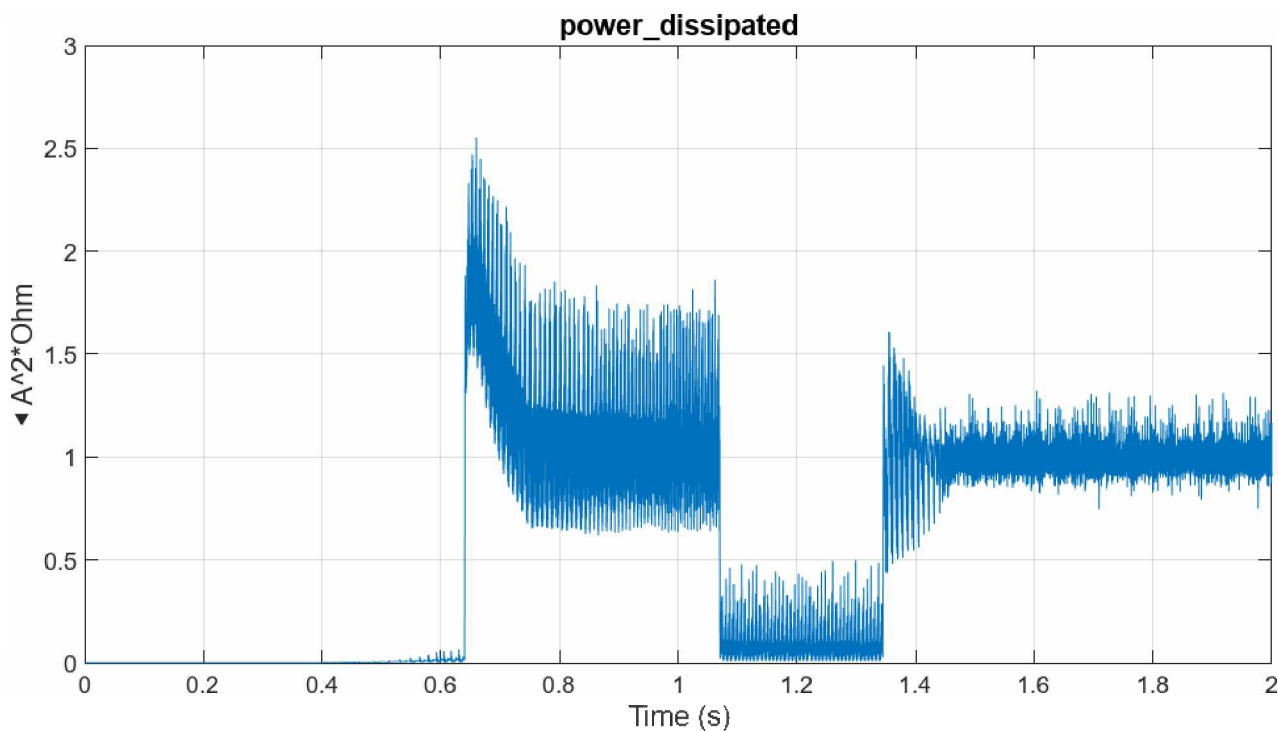


Рис. 3.7. Розсіювана потужність 1LE1503-1EB43-4FA4-Z при КОП

Симуляція динаміки вказує на доцільність застосування КОП для керування електроприводом консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Висновок до розділу 3

У цьому розділі проведено комплексне обґрунтування, теоретичний аналіз та комп'ютерне моделювання САК електроприводом консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на базі векторного керування з орієнтацією за полем. На основі порівняльного аналізу доведено принципові переваги такого керування над традиційними методами. Результати симуляції MATLAB/SimscarePS підтвердили теоретичні положення. Розроблена модель з використанням трирівневого інвертора для двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z продемонструвала високу якість перехідних процесів. Симуляція засвідчила швидкий відгук приводу (час розгону до половинної швидкості становить 0,2 с), стабільне підтримання заданої швидкості без просадок при різкій зміні навантаження, а також коректну роботу контурів регулювання струмів. Загалом, отримані результати переконливо доводять технічну та

експлуатаційну доцільність впровадження системи векторного керування з орієнтацією за полем для електроприводу консольного крану.

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.03.ПР</i>	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. Доведено, що застарілі релейно-контакторні та тиристорні системи керування консольними кранами розливного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» не забезпечують необхідної плавності руху та точності позиціонування. Це призводить до механічного пошкодження вогнетривких матеріалів, підвищеного зносу металоконструкцій і редукторів, а також створює загрозу порушення безперервного технологічного циклу розливу металу.

2. На основі аналізу навантажувальних діаграм, розрахунку динамічних моментів, шляхів гальмування та еквівалентних навантажень було обрано асинхронний електродвигун Siemens 1LE1503-1EB43-4FA4-Z потужністю 22 кВт. Перевірка за умовами нагрівання та перевантаження підтвердила його повну відповідність жорстким умовам експлуатації в металургійному виробництві.

3. Дослідження заступної Т-схеми та статичних характеристик показало, що класичний прямий пуск супроводжується небезпечними піковими струмами. Крім того, при скалярному частотному регулюванні на низьких швидкостях домінування активного опору статора призводить до ослаблення магнітного потоку та критичного зниження моменту двигуна, що робить такий метод непридатним для точних кранових операцій.

4. Застосування векторного керування з орієнтацією за полем дозволяє математично розв'язати канали керування магнітним потоком та електромагнітним моментом. Це забезпечує підтримання повного критичного моменту навіть на швидкостях, близьких до нуля, що є вирішальним фактором для запобігання просіданню швидкості під навантаженням та усунення небезпечних маятникових коливань вантажу.

5. Впровадження керування з орієнтацією за полем забезпечує плавний і контрольований перехід між двигунним та генераторним режимами роботи. Це дозволяє точно регулювати швидкість спуску вантажів виключно

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.В</i>	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

електромагнітним моментом, значно зменшуючи знос механічних гальм, а також реалізувати рекуперативне гальмування з поверненням енергії в мережу.

6. Розроблено та адаптовано симуляційну модель з використанням сучасної силовій електроніки. Для аналізу динаміки створено модель у середовищі MATLAB/SimscapеPS, яка включає трирівневий інвертор.

7. Результати симуляції для двигуна 1LE1503-1EB43-4FA4-Z засвідчили швидкий відгук приводу, стабільне підтримання заданої швидкості без просадок при різкій зміні навантаження, а також коректну та стабільну роботу контурів регулювання струмів. Це остаточно підтверджує доцільність впровадження системи керування з орієнтацією за полем для електроприводу консольного крану ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.В</i>	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Список використаної літератури

1. Кран консольний. *BCI Інженірінг*. URL: <https://intermash.ua/product/kran-konsolnyj/> (Дата звернення: 03.06.2026)
2. Волянюк В.О., Міщук Д.О. Підйомно-транспортні машини (системи): конспект лекцій: у 2-х ч. Ч.2. Київ: КНУБА, 2020. 172 с.
3. D 81.1 Catalog. SIMOTICS Motors. *Siemens*. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_1110720/v1/Motors-D81-1-complete-English-12-2021-Update_2022-07.pdf (Дата звернення: 22.05.2026)
4. Теорія електропривода: підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. Київ: Вища школа, 1993. 494 с.
5. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
6. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.
7. Three-Phase Asynchronous Machine Starting. *MATLAB Help Center*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/three-phase-asynchronous-machine-starting.html> (Дата звернення: 02.06.2026)
8. Yousef A., Abdelmaksoud, S.M. Review on Field Oriented Control of Induction Motor. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology (IJREST)*. 2015. Vol. 2, No 3. Pp. 5–16.
9. Torque Control in Three-Level Converter-Fed Asynchronous Machine Drive. *MATLAB Help Center*. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/torque-control-in-three-level-converter-fed-asynchronous-machine-drive.html> (Дата звернення: 06.06.2026)

					<i>КНУ.РБ.141.26.251с.04.00.Л</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		51