

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи бакалавра

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Модернізація електромеханічної частини головного приводу випалювальної
конвеєрної машини ЛУРГІ 552А в умовах ЦВО-2 ПрАТ «ПівнігЗК»

Здобувач групи ЗЕЕМ-22 _____ Ілля ІКОННІКОВ

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**

Іконнікова Іллі Семеновича

1. Тема роботи: Модернізація електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А в умовах ЦВО-2 ПрАТ «ПІВНГЗК»
2. Строк подання здобувачем роботи: 10 червня 2026 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: модернізація електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини з метою досягнення технологічної стабільності процесу випалу окатків через мінімізацію відхилення температурного режиму, що дає зниження браку готових продуктів спікання
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): характеристика електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини; аналітичні обчислення електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини; створення САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): машина для випалювання окатків ЛУРГІ 552А; статичні характеристики двигуна ABB M2BAX 280SB 8; структура моделі двигуна ABB M2BAX 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А; динаміка двигуна ABB M2BAX 280SB 8; схема САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А з векторним управлінням в MATLAB/Simulink; Динаміка САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини

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	18.05.26–22.05.26
2	Спеціальна частина	23.05.26–30.05.26
3	Проектно-конструкторська розробка	31.05.26–07.06.26
4	Оформлення пояснювальної записки	08.06.26–10.06.26
5	Оформлення презентації	11.06.26–16.06.26
6		
7		

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____

Ілля ІКОННІКОВ

Керівник роботи _____

Олексій МИХАЙЛЕНКО

Реферат

У роботі розглянуто питання модернізації головного привода конвеєрної випалювальної машини ЛУРГІ 552А, що експлуатується у цеху випалу окатків №2 ПрАТ «Північний ГЗК». Встановлено, що нерівномірність завантаження візків сирими окатками спричиняє коливання швидкості руху стрічки, порушення оптимального температурного режиму термообробки та зниження якості готової продукції. Існуючий нерегульований асинхронний електропривод із проміжним механічним редуктором не забезпечує оперативної адаптації до змінних технологічних навантажень, має знижений ККД та підвищену схильність до механічного зносу.

З метою підвищення стабільності технологічного процесу обґрунтовано доцільність переходу на сучасний безредукторний частотно-регульований електропривод з векторним керуванням. Виконано розрахунок потужності з урахуванням опорів тертя, інерційних навантажень та компенсаційного моменту в зоні розвантаження. На основі енергоефективності та умов важкого пуску обрано асинхронний двигун ABB M2BAX 280SB 8 та перетворювач частоти ABB ACS580-01-088A-4. На підставі заступної Т-схеми та рівнянь узагальненої електричної машини проаналізовано власні та штучні статичні характеристики, а також динаміку перехідних процесів у розімкненому контурі.

Створено багатоконтурну САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини з ПІ-регуляторами струму статора, потокозчеплення ротора, швидкості та положення, параметри яких розраховано за критеріями модульного та симетричного оптимуму. Для усунення стрибкоподібних динамічних навантажень інтегровано задатчик інтенсивності, що програмно обмежує другу похідну кутової швидкості. Симуляції в MATLAB/Simulink підтвердило працездатність розробленої системи: суттєве зменшення перерегулювання швидкості, зниження максимального динамічного моменту та забезпечення точної стабілізації швидкості руху візків за змінного масового навантаження.

Отримані результати демонструють технічну ефективність запропонованого рішення.

Ключові слова: конвеєрна випалювальна машина, модернізація, залізорудні окатки, асинхронний електропривод, частотне регулювання, векторне керування, ПІ-регулятор, симуляції.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.Р</i>	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Зміст

<i>РОЗДІЛ 1. Характеристика електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини</i>	<i>9</i>
1.1 Характеристика виробництва окатків в умовах ЦВО-2 ПрАТ «Північний ГЗК».....	10
1.1.1 Доставлення концентрату і виробництво суміші для залізорудних окатків11	
1.1.2 Виготовлення сирих залізорудних окатків.....	13
1.1.3 Випал залізорудних окатків	14
1.1.4 Грохочення окатків	17
1.2 Загальні відомості про випалювальну машину ЛУРГІ 552А	18
1.3 Прорахунок електродвигуна приводу випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А	22
Висновок до розділу 1	27
<i>РОЗДІЛ 2. Аналітичні обчислення електромеханічного частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини</i>	<i>29</i>
2.1 Визначення статики двигуна випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А30	
2.2 Вибір частотного перетворювача для системи електроприводу випалювальної конвеєрної машини	34
2.3 Визначення статики електропривода ПЧ-АД випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А	37
2.4 Динаміка електроприводу випалювальної конвеєрної машини в нерегульованому і регульованому виконанні.....	40
Висновок до розділу 2	47

<i>РОЗДІЛ 3. Створення САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини</i>	<i>48</i>
3.1 Створення автоматизованої системи керування швидкістю головного приводу випалювальної конвеєрної машини	49
3.1.1 Коло керування струму статора.....	50
3.1.2 Коло керування потокозчепленням.....	52
3.1.3 Коло керування швидкістю.....	52
3.1.4 Коло керування положенням	54
3.1.5 Задатчик інтенсивності.....	55
3.2 Система векторного управління електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А.....	56
Висновок до розділу 3	59
Висновки	60
Список використаної літератури	62

Вступ

Виробництво окатків виступає завершальною та водночас однією з найважливіших стадій технологічного циклу гірничо-збагачувальних підприємств, оскільки саме на цьому етапі формується кінцева якість продукції, що визначає її подальше використання в металургійному виробництві. Ключові технологічні операції реалізуються на конвеєрних випалювальних машинах, конструктивно виконаних у вигляді випалювальної конвеєрної машини, по якому безперервно транспортуються сирі окатиші. У процесі руху вони послідовно проходять зони термічної обробки, де відбуваються сушіння, підігрів, випал та охолодження, що забезпечує необхідні фізико-механічні властивості готового продукту.

У реальних умовах експлуатації нерівномірність завантаження візків сирими окатишами часто призводить до зміни висоти шару матеріалу. Така нестабільність насипного навантаження викликає додаткові динамічні впливи на привідний механізм і, як наслідок, спричиняє коливання швидкості руху випалювальної конвеєрної машини навіть при сталому режимі подачі. Подібні відхилення негативно позначаються на температурному режимі випалу, що порушує оптимальні умови протікання технологічного процесу і зрештою знижує якість окатків.

З метою підвищення ефективності функціонування агрегату особливої уваги потребує забезпечення стабільної швидкості переміщення стрічки незалежно від змін навантаження. Це досягається шляхом керування частотою обертання привідного барабана за допомогою сучасного електроприводу, який здатен оперативно реагувати на зміну технологічних параметрів і компенсувати їх вплив.

У сучасних умовах широкого поширення набув частотний спосіб регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів, що ґрунтується на зміні частоти живлення обмоток статора. Такий підхід дозволяє забезпечити плавне та безперервне регулювання швидкості у широкому діапазоні, зберігаючи при цьому високу жорсткість механічних характеристик

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.ВС</i>	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

приводу. Важливою перевагою є також те, що при використанні частотного регулювання втрати енергії в електродвигуні залишаються в межах номінальних значень, оскільки робота відбувається за малих величин ковзання, що позитивно впливає на енергоефективність системи.

Отже, створення та впровадження частотно-керованого електроприводу випалювальної конвеєрної машини, який забезпечує підтримання сталої швидкості руху при змінних умовах завантаження, є важливим і актуальним завданням, спрямованим на підвищення стабільності технологічного процесу та покращення якості готової продукції.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.ВС</i>	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 1.
Характеристика електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Іконніков І.С.</i>			<i>Характеристика електромеханічної частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>9</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЗЕЕМ-22</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

1.1 Характеристика виробництва окатків в умовах ЦВО-2 ПрАТ «Північний ГЗК»

Виготовлення окатків у цеху випалу окатків №2 ПрАТ «Північний ГЗК» [1] реалізується із застосуванням випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А [2], яка є основним агрегатом для виконання ключових технологічних операцій. На рис. 1.1 представлено фрагмент цієї установки, де безпосередньо відбувається обробка сирих окатків і формування їх кінцевих властивостей.

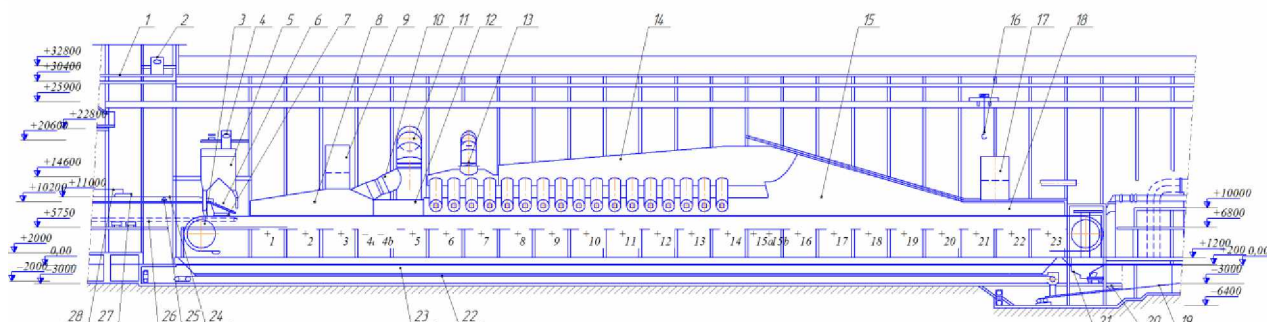


Рисунок 1.1 – Машина для випалювання окатків ЛУРГІ 552А [3]: 1, 2 – конвеєри, що подають з мішалок в бункери суміш концентрату; 3 – машина для випалювання окатків; 4 – конвеєр-живильник бункерів бокової та донної постелей; 5 – бункер донної постелі; 6 – живлячий роликовий грохот; 7 – конвеєр підгратних сирих окатків; 8 – ковпак сушіння продуванням; 9 – трубопровід газодувок відведення повітря із зони сушіння продуванням; 10 – трубопровід подачі надлишкових газів в ковпак сушіння продуванням; 11 – трубопровід подачі газів в ковпак сушіння просасуванням; 12 – ковпак сушіння просасуванням; 13 – трубопровід подачі газів в простір випалу; 14 – рекупераційний трубопровід; 15, 18 – ковпаки-уловлювання гарячого повітря із простору охолодження окатків; 16 – кран; 17 – відводячий трубопровід повітря з ковпака 18; 19 – конвеєри-живильники охолоджених окатків на грохоту; 20 – жолоби бункера для вивантаження охолоджених окатків з ; 21 – бункер охолоджених окатків; 22 – конвеєр відведення пилу з повітряних камер; 23 – збірник пилу; 24 – конвеєр-живильник сирих окатків на роликовий грохот; 25 – ваги срічкові; 26 – конвеєр-живильник подачі окатків в рецикл; 27 – конвеєр-живильник грохоту (пересувний); 28 – конвеєр збору сирих окатків

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

Конструкція машини забезпечує безперервне переміщення матеріалу через низку функціональних зон, кожна з яких виконує визначену роль у загальному процесі термічної обробки.

Технологічний цикл виготовлення окатків починається з підготовки шихти, що включає подрібнення, збагачення та змішування залізорудної сировини з необхідними добавками для досягнення заданих фізико-хімічних характеристик. Після цього підготовлена суміш надходить у барабани або тарілчасті гранулятори, де відбувається формування сирих окатків заданого розміру за рахунок процесів обкатування та зволоження.

Сформовані сирі окатки подаються на конвеєрну випалювальну машину, де вони укладаються на рухому стрічку у вигляді шару певної товщини. Далі матеріал послідовно проходить через зони сушіння, попереднього підігріву, випалу та охолодження. На початкових етапах видаляється волога та відбувається поступове підвищення температури, що забезпечує підготовку окатків до високотемпературної обробки. У зоні випалу досягаються максимальні температури, при яких відбувається спікання частинок і формування міцної структури окатків. Завершальним етапом є охолодження, що дозволяє стабілізувати отримані властивості та підготувати продукцію до транспортування і подальшого використання.

1.1.1 Доставка концентрату і виробництво суміші для залізорудних окатків

Після завершення процесу збагачення магнетитовий концентрат транспортується стрічковими конвеєрами до системи накопичувальних бункерів, де забезпечується його тимчасове зберігання та подальший розподіл між технологічними потоками. Безпосередньо на транспортерній лінії встановлено автоматичний пробовідбірник, який дозволяє здійснювати безперервний контроль якості сировини. Розподіл концентрату між основними та паралельними потоковими лініями здійснюється за допомогою реверсивних конвеєрів у поєднанні з плужковими скидними пристроями, що дає змогу гнучко керувати напрямками подачі матеріалу залежно від виробничих потреб.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1</i>	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Із бункерів концентрат подається в технологічний процес за допомогою обертових дискових живильників, які забезпечують рівномірне дозування матеріалу на наступні стрічкові конвеєри. Далі сировина транспортується на ділянки, оснащені однороликовими стрічковими вагами, де відбувається безперервне зважування потоку. Отримані дані використовуються для точного дозування добавок, зокрема бентоніту та вапняку, кількість яких визначається відповідно до маси поданого концентрату з метою забезпечення необхідного складу шихти [3].

Вапняк, попередньо подрібнений до заданої крупності, транспортується пневматичним способом до спеціалізованих бункерів. Кожен із цих бункерів обладнаний декількома розвантажувальними отворами, під якими встановлені стрічкові дозатори, що працюють у парі зі шлюзовими затворами. Така конструкція дозволяє регулювати подачу матеріалу та підтримувати стабільність дозування в процесі роботи.

Аналогічним чином організовано подачу бентоніту, який після подрібнення також транспортується пневмотранспортом у відповідні бункери. Вони мають розвантажувальні вузли, оснащені шлюзовими затворами та стрічковими дозаторами, що забезпечують контрольовану і рівномірну подачу цієї добавки до загального потоку шихти. У результаті формується однорідна суміш компонентів, придатна для подальшого гранулювання та випалу.

Стрічкові дозатори використовуються для точного та безперервного подавання бентоніту та вапняку на конвеєри, що забезпечує формування необхідного складу шихти. Кожен із таких конвеєрів виконує функцію живлення мішалок, у яких відбувається інтенсивне перемішування основних компонентів – магнетитового концентрату, вапняку та бентоніту. Завдяки цьому досягається висока однорідність суміші, що є важливою умовою для подальших технологічних операцій [3].

Після завершення процесу змішування підготовлена шихта надходить на транспортну систему, звідки за допомогою послідовно з'єднаних конвеєрів подається до бункерів, розташованих над тарілчастими грануляторами. Така

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

організація транспортування забезпечує безперервність процесу та стабільність подачі матеріалу на стадію гранулювання, де відбувається формування сирих окатків заданого розміру і структури.

1.1.2 Виготовлення сирих залізорудних окатків

Конвеєр 2 стрічкового типу, який виконує функцію основного транспортного вузла, оснащений шістьма автоматичними скидачами, що забезпечують точний розподіл матеріалу та дозволяють через головну станцію цього самого конвеєра послідовно завантажувати сім накопичувальних бункерів. Безпосереднє виробництво сирих окатків реалізується на семи тарілчастих грануляторах, причому одна тарілка постійно утримується в резерві для гарантованої безперебійності процесу, а детальний опис технологічного циклу доцільно розглядати на прикладі функціонування однієї такої одиниці. Сировина дозується за допомогою стрічкового дозатора, над яким інтегрований коливальний пристрій для забезпечення рівномірності потоку, після чого матеріал по розподільній центрифугі надходить безпосередньо на обертову таріль гранулятора [3].

Сформовані сирі окатки автоматично знімаються та передаються на реверсивний конвеєр, звідки за штатних умов спрямовуються на магістральний стрічковий конвеєр 28 для подальшого транспортування. Однак під час налагодження обладнання або у разі отримання продукції низької якості, стрічковий конвеєр змінює напрямок руху, і вихідний продукт спрямовується у зворотному напрямку по послідовно з'єднаних стрічкових конвеєрах 1 і 2 безпосередньо у вихідні бункери суміші для повторної переробки. Для виконання ремонтних та профілактичних робіт над тарілчастими грануляторами, які згруповані у два паралельні ряди, встановлені спеціальні крани, що гарантують зручний доступ до всіх вузлів агрегатів.

Після первинного формування сирих окатки потрапляють на конвеєр 27, конструкція якого передбачає наявність пересувної головної станції, що дозволяє рівномірно розподіляти матеріал по всій ширині наступного транспортера. За допомогою конвеєра 24 окатки подаються безпосередньо на

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

роликовий грохот 6, причому ширина обох цих агрегатів ідентично відповідає ширині випалювальної машини, що виключає крайові втрати при завантаженні [3].

У конструкцію стрічкового конвеєра 24 вбудовані прецизійні ваги стрічкові 25, які не лише фіксують загальну кількість сирих окатків у потоці, але й передають дані до системи автоматизованого управління випалювальною машиною для оптимізації швидкості руху візків. На роликовому грохоті 6 відбувається сепарація дрібної фракції: підгратний продукт, що не досяг необхідних розмірів, збирається на конвеєрі 7 і транспортується на конвеєр 26, який повертає його у початковий цикл грануляції, забезпечуючи замкнутий технологічний рецикл та мінімізуючи втрати сировини [3].

1.1.3 Випал залізорудних окатків

Процес термічної обробки окатків реалізується на промисловій випалювальній машині 3 марки ЛУРГІ 552А (див. рис. 1.1).

Робочий цикл розпочинається на завантажувальній ділянці, де порожні візки спочатку покриваються донною постіллю, що спливає з бункера 5 через спеціалізовані тічки. Паралельно з цього ж бункера 5 по окремих тічках подається захисний матеріал, яким ретельно заповнюється вільний простір між шаром сирих окатків та вертикальними бічними стінками візків. Сирі окатки, у свою чергу, потрапляють на підготовлені візки безпосередньо з роликового грохоту 6. Як донна постіль, так і бічний захист виготовляються з відсіяної від готової продукції фракції розміром 10–25 мм, що виконує критично важливу термоізоляційну функцію, захищаючи металеві конструкції візків від надмірного перегріву та термічних деформацій. Конструкція бункера 5 додатково оснащена резервною розвантажувальною тічкою, яка в аварійних ситуаціях дозволяє оперативно видалити пошкоджений або спіклий шар постілі без повної зупинки технологічної лінії. Після формування вантажного шару візки із сировиною починають поступальний рух під системою технологічних ковпаків, загальна протяжність яких перевищує довжину самої машини. Під час цього переміщення матеріал послідовно проходить усі

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

передбачені регламентом термічні стадії: спочатку здійснюється сушка продувом, потім сушка прососом, далі йдуть етапи інтенсивного нагріву, власне випалу та довивалу, після чого продукція піддається двоступеневому охолодженню на першій та другій стадіях охолодження [3].

Завершення процесу відбувається на поворотній станції машини, де механізм перекидає вміст візків у приймальний бункер 21, розташований безпосередньо під цією станцією. З бункера 21 через контрольовані розвантажувальні отвори охолоджені окатки надходять у відвідні жолоби 20, звідки спрямовуються на конвеєри 19, які транспортують готовий продукт на виробничі грохоти для подальшого сортування. Важливою особливістю цієї ділянки є те, що в кожен конкретний момент часу задіяний лише один відвідний жолоб разом із відповідним конвеєром, що гарантує стабільність потоку та унеможливорює перевантаження обладнання. Відокремлені на грохотах фракції донної постілі та бічного захисту збираються і за допомогою конвеєра 4 повертаються знову до бункера 5 для повторного використання, таким чином замикаючи матеріальний цикл і мінімізуючи втрати сировини [3].

У процесі роботи машини, особливо в зоні вакуумних та нагнітальних повітряних камер, неминуче утворюється дрібнодисперсний технологічний пил, який акумулюється у пиловій ванні 23 і згодом транспортується конвеєром 22 безпосередньо на конвеєри 19 для подальшого транспортування разом з основним матеріалом. Планове розвантаження накопиченого пилу здійснюється через спеціалізовані двоклапанні затвори, які забезпечують повну герметичність системи під час скидання та запобігають викиду дрібних частинок у навколишнє середовище [3].

Подача технологічних газів та повітряного потоку до різних технологічних зон випалювальної машини організована за складною багатоступеневою схемою, що забезпечує максимальну енергоефективність процесу. Повітродувка охолоджуючого повітря здійснює забір свіжого атмосферного повітря через спеціальний шумоглушник, після чого продуває його по системі трубопроводів та повітряній камері зони охолодження

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

+16...+23 безпосередньо через шар навантажених обпалювальних візків. У результаті цього теплообміну гарячі готові окатки інтенсивно охолоджуються, а свіже повітря, натомість, значно нагрівається. Це нагріте повітря ефективно вловлюється спеціальними ковпаками 15 і 18, причому завдяки надійному ущільненню цих ковпаків по відношенню до візків за допомогою повітродувки в їх внутрішньому просторі створюється необхідний надлишковий тиск. Саме за рахунок цього тиску певна частка нагрітого повітря, що акумулювалася в ковпаку 15, спрямовується безпосередньо до зони довипалу для підтримки температурного режиму [3].

Частка нагрітого повітря з ковпака 15 по рекупераційному трубопроводу 14 транспортується як первинне та вторинне повітря до пальників, що працюють на природному газі та розташовані на поздовжніх сторонах ковпаків у зонах інтенсивного нагріву та власне випалу. Саме в цих пальниках повітряна суміш нагрівається до технологічно необхідної температури, а утворені в результаті згоряння димові гази безпосередньо використовуються для якісної теплової обробки окатків. Гаряче повітря, яке вловлюється в окремому ковпаку 18, примусово відсмоктується з нього потужною повітродувкою по спеціалізованому трубопроводу 17. При цьому спеціальні патрубки для подачі холодного повітря дають змогу домішувати охолоджене повітря, щоб уникнути небезпечного перегрівання обладнання.

По системі трубопроводів та повітряним камерам 1–4 повітродувкою це гаряче повітря подається в простір сушіння продуванням, де воно інтенсивно проходить через шар окатків на випалювальних візках, забезпечуючи ефективне видалення вологи. Повітря, яке відводиться з простору потрапляє в ковпак 8 і через трубопровід 9 подається газодувкою на очистку.

Безпосередньо перед цією повітродувкою розташовані електрофільтри, де відокремлений дрібнодисперсний пил надходить на редлер, котрий відводить пил у спеціальний бак з мішалкою, де з пилу формується технологічна пульпа, яка переливається у дренажну систему для подальшої утилізації. Після очистки повітродувка відводить вже очищене повітря через

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відповідний трубопровід і спеціальну трубу, що відводить повітря у атмосферу. Гази, що відходять з останнього простору випалу та простору довивалу, відводяться повітродувкою через систему повітряних камер 10–15 у загальний трубопровід. Далі через повітродувку ці гарячі гази подаються по трубопроводу 11 безпосередньо в ковпак сушіння просасуванням 12, де вони застосовуються для інтенсивного сушіння окатків методом просасування. Певна частина цих газів додатково потрапляє в ковпак нагріву для оптимізації теплового балансу. Гази, що відходять із зон сушіння просасування та нагріву, а також певна частина газів із зони випалу, відсмоктуються потужними газодувками через систему повітряних камер 4b–9 та відповідні трубопроводи [3].

1.1.4 Грохочення окатків

Після завершення термічної обробки випалені окатки надходять на виробничий грохот, де відбувається їх ретельна сепарація на кілька ключових фракцій: дрібний підгратний продукт, матеріал для формування донної постілі та безпосередньо готову продукцію, придатну для відвантаження споживачам.

Підгратний продукт, розмір частинок якого не перевищує 5 мм, автоматично відводиться за допомогою спеціалізованого стрічкового конвеєра для подальшої утилізації або повернення у технологічний цикл. Як донна постіль, а також як надійний захист бічних стінок випалювальних візків, застосовується відкалібрована фракція окатків розміром 10–25 мм, яка з конвеєра 4 надходить у бункер донної постілі 5 для подальшого використання. У випадках, коли кількість сформованої донної постілі перевищує технологічно необхідний обсяг, надмірна частина цього матеріалу автоматично перенаправляється по спеціальній тічці безпосередньо у потік готової продукції, що дозволяє уникнути втрат цінної сировини та оптимізувати матеріальний баланс.

Обпалені окатки цільової фракції 5–25 мм, які становлять основну товарну масу, передаються конвеєрами або на проміжний склад для тимчасового зберігання, або ж, за наявності відповідного замовлення,

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відвантажуються безпосередньо у залізничні вагони для транспортування споживачам. Важливою особливістю всієї транспортної системи є те, що абсолютно всі конвеєри, які здійснюють переміщення підгратного продукту, матеріалу донної постілі та готової продукції, обладнані прецизійними стрічковими вагами, що забезпечує безперервний облік маси матеріалу в потоці, дозволяє вести точний оперативний контроль виробничих показників та гарантує високу достовірність комерційних розрахунків за відвантаженою продукцією.

1.2 Загальні відомості про випалювальну машину ЛУРГІ 552А

Випалювальна машина ЛУРГІ 552А конструктивно являє собою грохот із замкненим нескінченним ланцюгом, що забезпечує безперервну циркуляцію обладнання по заданому технологічному контуру. На цьому ланцюзі рівномірно закріплено випалювальні візки якими окатки повноцінно проходять всі стадії термічної обробки [3].

Траєкторія руху візків чітко контролюється спеціальною рейковою системою: на підході до робочої зони підйомне колесо плавно та безударно спрямовує кожен візок на напрямні рейки верхньої гілки, де відбувається основний технологічний цикл. Після завершення процесу на розвантажувальній стороні машини відпускне колесо акуратно переводить візки з верхнього рівня на рейки нижньої зворотної гілки, забезпечуючи таким чином стабільний замкнутий цикл переміщення, мінімальний знос ходових частин та високу надійність роботи всього агрегату протягом тривалого експлуатаційного періоду [3].

Таблиця 1.1 – Дані випалювальної машини ЛУРГІ 552А

Параметр	Величина
Продуктивність машин	505 т/год
Число візків	208
Реакційна поверхня	552 м ²
Розмір машини	138×4 м

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

Висота стінок	400 мм
Швидкість руху візків	1,25...7 м/хв
Потужність електродвигуна	48 кВт

Випалювальна машина має у своєму складі 23 камери з повітрям, кожна з яких підключена до відповідних газопроводів, призначених для подачі як повітря, так і технологічного газу, що забезпечує необхідні умови для перебігу процесу випалу. Конструктивно ці камери також оснащені спеціальними пристроями для видалення пилу, що утворюється під час роботи. У табл. 1.2 наведено розподіл окремих повітряних камер за відповідними трубопроводами або зонами, до яких вони приєднані, що дозволяє чітко простежити їх функціональне призначення та взаємозв'язок у загальній системі машини.

Випалювальна машина комплексу оснащена розгалуженою системою з двадцяти трьох повітряних камер, які інтегровані в єдину мережу газопроводів для подачі як звичайного повітря, так і спеціального технологічного газу, необхідного для підтримання оптимальних умов термообробки на різних етапах процесу. Кожна з цих камер додатково обладнана спеціалізованими пристроями для ефективного видалення пилу, що утворюється в процесі роботи, що забезпечує підтримання чистоти газового потоку, запобігає засміченню обладнання та сприяє стабільності режиму теплооброблення [3]. Детальна інформація про схему підключення, а саме про те, до яких саме трубопроводів та технологічних зон приєднані окремі повітряні камери, систематизована у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні повітряні камери випалювальної машини ЛУРГІ 552А

№	Довжина камери, м	Ділянка
1–4а	21	Сушіння продування
4b–5b	9	Сушіння просасуванням
6–10	30	Нагрівання

11–14a	21	Випалювання
14b–15b	9	Довипалювання
16–23	48	Охолодження I і II

Для точного регулювання параметрів теплооброблення окатків на ділянках технологічного циклу камери 4b, 5–8 та 23 (повітряні) оснащені дросельними клапанами з електроприводом, які дозволяють операторам у автоматичному або ручному режимі адаптувати витрату газових потоків до поточних вимог процесу термообробки. Усі трубопроводи, що підводяться до зазначених повітряних камер, обов'язково комплектуються гнучкими компенсаторами, призначеними для компенсації лінійного теплового розширення та забезпечення надійного герметичного з'єднання між рухомими частинами повітряних камер і стаціонарними збірними газопроводами. Безпосередньо перед зоною сушки продувом вмонтовано дві ущільнювальні коробки, основним функціональним призначенням яких є відведення надлишкового повітря, що проникатиме через пластинчасті ущільнювачі з робочого простору цієї зони, що дозволяє підтримувати стабільний тиск та запобігати розбалансуванню газового контуру [3].

Над корпусом випалювальної машини розташована система технологічних ковпаків, яка конструктивно розділена на сім послідовних зон: сушіння продуванням, сушіння просасуванням, нагрівання, власне випалу, довипалу, охолодження I та охолодження II. Для забезпечення теплоізоляції, запобігання перемішуванню газових середовищ різної температури та підтримання чіткого температурного градієнта між зонами ковпаків встановлені міцні розділові стінки, робоча поверхня яких надійно облицьована спеціальним вогнетривким матеріалом, що витримує тривалий вплив екстремальних температур та гарантує довговічність всієї газовідвідної системи.

Комплексний аналіз чинників, що безпосередньо впливають на загальну ефективність функціонування випалювальної конвеєрної машини, чітко

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

продемонстрував, що для стабільного отримання високоякісної продукції необхідно дотримуватися оптимального технологічного співвідношення між рівнем завантаження випалювальних візків, швидкістю переміщення ланцюгового конвеєра та температурними режимами в ключових зонах термообробки. Будь-яке відхилення хоча б одного з цих параметрів від встановлених номінальних значень автоматично вимагає відповідної корекції інших змінних, що дозволяє зберегти раціональні умови ведення всього процесу та уникнути браку готових окатків. Серед усіх виконавчих механізмів, здатних впливати на зазначені показники та, відповідно, на загальний режим роботи ЛУРГІ 552А, лише привід ланцюга візків обладнаний електромеханічним обладнанням, що робить його головним інструментом оперативного керування продуктивністю.

На сьогоднішній день машина ЛУРГІ 552А експлуатується з нерегульованим електроприводом, який передає обертальний момент на ланцюговий грохот через традиційний механічний редуктор. Така застаріла кінематична схема принципово не дозволяє здійснювати оперативну адаптацію до мінливих умов функціонування машини, зокрема до коливань міцності та вологості сирих окатків, зміни їх об'ємної кількості на конвеєрі, перепадів тиску в трубопроводах і ковпаках просторів для температурної обробки, оскільки відсутня можливість плавного та точного регулювання швидкості просування окатків по робочій поверхні.

Крім того, використання проміжного редуктора неминуче знижує загальний коефіцієнт корисної дії всієї приводної системи через додаткові механічні втрати на тертя та суттєво обмежує її експлуатаційну надійність через наявність додаткових вузлів, схильних до зносу та аварійних поломок. Виходячи з цього, найбільш перспективним напрямом поліпшення якості роботи ЛУРГІ 552А є перехід на сучасний регульований безредукторний електропривод, встановлений безпосередньо на валу випалювальної конвеєрної машини.

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Для практичної реалізації цього технічного рішення на початковому етапі оцінки його технічної ефективності необхідно провести підбір оптимального типу та конкретної марки електродвигуна, призначеного для приводу візків даного агрегату, з обов'язковим урахуванням усіх динамічних навантажень, вимог до пускових струмів та необхідної точності частотного регулювання швидкості обертання.

1.3 Прорахунок електродвигуна приводу випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А

Епюра навантажень, необхідна для визначення енергетичних параметрів приводу стрічкового транспортера візків конвеєрної випалювальної установки, представлена на рис. 1.2 [5]. Аналітичне визначення потужності електродвигуна випалювальної конвеєрної машини демонструється на прикладі агрегату ЛУРГІ 552А.

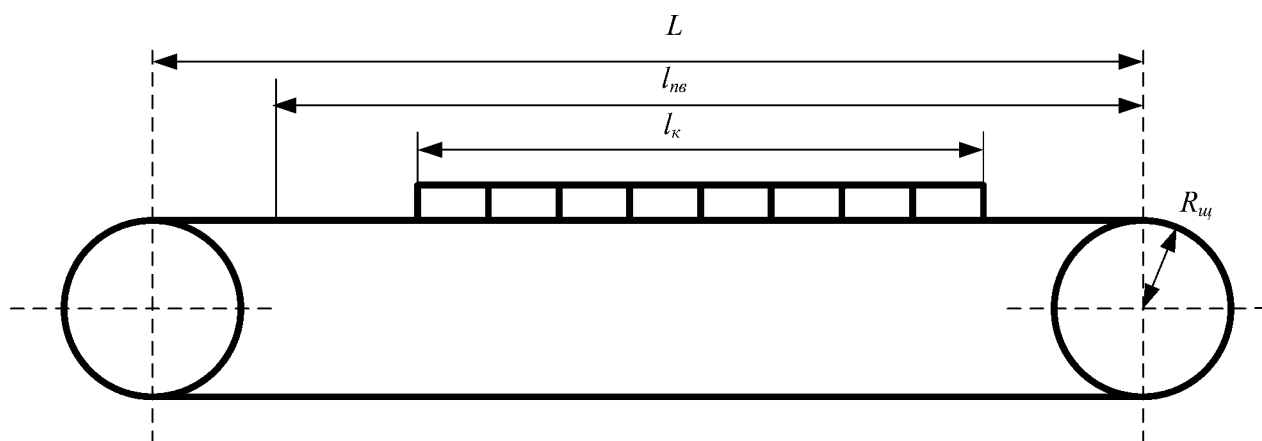


Рисунок 1.2 – Розрахунків навантаження для обчислення потужності електропривода випалювальної конвеєрної машини [5]

Споживана приводом потужність витрачається на компенсацію сумарних опорів переміщенню конвеєрного полотна, які включають сили тертя кочення в підшипниках ходових роликів візків, опори ковзання в системах нижніх поздовжніх, торцевих та бортових ущільнень, а також втрати на тертя в ланцюговому зачепленні та подолання інерційних сил при завантаженні шихтового матеріалу. Одночасно необхідно враховувати

наявність додаткового рушійного моменту, що генерується масою окатків, які ще перебувають на візках у зоні розвантаження, чим частково компенсуються опори руху та полегшуються умови роботи приводного механізму.

Сила опору руху випалювальної конвеєрної машини від тертя кочення в роliках візків:

Навантаження на роliки візків в покої:

$$F_{\kappa} = \sum_{i=1}^5 P_i \cdot \frac{\mu d_y + 2f}{d_p} K =$$

$$= (13212,9 + 1043780 + 3856360 + 2,112 \cdot 10^6 + 382,98) \times$$

$$\times \frac{0,01 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,0008}{0,35} 1,25 = 80015,3 \text{ H}, \quad (1.1)$$

$$P_1 = 2 \frac{L}{l_g} m_g g = 2 \frac{138}{1,5} 7,32 \cdot 9,81 = 13212,9 \text{ H}, \quad (1.2)$$

$$P_2 = b_g h_n l_n \gamma_n g =$$

$$= 4 \cdot 0,31 \cdot 133 \cdot 2000 \cdot 9,81 = 1043780 \text{ H}, \quad (1.3)$$

$$P_3 = \frac{b_g + b_{\bar{g}}}{2} h_u l_u \gamma_u g =$$

$$= \frac{1,5 + 1,2 \cdot 1,5}{2} 0,31 \cdot 131 \cdot 2200 \cdot 9,81 = 3856360 \text{ H}, \quad (1.4)$$

$$P_4 = b_g \left(\sum l_{nc} \Delta p_{nc} - \sum l_{ns} \Delta p_{ns} \right) =$$

$$= 4 \left[21 \cdot 4000 - 9 \cdot (-2000) - 30 \cdot (-3000) - 30 \cdot (-4000) + 48 \cdot 4500 \right] =$$

$$= 2,112 \cdot 10^6 \text{ H}, \quad (1.5)$$

$$P_5 = 4 \frac{R}{l_g} m_g g = 4 \frac{2}{1,5} 7,32 \cdot 9,81 = 382,98 \text{ H}. \quad (1.6)$$

У наведених залежностях (1.1)–(1.6) P_1 позначає масу порожніх візкових одиниць, розташованих на горизонтальних сегментах верхньої та нижньої гілок напрямного тракту, тоді як P_2 характеризує навантаження від донної постелі, що знаходиться на візках верхньої гілки. Вага шихтового матеріалу, розміщеного на візках у межах верхньої напрямної гілки, визначається

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

відповідним параметром P_3 , а вертикальна складова навантаження, зумовлена диференціалом тисків технологічних газоподібних середовищ або повітряних потоків, що впливають на завантажені шихтою візки, фіксується окремою величиною P_4 . Завершує перелік сумарне нормальне зусилля P_5 , що сприймається ходовими роликами візків під час їхнього переміщення криволінійними ділянками напрямних основної та розвантажувальної зон машини, яке також нормується в ньютонах.

У контексті розрахунку силової взаємодії елементів конвеєрної системи сила опору переміщенню візків, зумовлена тертям ковзання в нижніх поздовжніх ущільненнях, позначається F_1 . Опорова складова, що виникає внаслідок фрикційної взаємодії в торцевих ущільнювальних елементах F_2 . Окремим параметром F_3 регламентується сила опору руху, обумовлена тертям ковзання в бортових ущільненнях, причому всі зазначені складові підлягають сумуванню для подальшого визначення загальних енергетичних витрат приводу на подолання сил тертя в ущільнювальних системах конвеєрної випалювальної машини.

$$F_{ck} = \sum_{i=1}^3 F_i, \quad (1.7)$$

$$F_1 = P_{n,y} \frac{l_k}{l_6} f_{ck}, \quad (1.8)$$

$$F_2 = z_{m,y} P_{m,y} f_{ck}, \quad (1.9)$$

$$F_3 = z_{6,y} \cdot m_{6,y} \cdot g \cdot f_{ck}, \quad (1.10)$$

Для пружинних або гідравлічних ущільнень:

$$P_{n,y} = z P_{np} - m_n g, \quad (1.11)$$

або

$$P_{n,y} = 2b_p l_6 p - m_{nl} g, \quad (1.12)$$

Опір руху візків тертю ковзання в ущільнювальних системах:

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$F_{ск} = P_{np} \cdot n \cdot f_{ск} = 3600 \cdot 208 \cdot 0,2 = 149760 \text{ Н.} \quad (1.13)$$

Опір руху випалювальної конвеєрної машини від тертя під час завантаження шихти:

$$F_{ш} = z_n m_{ш} g \varphi = 1 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 0,8 = 19620 \text{ Н.} \quad (1.14)$$

Момент, що створюється агломератом або окатками в розвантажувальній частині випалювальної конвеєрної машини:

$$\begin{aligned} M_{\delta} &= a_{ш} \left(P_2 \frac{l_6}{l_n} + P_3 \frac{l_6}{l_{ш}} \right) R_{ш} z_{ш} \eta_1 = \\ &= 0,08 \left(1043780 \frac{1,5}{133} + 3856360 \frac{1,5}{131} \right) 2,73 \cdot 1 \cdot 0,93 = 11359,8 \text{ Н.} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Момент і потужність двигуна електроприводу випалювальної конвеєрної машини:

$$\begin{aligned} M_p &= (F_{\kappa} + F_{ск} + F_{ш}) R - M_{\delta} = \\ &= (80015,3 + 149760 + 19620) \cdot 2 - 11359,8 = 487431 \text{ Н,} \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$P_{\text{дв розр}} = \frac{M_p n_{np}}{9550 \cdot \eta} = \frac{487431 \cdot 0,438}{9550 \cdot 0,6} = 36,98 \text{ кВт,} \quad (1.17)$$

де

$$n_{np} = \frac{30 \cdot v}{\pi R \cdot 60} = \frac{30 \cdot 4,5}{3,14 \cdot 2 \cdot 60} = 0,438 \text{ об/хв.} \quad (1.18)$$

Вибір електродвигуна здійснюється на основі розрахункового значення потужності шляхом підбору з каталожних даних агрегату з номінальною характеристикою, що перевищує обчислений показник. Для приводних систем стрічкового транспортера візків випалювального обладнання типовим є застосування металургійних або кранових електродвигунів у продуваному конструктивному виконанні, що обумовлено специфікою експлуатаційних умов.

Експлуатаційний досвід використання конвеєрних установок свідчить про те, що стабільне функціонування електропривода гарантується за умови наявності запасу потужності на рівні приблизно двадцяти відсотків відносно розрахункового значення, що обґрунтовує доцільність прийняття двигуна з номінальною потужністю, наближеною до $P_{ном} = 1,2 \cdot P_{об\ роз} = 1,2 \cdot 36,98 = 44,38 \text{ кВт}$. З метою порівняльного аналізу розглядаються два варіанти електродвигунів, які задовольняють сформульовані технічні вимоги: крановий асинхронний двигун з фазним ротором серії МТН 611-10 та асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу АВВ М2ВАХ 280SB 8 [6]. Основні номінальні характеристики зазначених електромашин систематизовані та представлені у табл. 1.3 і табл. 1.4.

Таблиця 1.3 – Номінальні дані МТН 611-10

$P_{ном}, \text{ кВт}$	$n_{ном}, \text{ об/хв}$	$\cos \varphi$	$\eta, \%, \%$	$I_1, \text{ А}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$J, \text{ кг/м}^2$
45	570	0,74	86,5	109	3	4,25

Таблиця 1.4 – Номінальні дані АВВ М2ВАХ 280SB 8

$P_{ном}, \text{ кВт}$	$n_{ном}, \text{ об/хв}$	$\cos \varphi$	$\eta, \%$	$I_{ном}, \text{ А}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{I_n}{I_{ном}}$	$J, \text{ кг/м}^2$
45	742	0,75	92,2	90	3	1,8	7	2,2

Річне електроспоживання співставними двигунами:

$$A_{річнМТН} = \frac{P_{ном1} \cdot k_3 \cdot D_k \cdot t}{\eta_1} = \frac{45 \cdot 0,8 \cdot 300 \cdot 18}{0,86} = 226,05 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік},$$

$$A_{\text{річн2ABB}} = \frac{P_{\text{ном2}} \cdot k_z \cdot D_k \cdot t}{\eta_2} =$$

$$= \frac{45 \cdot 0,8 \cdot 300 \cdot 18}{0,922} = 210,85 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

За електроенергоефективністю приймаємо АВВ М2ВАХ 280SB 8.

Крім того, необхідно враховувати, що після тривалої простою конвеєрної установки сили опору переміщенню колосникових візків значно зростають унаслідок ускладнення умов тертя в рухомих з'єднаннях та можливого часткового застигання мастильних матеріалів. З огляду на цей фактор, підбір пускової апаратури системи живлення електропривода має базуватися на значенні пускового моменту, що відповідає підвищеним опорам початкового розгону, тобто виходити з розрахункової величини, яка дорівнює $1,5M_p$. У конструкціях конвеєрних машин, оснащених гальмівним приводом у зоні розвантаження, між візковими одиницями, що переміщуються криволінійною траєкторією, та візками нижньої холостої гілки прямого тракту формується просторовий зазор. Оскільки візки, які знаходяться в межах розвантажувального пристрою, за таких умов не генерують додаткового рушійного моменту, що раніше частково компенсував опори руху, загальна потужність приводного механізму конвеєра потребує відповідного коригування у бік збільшення для забезпечення стабільного технологічного процесу.

Висновок до розділу 1

У першому розділі детально описано технологічний процес виробництва залізорудних окатків на ЦВО-2 ПрАТ «ПівнГЗК», ключовим агрегатом якого є випалювальна конвеєрна машина ЛУРГІ 552А. Розглянуто всі етапи технологічного циклу. Проаналізовано експлуатаційні недоліки існуючої системи електропривода: застосування нерегульованого асинхронного двигуна з проміжним механічним редуктором суттєво обмежує можливість оперативної адаптації швидкості руху візків до змін вологості, міцності та

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

об'ємної ваги матеріалу, знижує загальний ККД та підвищує ризик механічного зносу. На підставі виконаного розрахунку потужності, який враховує сили тертя кочення та ковзання, опори ущільнень, інерційні навантаження та компенсаційний момент у зоні розвантаження, обґрунтовано доцільність переходу на сучасний регульований безредукторний електропривод. Порівняльний аналіз двох двигунів із запасом потужності ~20% та врахуванням важких пускових умов після простою дозволив обрати енергоефективну модель ABB M2BAX 280SB 8.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.01.Р1</i>	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 2.
Аналітичні обчислення
електромеханічного частини головного
приводу випалювальної конвеєрної
машини

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2</i>			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата				
<i>Розроб.</i>		<i>Іконніков І.С.</i>			Аналітичні обчислення електромеханічного частини головного приводу випалювальної конвеєрної машини	Літ.	Аркуш	Аркушів
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				Н	29	
<i>Конс.</i>						ЗЕЕМ-22		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

2.1 Визначення статистики двигуна випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А

У якості виконавчого механізму головного електропривода конвеєрної випалювальної установки ЛУРГІ 552А обрано двигун моделі АВВ М2ВАХ 280SB 8. Паспортні технічні параметри зазначеного електродвигуна були представлені раніше у табл. 1.4.

Далі необхідно здійснити розрахунково-графічне формування власних механічних характеристик обраного двигуна, зокрема залежності електромагнітного моменту, струму від ковзання або частоти обертання ротора, в статичному режимі. Для цього маємо прорахувати заступну Т-схему, яка дозволяє перейти від фізичного опису електромагнітних процесів у машині до зручного аналітичного представлення у вигляді системи алгебраїчних рівнянь. Також заступна схема дає інформацією для створення САК електроприводом, зокрема для налаштування контролерів [9, 10].

Величини, що складають заступну Т-схему (рис. 2.1) [8]:

$$U_{1н} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,4 \text{ В.} \quad (2.1)$$

$$E_{1н} = 0,95 \cdot U_{1н} = 0,95 \frac{380}{\sqrt{3}} = 208,43 \text{ В.} \quad (2.2)$$

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{45000}{0,922} = 48806,9 \text{ Вт.} \quad (2.3)$$

$$I_{1ном} = \frac{P_{1ном}}{3 \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi_{ном}} = \frac{48806,9}{3 \cdot 219,4 \cdot 0,75} = 98,87 \text{ А.} \quad (2.4)$$

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 742}{30} = 77,66 \text{ с}^{-1}. \quad (2.5)$$

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/хв,} \quad (2.6)$$

де $p = 4$.

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 750}{30} = 78,54 \text{ c}^{-1}. \quad (2.7)$$

Моменти:

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{45000}{77,66} = 579,43 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.8)$$

$$M_{max} = \lambda_{max} \cdot M_{ном} = 3 \cdot 579,43 = 1738,29 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

Ковзання:

$$s_{ном} = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0} = \frac{78,54 - 77,66}{78,54} = 0,0112. \quad (2.10)$$

$$s_{max} = s_{ном} \left(\lambda_{max} + \sqrt{\lambda_{max}^2 - 1} \right) = 0,0112 \left(3 + \sqrt{3^2 - 1} \right) = 0,0653. \quad (2.11)$$

Власна механічна характеристика будується згідно [9]:

$$M(s) = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \left(\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{ном} \cdot \cos \varphi - P_n \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{\omega_{ном}}{\omega_0} \right)^2 \right] \cdot 0,05 = \\ &= \left(\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 98,87 \cdot 0,75 - 45000 \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{742}{750} \right)^2 \right] \cdot 0,05 = 376,53 \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

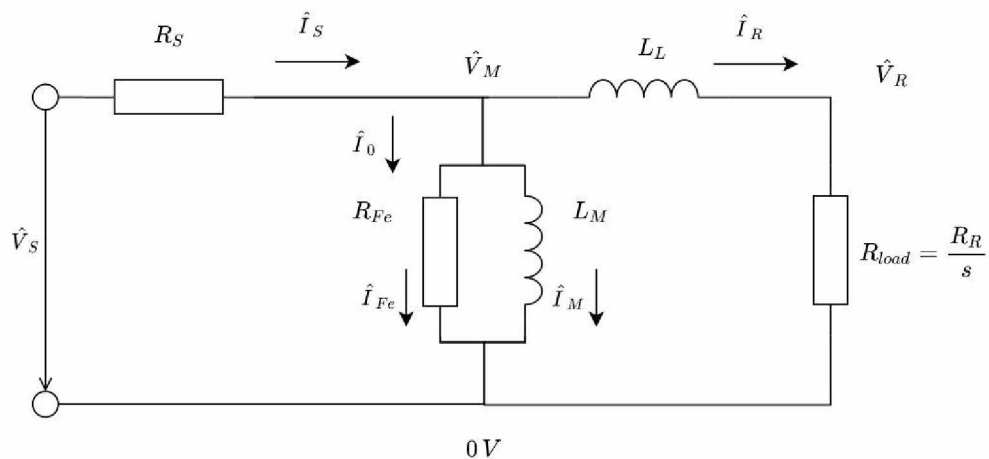


Рисунок 2.1 - Заступна Т-схема АВВ М2ВАХ 280SB 8 [8]

Опори:

$$R_s = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_{НОМ})}{2 \cdot b_{\max} \cdot \left(1 + \frac{b_{\max}}{s_{\max}}\right) \cdot \lambda_{\max} \cdot (P_{НОМ} - \Delta P)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 219,4^2 \cdot (1 - 0,0112)}{2 \cdot 1,0653 \cdot \left(1 + \frac{1,0653}{0,0653}\right) \cdot 3 \cdot (45000 - 376,53)} = 0,0289 \text{ Ом}, \quad (2.14)$$

де $b_{\max} = s_{\max} + 1 = 0,0653 + 1 = 1,0653$.

$$R_r = \frac{P_H + \Delta P}{3 \cdot \left(1 - s_{НОМ} + \frac{b_{\max}}{s_{\max}}\right) \cdot \lambda_{In} \cdot I_{НОМ}^2} =$$

$$= \frac{45000 + 376,53}{3 \cdot \left(1 - 0,0112 + \frac{1,0653}{0,0653}\right) \cdot 7 \cdot 98,87^2} = 0,0128 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Індуктивності:

$$L_s \approx L_r = \frac{U_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{НОМ} \cdot \left(\sqrt{1 - \cos \varphi} - \cos \varphi \frac{s_{НОМ}}{s_{\max}}\right)} =$$

$$= \frac{219,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 98,87 \cdot \left(\sqrt{1 - 0,75} - 0,75 \frac{0,0112}{0,0653}\right)} = 0,1903 \text{ Гн}. \quad (2.16)$$

$$L_{s\sigma} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot \lambda_{In} \cdot I_{НОМ}}\right)^2 - (R_s + R_r)^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} =$$

$$= \frac{\sqrt{\left(\frac{219,4}{\sqrt{3} \cdot 7 \cdot 98,87}\right)^2 - (0,0289 + 0,0128)^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,356 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,356 \text{ мГн}. \quad (2.17)$$

$$L_{\mu} = L_s - L_{s\sigma} = 0,1903 - 1,356 \cdot 10^{-3} = 0,1889 \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

$$x_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{R_r}{s_{\max}}\right)^2 - R_s^2} = \sqrt{\left(\frac{0,0128}{0,0653}\right)^2 - 0,0289^2} = 0,00566 \text{ Ом}. \quad (2.19)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Власна електромеханічна характеристика будується згідно:

$$I_r(s) = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + x_\kappa^2}}. \quad (2.20)$$

За (2.12) і (2.20) будує власні характеристики двигуна ABB M2BAX 280SB 8 (рис. 2.2, рис. 2.3).

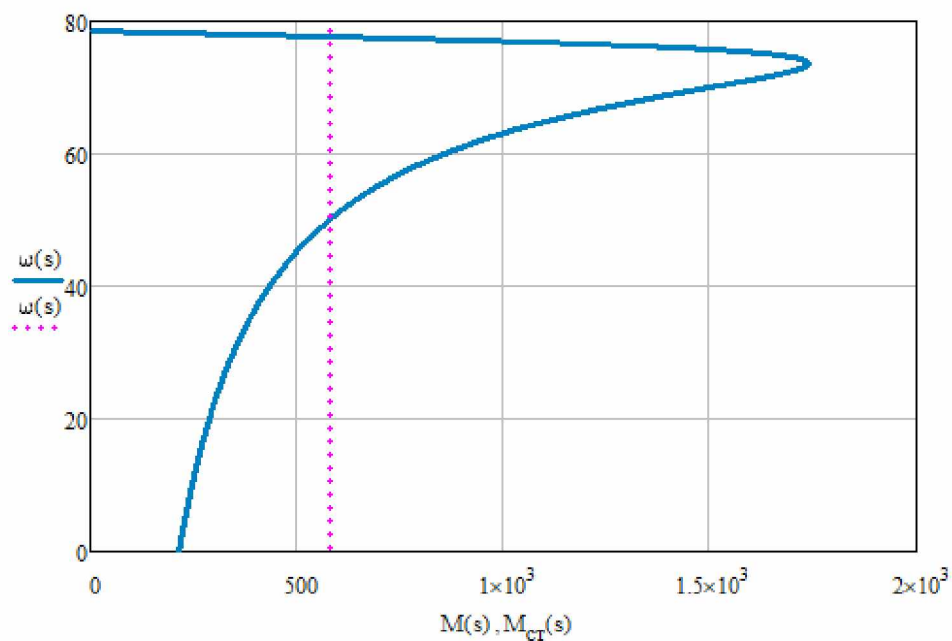


Рисунок 2.2 – Власна механічна характеристика ABB M2BAX 280SB 8

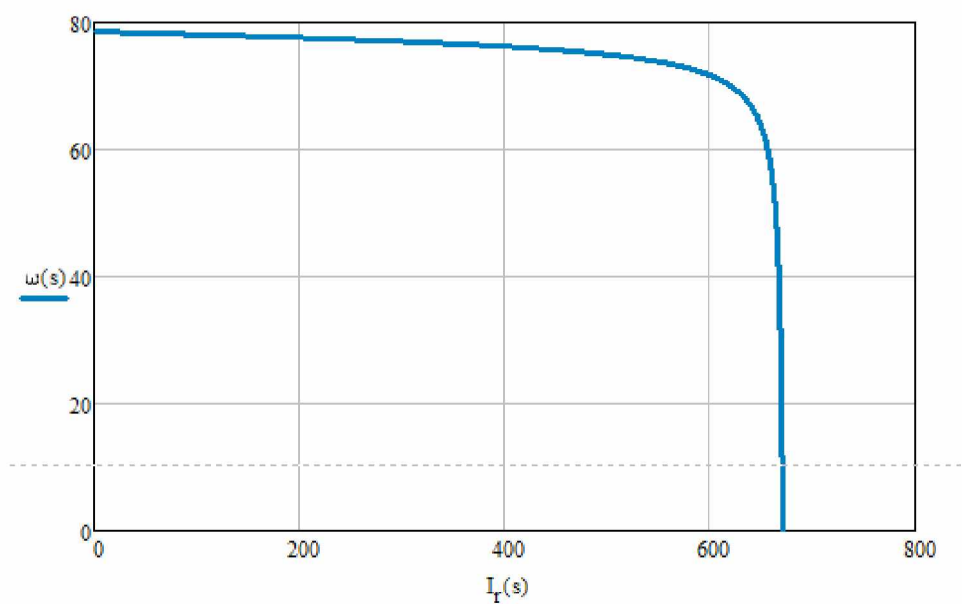


Рисунок 2.3 - Власна електромеханічна характеристика ABB M2BAX 280SB 8

Як зазначалося раніше, безпосереднє підключення асинхронного електродвигуна до промислової мережі живлення унеможливило реалізацію плавного регулювання кутової швидкості обертання ротора, що обмежує технологічні можливості електропривода.

2.2 Вибір частотного перетворювача для системи електроприводу випалювальної конвеєрної машини

Вибір перетворювача частоти для асинхронного двигуна ABB M2BAX 280SB 8 базується на комплексному аналізі електроенергетичних параметрів приводу та умовах експлуатації конвеєрної випалювальної машини, де вихідним критерієм є забезпечення рівності номінального струму перетворювача струму навантаження двигуна з урахуванням коефіцієнта запасу.

Розрахунок споживаного струму двигуна виконується за:

$$\begin{aligned} I_{dn} &= \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U_n} (M_n + M_d) = \\ &= \frac{0,95 \cdot 740}{9,55 \cdot 0,922 \cdot 0,75 \cdot 380} (580,7 + 120,1) = 185,8 \text{ A.} \end{aligned} \quad (2.21)$$

де

$$M_d = \frac{J \cdot n}{9,55 \cdot t} = \frac{1,55 \cdot 740}{9,55 \cdot 1} = 120,1 \text{ H} \cdot \text{м}, \quad (2.22)$$

Критерієм вибору також слугує умова узгодження потужностей:

$$\begin{aligned} P_n &= \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} (M_n + M_d) = \\ &= \frac{0,95 \cdot 740}{9,55 \cdot 0,925 \cdot 0,79} (580,7 + 120,1) = 70,6 \text{ кВт}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$P_{ПЧ} > \frac{P_n}{1,5} = \frac{70,6}{1,5} = 47,1 \text{ кВт}. \quad (2.24)$$

$$P_{ПЧ-АД} = \frac{k \cdot P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,95 \cdot 45 \cdot 10^3}{0,925 \cdot 0,79} = 58,5 \text{ кВт}. \quad (2.25)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

За потужністю і струмом доцільно прийняти перетворювач ABB ACS580-01-088A-4 (дані перетворювача див. у табл. 2.1 [7]), котрий повністю задовольняє умовам та забезпечує необхідний запас за перевантажувальною здатністю. Такий перетворювач гарантує надійну роботу електропривода конвеєрної випалювальної машини ЛУРГІ 552А у всьому діапазоні технологічних режимів. Керуватися ACS580-01-088A-4 може або за скалярним, або за векторним принципом.

Таблиця 2.1. Паспортні дані перетворювача частоти ACS580-01-088A-4

$S_{ном}, кВА$	$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, кВ$	$I_d, А$	$I_{max}, А$	$I_{max 60}, А$
60,9	45	0,4	88	122	96,8

Схема підключення ACS580-01-088A-до двигуна ABB M2BAX 280SB 8 наведена на рис. 2.4.

Застосування векторного методу керування частотно-регульованим електроприводом конвеєрної випалювальної машини технічно обґрунтовується необхідністю забезпечення високої точності та швидкодії регулювання кінематичних і силових параметрів у умовах значних та нерівномірно змінних збурень технологічного навантаження.

На відміну від скалярних алгоритмів, векторне керування реалізує принцип незалежного управління ортогональними складовими вектора струму статора в синхронній координатній базі, що дозволяє відокремити контур формування магнітного потоку ротора від контуру генерації електромагнітного моменту, забезпечуючи динамічні характеристики, аналогічні до електроприводів постійного струму з роздільним збудженням. Така архітектура є критично важливою для конвеєрних випалювальних агрегатів, де нерівномірний розподіл сировини по візках, зміни коефіцієнтів тертя в системах ущільнень, перепади тисків технологічних газів та важкі умови розгону після тривалих простоїв вимагають миттєвої компенсації навантажень без просідання швидкості та з мінімальними перерегулюваннями. Інтеграція векторного алгоритму в багатоконтурну систему автоматичного

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

керування з ПІД-контролерами, що дозволяє відпрацьовувати зовнішні збурення та підтримувати високу жорсткість механічної характеристики в широкому діапазоні частот обертання.

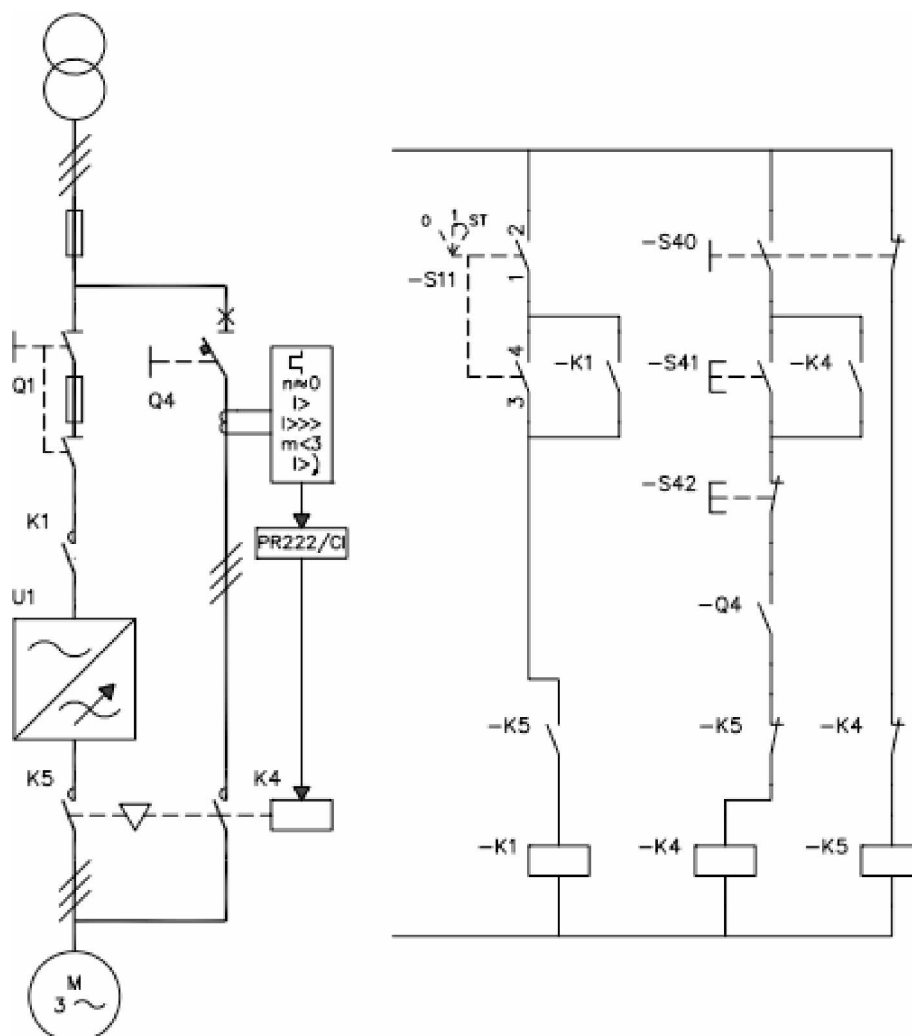


Рисунок 2.4 - Схема підключення в байпасному виконанні [7]: Q1 – головний вимикач приводу; S11 – управління вмиканням/вимиканням головного контактора приводу; Q4 – байпасний автоматичний вимикач; – S40 – вибір джерела живлення двигуна (привід або безпосередньо від мережі); K1 – головний контактор приводу; S41 – пуск при підключенні двигуна безпосередньо до мережі; K4 – байпасний контактор; S42 – зупинка при підключенні двигуна безпосередньо до мережі; K5 – вихідний контактор приводу; U1 – привід

Таким чином, незважаючи на дещо вищу апаратно-програмну складність порівняно зі скалярними схемами, застосування векторного керування є

доцільним рішенням, оскільки воно гарантує високу якість динаміки, точну стабілізацію швидкості переміщення стрічки візків за змінного масового навантаження та безпосередньо впливає на технологічну стабільність процесу випалу окатків, мінімізуючи відхилення температурного режиму і знижуючи брак готової продукції.

2.3 Визначення статистики електропривода ПЧ-АД випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А

У попередньому підрозділі було технічно обґрунтовано доцільність застосування частотного методу керування швидкістю для стабілізації кінематичних параметрів переміщення візків конвеєрної випалювальної установки в умовах змінного технологічного навантаження сирими окатками. З метою аналізу динамічних властивостей системи доцільно дослідити сімейство статичних механічних характеристик приводного електродвигуна при варіюванні частоти та амплітуди напруги живлення, що дозволяє оцінити зміну критичного моменту та ковзання в функції від керуючого впливу перетворювача частоти.

Виходячи із заступної Т-схеми за умови, що $x_{sh}/x_{\mu n} \ll 1$ і $x_{rn}/x_{\mu n} \ll 1$ нехтуємо, то маємо формулу для штучних механічних характеристик електропривода випалювальної конвеєрної машини [9, 10]:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot (U_{1n} \cdot f_{s*})^2 \cdot \frac{R_r \cdot \omega_0 \cdot f_{s*}}{\omega_0 \cdot f_{s*} - \omega}}{\omega_0 \cdot f_{s*} \cdot \left[\left(R_s + \frac{R_r \cdot \omega_0 \cdot f_{s*}}{\omega_0 \cdot f_{s*} - \omega} \right)^2 + (X_k \cdot f_{s*})^2 \right]}. \quad (2.26)$$

де

$$s_s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0 \cdot f_{s*}}; U_s = U_{1n} f_{s*}; f_{s*} = \frac{f_s}{f_n}. \quad (2.27)$$

$$X_s = X_{sh} f_{s*}; X_r = X_{rn} f_{s*}; X_{\mu} = X_{\mu n} f_{s*}; X_k = X_{kn} f_{s*}, \quad (2.28)$$

$$R_r/s = (R_r \cdot \omega_0 \cdot f_{s*}) / (\omega_0 \cdot f_{s*} - \omega), \quad (2.29)$$

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

Аналогічно з (2.20) для електромеханічних характеристик [9, 10]:

$$I_r(\omega) = \frac{U_{1n} \cdot f_{s*}}{\sqrt{\left[\left(R_s + \frac{R_r \cdot \omega_0 \cdot f_{s*}}{\omega_0 \cdot f_{s*} - \omega} \right)^2 + (X_k \cdot f_{s*})^2 \right]}}. \quad (2.30)$$

За (2.26) і (2.30) сформуємо сімейства штучних електромеханічних та механічних характеристик двигуна ABB M2BAX 280SB випалювальної машини здійснюється за умови реалізації частотного регулювання відповідно до закону пропорційної зміни напруги та частоти живлення, що забезпечує стабілізацію магнітного потоку в повітряному зазорі машини.

Варіювання частоти живильної напруги як у бік зниження, так і підвищення відносно номінального значення дозволяє отримати сукупність механічних характеристик, представлених на рис. 2.5, де окремі криві відповідають дискретним значенням частоти 30, 40, 50, 60 та 70 Гц, причому природна характеристика при номінальній частоті мережі виділена червоним кольором для візуальної ідентифікації базового режиму. Аналіз отриманих залежностей свідчить про те, що застосування обраного закону керування забезпечує підтримку критичного електромагнітного моменту на незмінному рівні у широкому діапазоні регулювання, тоді як спостережуване зменшення критичного моменту в області низьких частот обумовлене зростанням відносної частки втрат у сталі осердя статора, що призводить до часткового ослаблення робочого магнітного потоку.

Для комплексної оцінки струмових навантажень виконано побудову сімейства електромеханічних характеристик залежності струму ротора від швидкості обертання при тих самих значеннях частоти живлення – 30, 40, 50, 60 та 70 Гц, що відображено на рис. 2.6, де чітко простежується тенденція до стабілізації пускових струмів незалежно від обраної частоти, що підтверджує ефективність векторного алгоритму керування з точки зору обмеження струмових перевантажень у перехідних режимах.

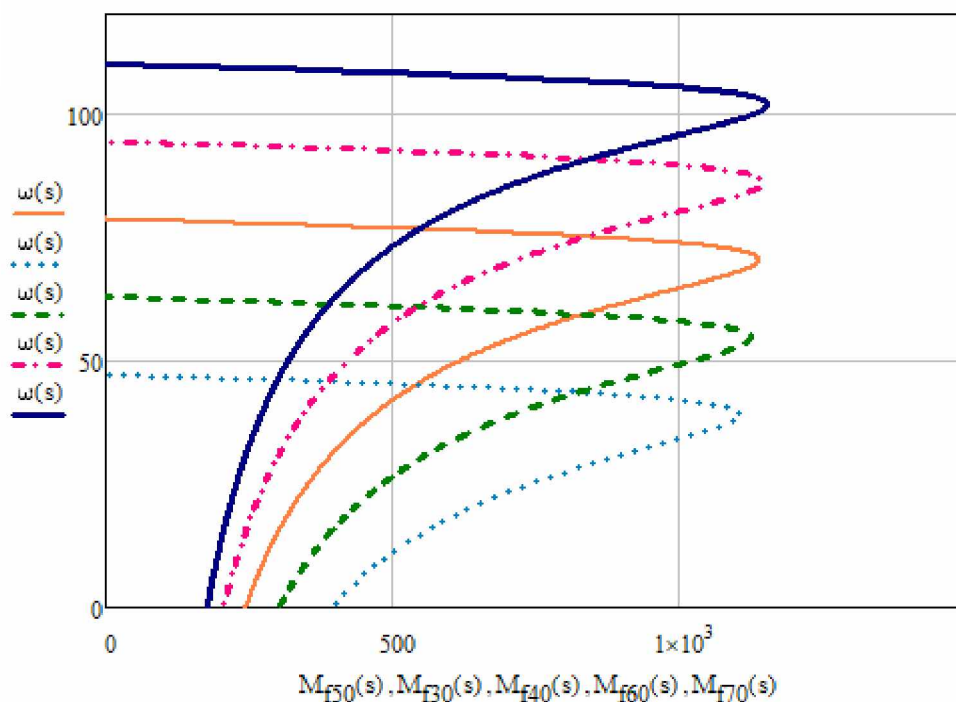


Рисунок 2.5 - Механічні характеристики двигуна випалювальної машини ЛУРГІ 552А АВВ М2ВАХ 280SB 8 у складі ПЧ-АД при $U/f = \text{const}$)

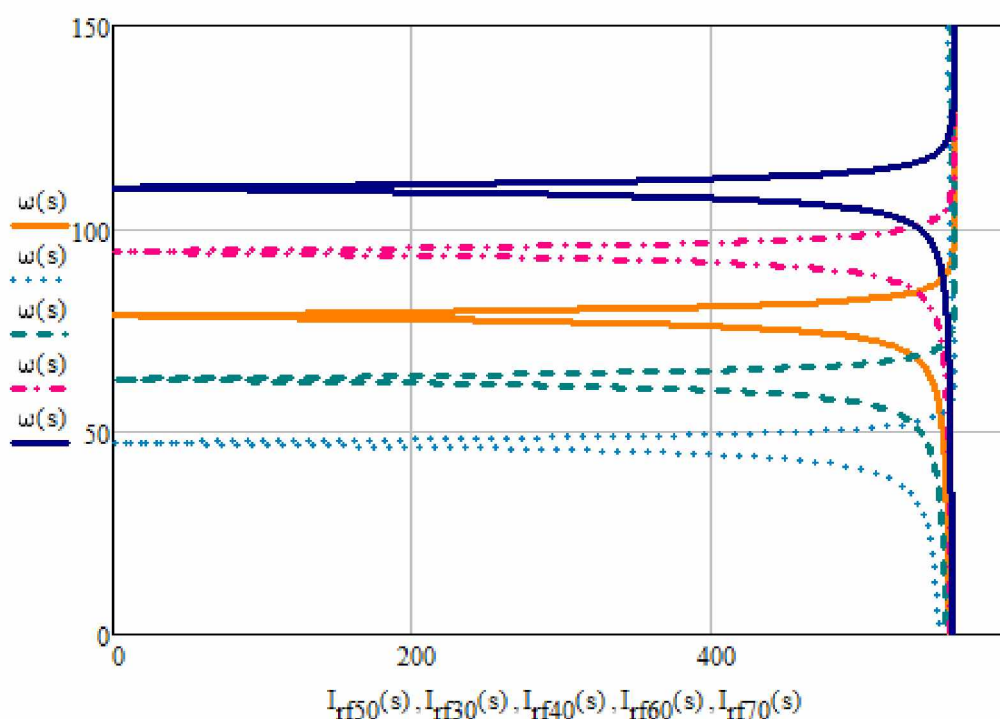


Рисунок 2.6 - Електромеханічні характеристики двигуна випалювальної машини ЛУРГІ 552А АВВ М2ВАХ 280SB 8 у складі ПЧ-АД при $U/f = \text{const}$)

Інтеграція частотно-регульованого електропривода в систему стабілізації швидкості переміщення окатків випалювальної конвеєрної машини забезпечує не лише суттєву економію електричної енергії в усталених технологічних режимах за рахунок оптимізації споживаної потужності при змінному навантаженні, але й дозволяє формувати плавні перехідні процеси розгону та гальмування, що знижує динамічні навантаження на механічні елементи транспортера та підвищує загальну надійність технологічної лінії ЦВК-2 ПрАТ «ПівніГЗК».

2.4 Динаміка електроприводу випалювальної конвеєрної машини в нерегульованому і регульованому виконанні

Аналіз динаміки АД провадиться на базі узагальненої електричної машини [11, 12] згідно якої форматизуються рівняння.

Рівняння для моделі узагальненої асинхронної машини [11, 12]:

$$\begin{cases} U_A = R_s \cdot i_A + \frac{d\Psi_A}{dt}, \\ U_B = R_s \cdot i_B + \frac{d\Psi_B}{dt}, \\ U_C = R_s \cdot i_C + \frac{d\Psi_C}{dt}. \end{cases} \quad \begin{cases} U_a = R_r \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \\ U_b = R_r \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt}, \\ U_c = R_r \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt}. \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \Psi_A &= L_{AA} \cdot i_A + L_{AB} \cdot i_B + L_{AC} \cdot i_C + L_{Aa} \cdot i_a + L_{Ab} \cdot i_b + L_{Ac} \cdot i_c; \\ \Psi_B &= L_{BA} \cdot i_A + L_{BB} \cdot i_B + L_{BC} \cdot i_C + L_{Ba} \cdot i_a + L_{Bb} \cdot i_b + L_{Bc} \cdot i_c; \\ \Psi_C &= L_{CA} \cdot i_A + L_{CB} \cdot i_B + L_{CC} \cdot i_C + L_{Ca} \cdot i_a + L_{Cb} \cdot i_b + L_{Cc} \cdot i_c; \\ \Psi_a &= L_{aA} \cdot i_A + L_{aB} \cdot i_B + L_{aC} \cdot i_C + L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c; \\ \Psi_b &= L_{bA} \cdot i_A + L_{bB} \cdot i_B + L_{bC} \cdot i_C + L_{ba} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c; \\ \Psi_c &= L_{cA} \cdot i_A + L_{cB} \cdot i_B + L_{cC} \cdot i_C + L_{ca} \cdot i_a + L_{cb} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c, \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \quad (2.33)$$

$$M = k(\bar{\Psi} \cdot \bar{i}). \quad (2.34)$$

Спростуючи (2.31–2.34) залучимо зображуючі вектори [11, 12]:

$$\bar{I}_s = \frac{2}{3}(i_A + \bar{a} \cdot i_B + \bar{a}^2 \cdot i_C) \quad (2.35)$$

$$\begin{cases} i_A = I_m \cdot \cos \omega t; \\ i_B = I_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_C = I_m \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \end{cases} \quad (2.36)$$

У системі (α, β) струм:

$$\bar{I}_s = I_\alpha + jI_\beta. \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{sk} = I_d + jI_q &= (I_\alpha + jI_\beta) \cos \gamma - j(I_\alpha + jI_\beta) \sin \gamma = \\ &= (I_\alpha \cos \gamma + I_\beta \sin \gamma) + j(I_\beta \cos \gamma - I_\alpha \sin \gamma). \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} I_d &= I_\alpha \cos \gamma + I_\beta \sin \gamma; \\ I_q &= I_\beta \cos \gamma - I_\alpha \sin \gamma. \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} I_\alpha &= I_d \cos \gamma - I_q \sin \gamma; \\ I_\beta &= I_q \cos \gamma + I_d \sin \gamma. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Використання методу просторових векторів дозволяє здійснити аналітичне перетворення початкових диференціальних залежностей (2.31–2.34), у компактну систему рівнянь, що виступає фундаментом для математичного моделювання асинхронного електродвигуна в обертовій ортогональній координатній базі (d, q) . Запропонований підхід забезпечує перехід від нестационарних фазних змінних до узагальнених векторних величин, які синхронно обертаються разом із магнітним полем статора, що значно спрощує математичний опис електромагнітних процесів і створює

зручний апарат для синтезу регуляторів у системах частотно-регульованого приводу. Отримана модель у обертовій системі координат враховує взаємозв'язок між поздовжніми та поперечними складовими магнітних потоків і струмів, що робить її оптимальним інструментом для дослідження динаміки машини в умовах змінної частоти живлення [10, 11, 12]:

$$\begin{cases} i_{sd} = \left(u_{sd} + L'_s \omega_k i_{sq} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rd} + p \omega k_r \Psi_{rq} \right) \frac{1/R}{T'_s s + 1}; \\ i_{sq} = \left(u_{sq} - L'_s \omega_k i_{sd} + \frac{k_r}{T_r} \Psi_{rq} + p \omega k_r \Psi_{rd} \right) \frac{1/R}{T'_s s + 1}; \\ \Psi_{rd} = \left[k_r R_r i_{sd} + p(\omega_k - \omega) \Psi_{rq} \right] \frac{T_r}{T_r s + 1}; \\ \Psi_{rq} = \left[k_r R_r i_{sq} + p(\omega_k - \omega) \Psi_{rd} \right] \frac{T_r}{T_r s + 1}; \\ M = \frac{3}{2} p k_r (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}); \omega = \frac{M - M_c}{J_s}; \gamma = \frac{\omega_k}{s}; \omega_k = 2\pi f, \end{cases} \quad (2.41)$$

За параметрами заступної Т-схеми визначаємо:

$$L'_s = L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r} = 0,0303 - \frac{0,029^2}{0,0303} = 2,201 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.42)$$

$$k_r = \frac{L_\mu}{L_r} = \frac{0,029}{0,0303} = 0,963. \quad (2.43)$$

$$R = R_s + k_r^2 R_r = 0,0343 + 0,963^2 \cdot 0,0118 = 0,045 \text{ Ом}. \quad (2.44)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0,0303}{0,0118} = 2,568. \quad (2.45)$$

$$T'_s = \frac{L'_s}{L_s} = \frac{2,201 \cdot 10^{-3}}{0,0303} = 0,064. \quad (2.46)$$

Структура моделі двигуна ABB M2BAX 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А показана на рис.2.7. Модель складена відповідно до рівнянь (2.41).

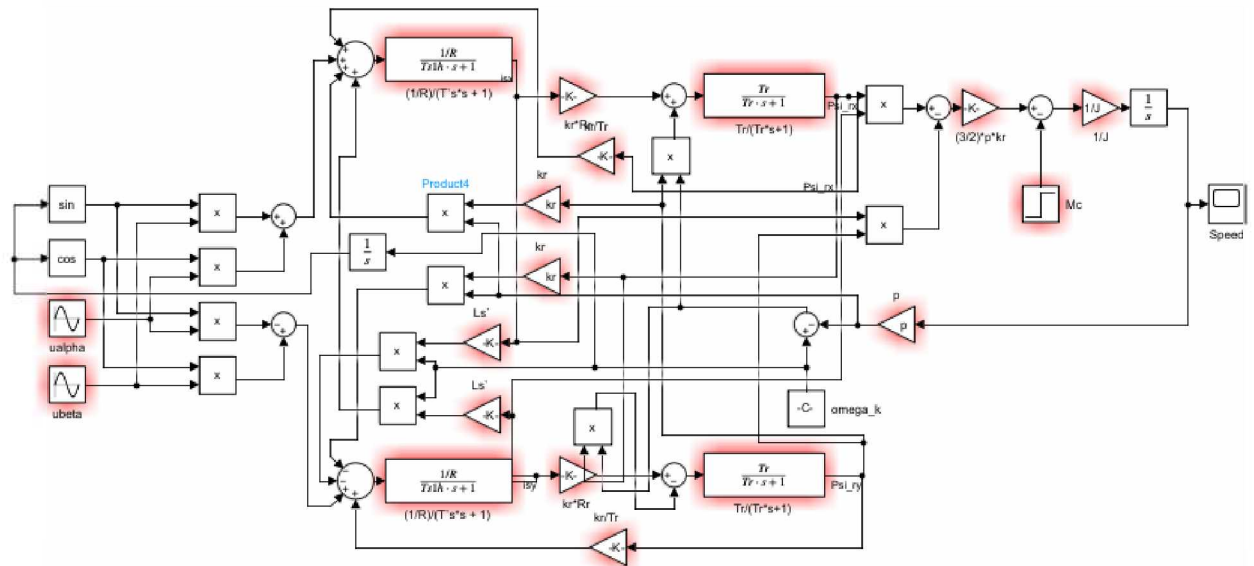


Рисунок 2.7 – Структура моделі двигуна ABB M2BAX 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А

На рис. 2.8–2.13 представлено часові діаграми перехідних процесів, отримані в результаті моделювання режиму безпосереднього включення асинхронного електродвигуна в мережу з подальшим прикладанням механічного навантаження в момент часу 1,5 с від початку перехідного процесу. Графічне відображення динаміки зміни електромагнітного моменту, кутової швидкості ротора, струмів статора та інших вихідних координат виконано за умови функціонування системи в розімкненому контурі керування, тобто без використання зворотних зв'язків за контрольованими параметрами роботи двигуна, що дозволяє оцінити власні динамічні властивості електропривода та характер протікання перехідних явищ у разі відсутності коригувального впливу автоматичних регуляторів на формування керуючих сигналів.

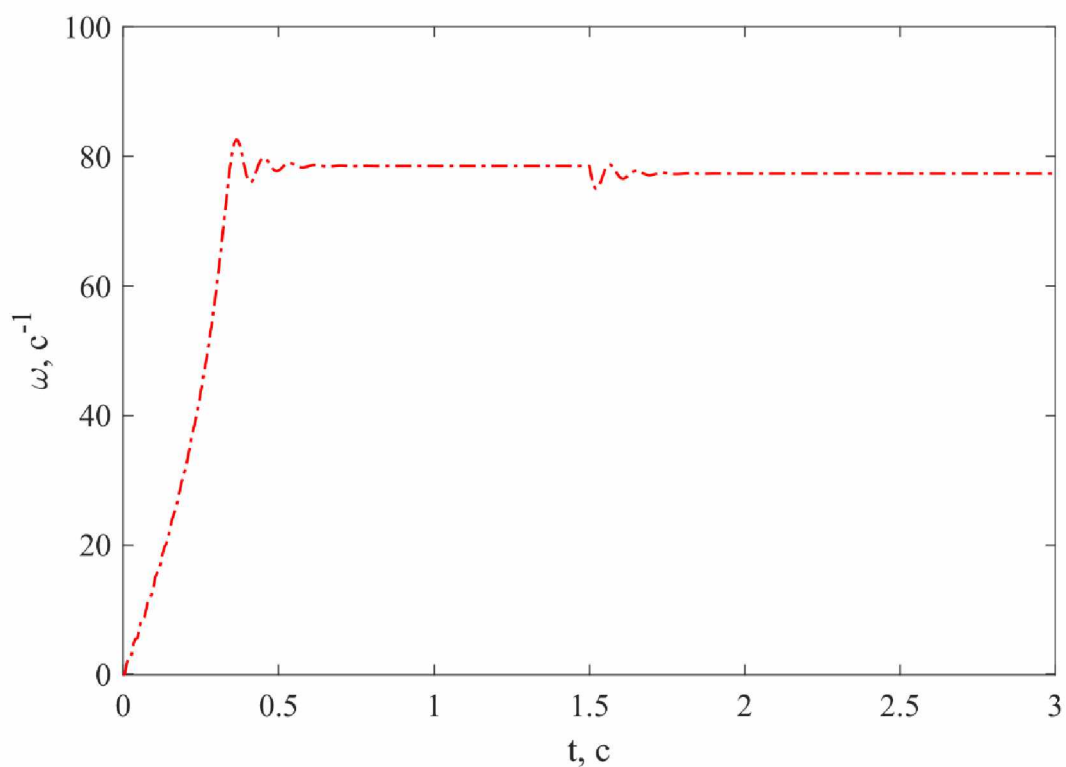


Рисунок 2.8 – Динаміка двигуна АВВ М2ВAХ 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за швидкістю

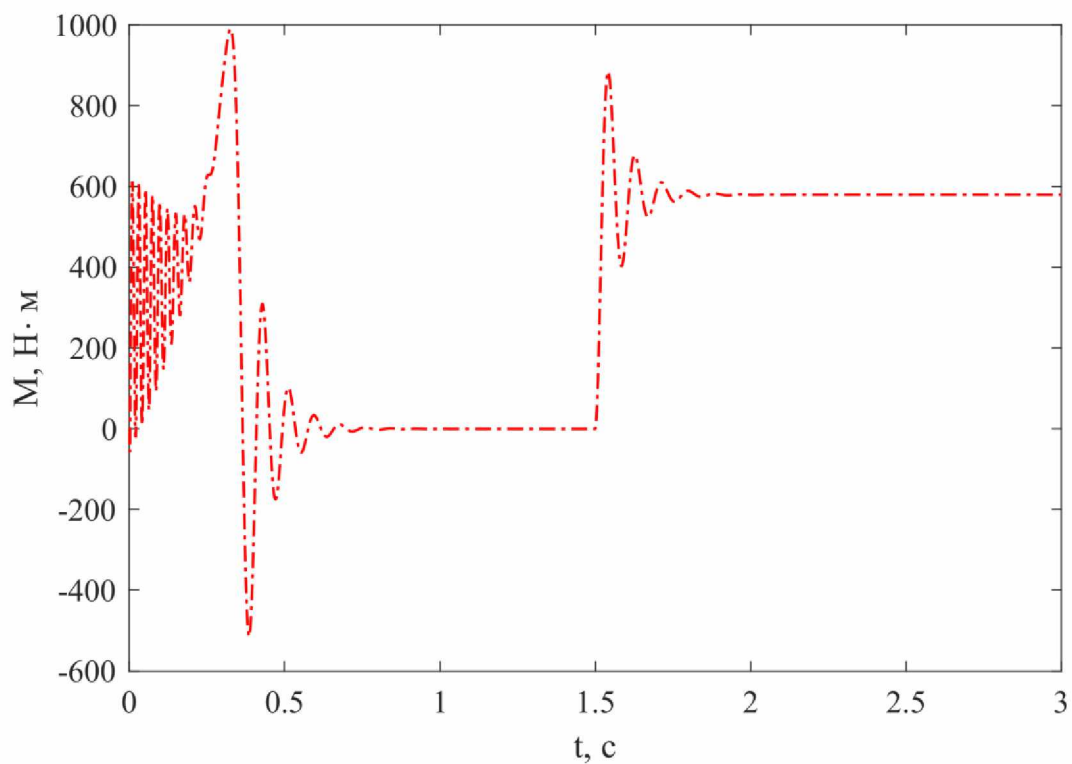


Рисунок 2.9 - Динаміка двигуна АВВ М2ВAХ 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за моментом

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2

Арк.

44

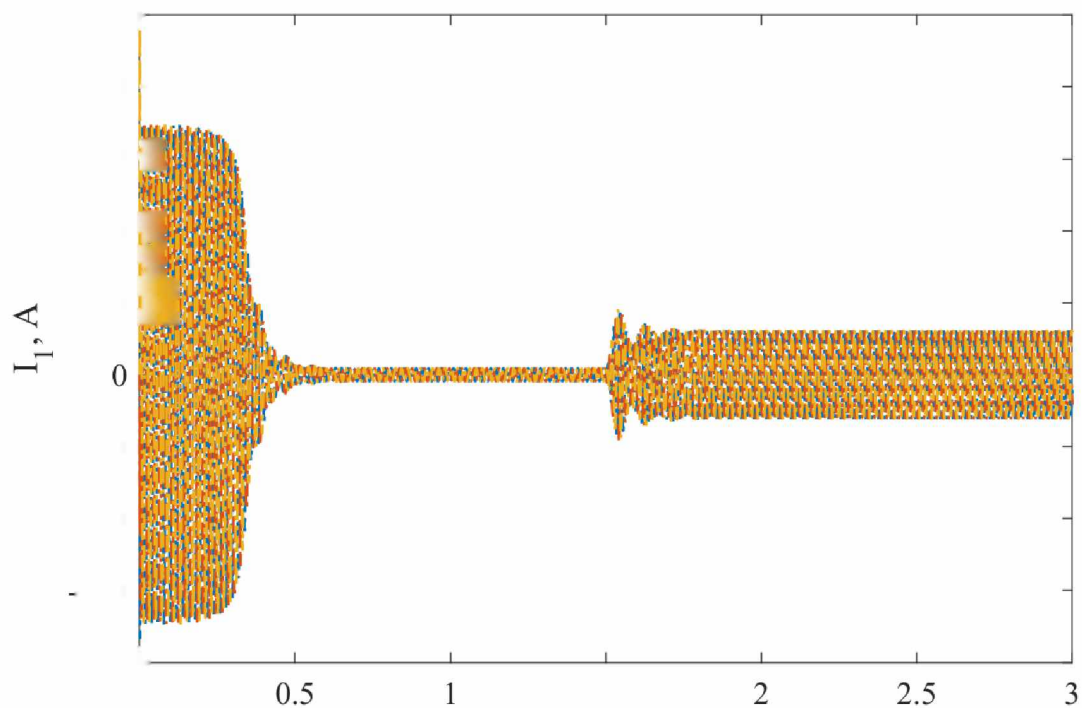


Рисунок 2.10 - Динаміка двигуна АВВ М2ВАХ 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за струмом статора

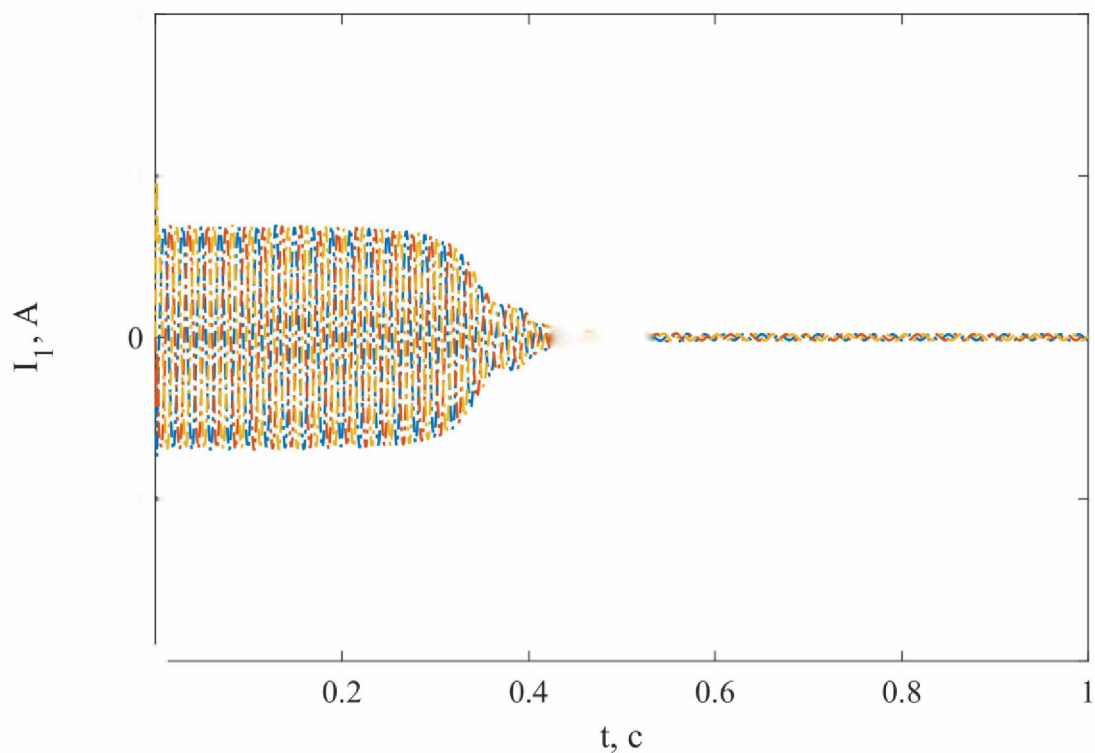


Рисунок 2.11 - Динаміка двигуна АВВ М2ВАХ 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за струмом статора (стартова секунда)

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2

Арк.

45

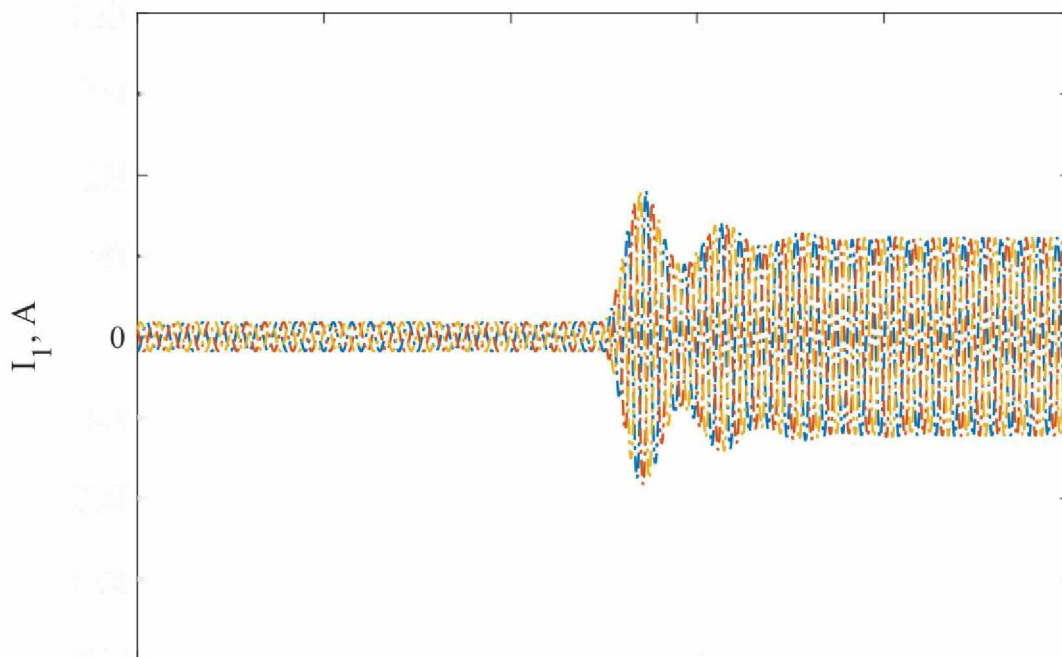


Рисунок 2.12 - Динаміка двигуна АВВ М2ВАН 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за струмом статора (подача навантаження)

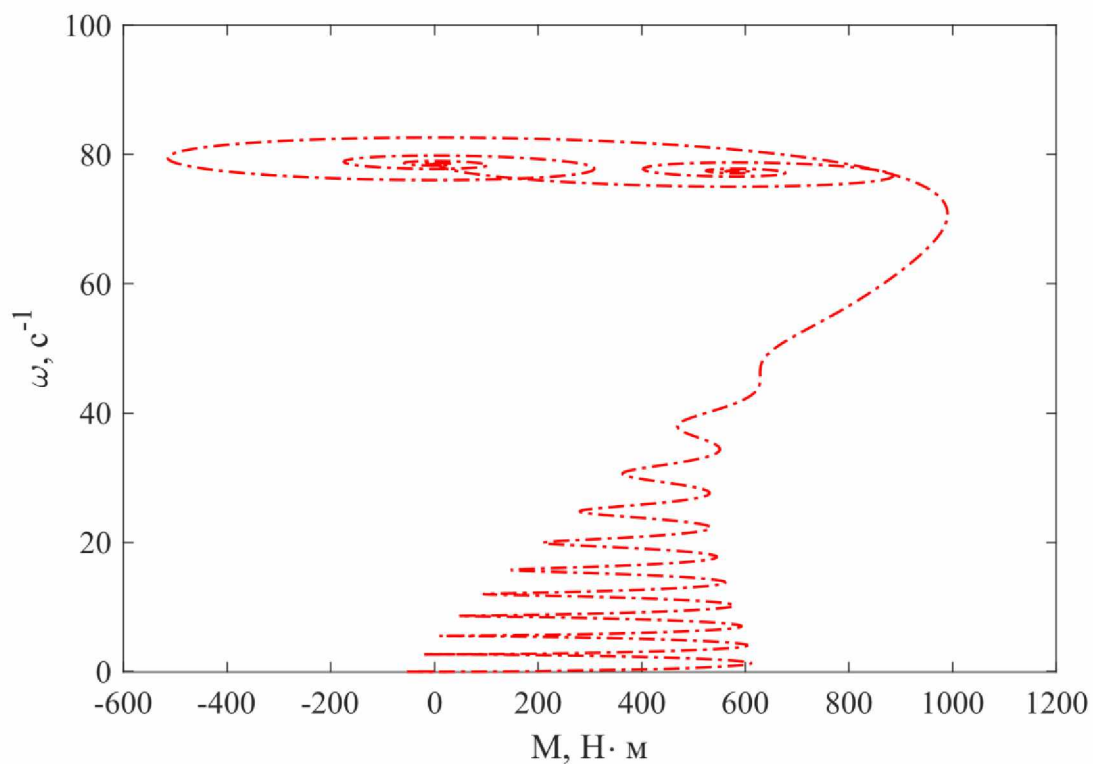


Рисунок 2.13 –Механічна характеристика двигуна АВВ М2ВАН 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А в динамічному варіанті

Далі треба проаналізувати роботу двигуна ABB M2BAX 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини в складі замкненої системи частотного електроприводу.

Висновок до розділу 2

У розділі для двигуна ABB M2BAX 280SB 8 випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А на основі заступної Т-схеми сформовано власні механічні та електромеханічні характеристики, що забезпечило аналітичне представлення електромагнітних процесів системи. Обрано перетворювач частоти ABB ACS580-01-088А-4, який задовольняє вимогам узгодження потужностей та струмів із необхідним запасом перевантажувальної здатності. Дослідження статичних характеристик підтвердило стабілізацію критичного моменту та пускових струмів у широкому діапазоні зміни частоти живлення. Математичне моделювання динаміки електропривода дозволило оцінити власні перехідні процеси та обґрунтувати доцільність впровадження замкненої системи з регулятором швидкості для точної стабілізації кінематичних параметрів конвеєра при змінному навантаженні. Виконані розрахунки та дослідження створили підґрунтя для подальшого синтезу системи автоматичного керування частотно-регульованим електроприводом, спрямованого на підвищення електроенергоефективності процесу випалювання окатків на ЦВО-2 ПрАТ «ПівніГЗК».

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.02.Р2	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

РОЗДІЛ 3.
Створення САУ електроприводом
випалювальної конвеєрної машини

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.03.РЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Іконніков І.С.</i>			<i>Створення САУ електроприводом</i> <i>випалювальної конвеєрної машини</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>				<i>Н</i>	<i>48</i>	
<i>Конс.</i>						<i>ЗЕЕМ-22</i>		
<i>Н.контр.</i>		<i>Михайленко О.Ю.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Пересунько І.І.</i>						

3.1 Створення автоматизованої системи керування швидкістю головного приводу випалювальної конвеєрної машини

З урахуванням технологічних та експлуатаційних умов функціонування конвеєрної випалювальної установки виникає необхідність у проектуванні спеціалізованої системи автоматичного регулювання частотно-керованим асинхронним електроприводом. На підставі цього синтезовано багатоконтурну структуру векторного керування приводом «перетворювач частоти – асинхронний двигун», яка інтегрує чотири регулювальні контури: два регулятори для незалежного керування проекціями вектора струму статора у синхронній системі координат, окремий канал стабілізації потокозчеплення ротора та зовнішній контур регулювання кутової швидкості, замкнутий через сигнал від тахометричного датчика обертів. Алгоритм орієнтації осей обертової координатної базису реалізується шляхом вирівнювання поздовжньої осі з вектором потокозчеплення ротора, що забезпечує розв'язування електромагнітних моментів та потокових складових. Для узгодження сигналів між стаціонарною фазною системою координат математичної моделі електромашини та синхронно обертовою базисною системою алгоритму керування застосовуються прямі та інверсні перетворення координат Парка-Горєва, які виконують функцію математичного зв'язку між фізичними величинами статора та регулювальними змінними в обертовій площині [10, 12].

Схема приводу випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А зі векторним управлінням показується на рис. 3.1.

Відповідно до схеми, необхідно створити контурні контролери.

Контролери потокозчеплення ротора і струму статора налаштуємо на модульний оптимум, частоти обертання та положення – на симетричний [13].

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.03.РЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

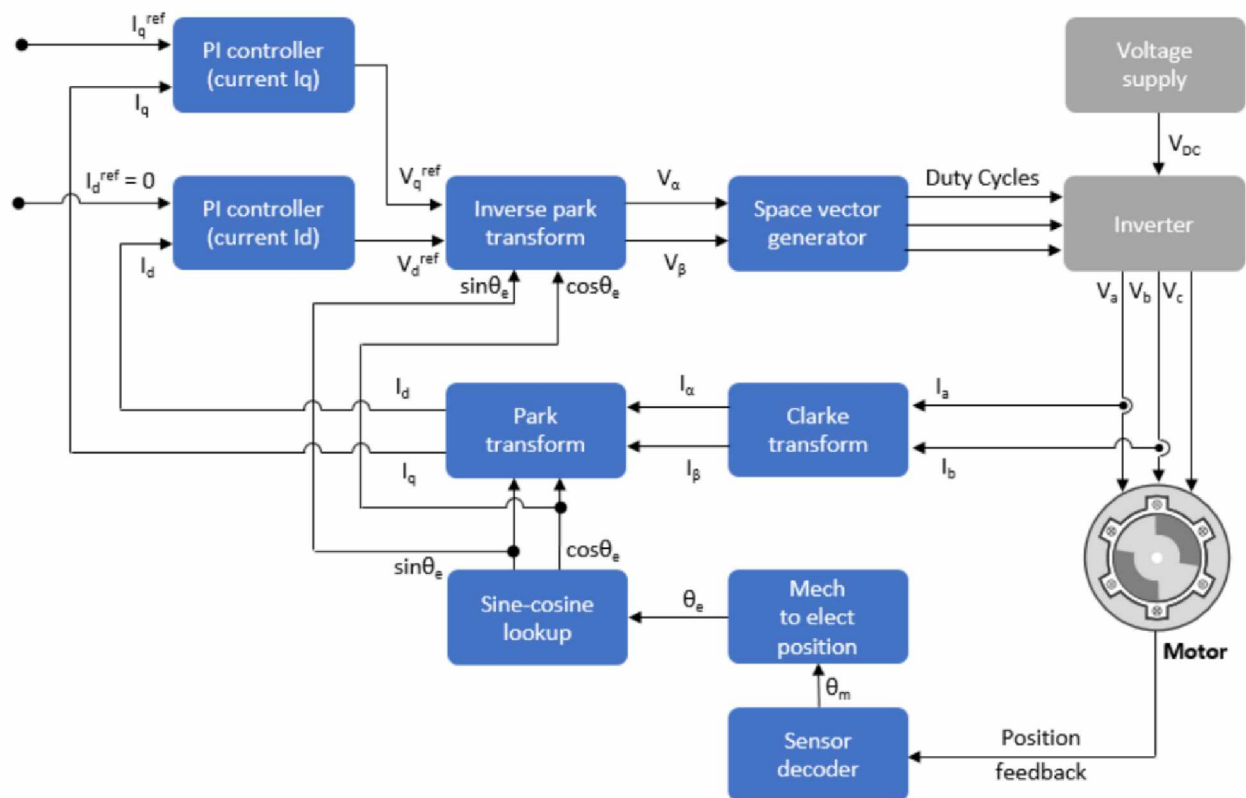


Рисунок 3.1 – Функціональна схема привода зі векторним управлінням випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А [14]

3.1.1 Коло керування струму статора

Зі схеми (див. рис. 3.2) визначаємо передавальну функцію контролера $W_{рег}^{i_{sx}}(s)$ [5].

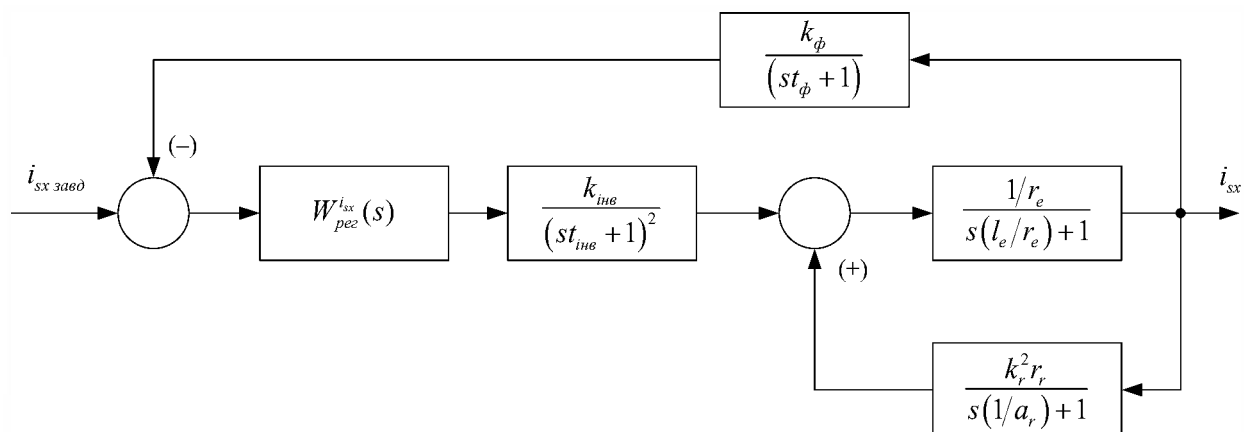


Рисунок 3.2 – Схема управління складовою i_{sx} струму статора [5]

При залученні модульного оптимуму [5]:

$$W_{pez}^{i_{sx}}(s) = W_{pez}^{MO}(s) \frac{1}{\frac{k_{инв}}{(st_{инв} + 1)^2} \frac{1/r_e}{(s/r_e + 1)} \frac{k_\phi}{(st_\phi + 1)}}. \quad (3.1)$$

тут $W_{pez}^{MO}(s)$:

$$W_{pez}^{MO}(s) = \frac{1}{2st_\mu(st_\mu + 1)}. \quad (3.2)$$

Тобто створено ПІ-регулятор де [5]:

$$k_{pez}^{i_{sx}} = \frac{l_e/r_e}{2(2t_{инв} + t_\phi)k_{инв}k_\phi \frac{1}{r_e}}, \quad (3.3)$$

$$t_{pez}^{i_{sx}} = \frac{l_e}{r_e}. \quad (3.4)$$

Контур управління для визначення $W_{pez}^{i_{sy}}(s)$ показується на рис. 3.3.

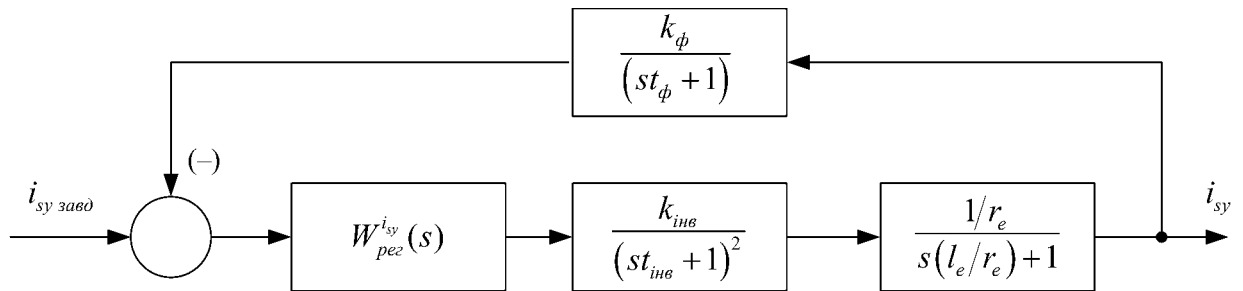


Рисунок 3.3 – Схема управління складовою i_{sy} струму статора [5]

Згідно схеми маємо:

$$W_{pez}^{i_{sy}}(s) = W_{pez}^{MO}(s) \frac{(s[2t_{инв} + t_\phi] + 1) \left(s \frac{l_e}{r_e} + 1 \right)}{k_{инв} \cdot k_\phi \cdot \frac{1}{r_e}}. \quad (3.5)$$

Отримуємо ПІ-регулятор [5]:

$$k_{pez}^{i_{sx}} = k_{pez}^{i_{sy}} = \frac{l_e/r_e}{2(2t_{инв} + t_{\phi})k_{инв}k_{\phi}\frac{1}{r_e}}, \quad (3.6)$$

$$t_{pez}^{i_{sx}} = t_{pez}^{i_{sy}} = \frac{l_e}{r_e}. \quad (3.7)$$

3.1.2 Коло керування потокозчепленням

Контур управління потокозчепленням ψ_r показується на рис. 3.4.

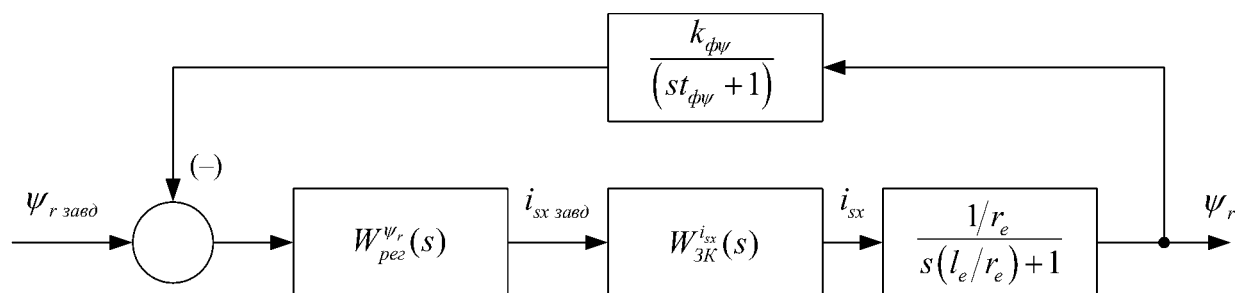


Рисунок 3.4 – Схема управління потокозчепленням ψ_r [5]

Тобто створено ПІ-регулятор:

$$W_{pez}^{\psi}(s) = \frac{1}{s2t_{\mu\psi}(st_{\mu\psi} + 1)} \frac{(s[2t_{\mu} + t_{\phi\mu}] + 1) \left(s \frac{l}{a_r} + 1 \right)}{k_{инв} \cdot k_{\phi\psi} \cdot \frac{r_r}{a_r}}. \quad (3.8)$$

тут:

$$k_{pez}^{\psi} = \frac{l_e/r_e}{2(2t_{\mu} + t_{\phi\psi})k_r k_{\phi\psi} r_r}, \quad (3.9)$$

$$t_{pez}^{\psi} = \frac{l_e}{a_r}. \quad (3.10)$$

3.1.3 Коло керування швидкістю

Схема контролера швидкості показується на рис. 3.5 [5].

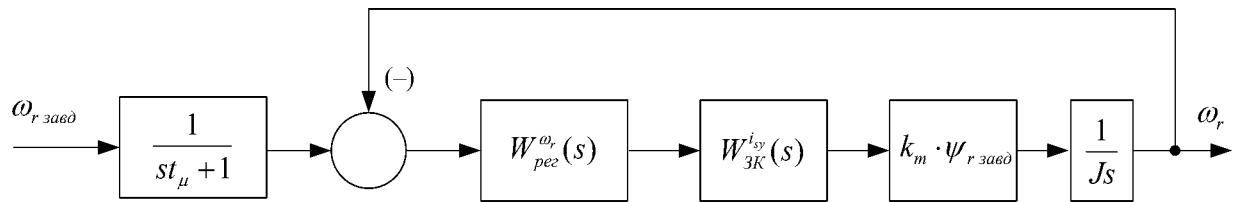


Рисунок 3.5 – Схема контролера швидкості ω_r

Зі схеми маємо:

$$W_{pez}^{\omega}(s) = W_{poz \omega}^{CO}(s) \frac{J_{екв}s}{W_{3K}^{i_{sy}}(s)k_m \Psi_{r \text{ завад}}}, \quad (3.11)$$

тут $W_{poz \omega}^{CO}(s)$ [5]:

$$W_{poz \omega}^{CO}(s) = \frac{(s4t_{\mu\omega} + 1)}{s^2 8t_{\mu\omega}^2 (st_{\mu\omega} + 1)}, \quad (3.12)$$

тут $W_{3K}^{i_{sy}}(s)$:

$$W_{3K}^{i_{sy}}(s) = \frac{1}{s2t_\mu (st_\mu + 1) + 1}. \quad (3.13)$$

Отримуємо [5]:

$$W_{3K}^{i_{sy}}(s) = \frac{(s \cdot 32 \cdot t_\mu + 1)(s \cdot 2 \cdot t_\mu + 1)J_{екв}s}{s^2 \cdot 8 \cdot (t_\mu)^2 (s \cdot 8 \cdot t_\mu + 1)k_m \cdot \psi_{r \text{ завад}}}. \quad (3.14)$$

Спростуємо:

$$(s \cdot 32 \cdot t_\mu + 1)(s \cdot 2 \cdot t_\mu + 1) \approx (s \cdot 26 \cdot t_\mu + 1)(s \cdot 8 \cdot t_\mu + 1).$$

Маємо [5]:

$$\begin{aligned} W_{3K}^{i_{sy}}(s) &= \frac{(s \cdot 26 \cdot t_\mu + 1)(s \cdot 8 \cdot t_\mu + 1)J_{екв}s}{s^2 \cdot 8 \cdot t_\mu^2 (s \cdot 8 \cdot t_\mu + 1)k_m \cdot \psi_{r \text{ завад}}} = \frac{(s \cdot 26 \cdot t_\mu + 1)J_{екв}}{s \cdot 512 \cdot t_\mu^2 \cdot k_m \cdot \psi_{r \text{ завад}}} = \\ &= \frac{26J_{екв}}{512 \cdot t_\mu^2 \cdot k_m \cdot \psi_{r \text{ завад}}} \cdot \frac{(s \cdot 26 \cdot t_\mu + 1)}{s \cdot 26 \cdot t_\mu}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Тобто створено ПІ-регулятор де:

$$k_{pez}^{\omega} = \frac{26J_{екв}}{512 \cdot t_{\mu}^2 \cdot k_m \cdot \psi_{r\text{ завод}}}, \quad (3.16)$$

$$t_{pez}^{\omega} = \frac{(s \cdot 26 \cdot t_{\mu} + 1)}{s \cdot 26 \cdot t_{\mu}}. \quad (3.17)$$

3.1.4 Коло керування положенням

Регулятор положення налаштовуємо на симетричний оптимум [5].

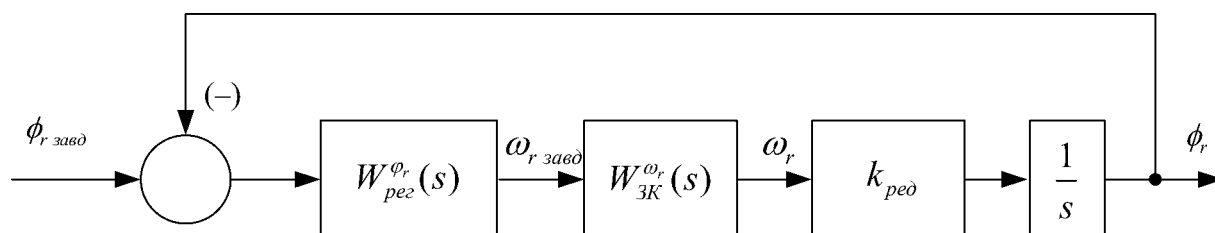


Рисунок 3.6 – Схема управління положенням ϕ_r

Зі схеми маємо [5]:

$$W_{pez}^{\phi}(s) = W_{роз\phi}^{CO}(s) \frac{1}{W_{3K}^{\omega_r}(s) \frac{1}{s} k_{пред}}, \quad (3.18)$$

тут $W_{роз\phi}^{CO}$:

$$W_{роз\phi}^{CO}(s) = \frac{(s4t_{\mu\phi} + 1)}{s^2 8t_{\mu\phi}^2 (st_{\mu\phi} + 1)} \quad (3.19)$$

тут $W_{3K}^{\omega_r}(s)$:

$$W_{3K}^{\omega_r}(s) = \frac{1}{s^2 8t_{\mu\omega}^2 (st_{\mu\omega} + 1) + s4t_{\mu\omega} + 1}. \quad (3.20)$$

Спростуємо відносно контуру швидкості $W_{3K}^{\omega_r}(s)$ [5]:

$$W_{3K}^{\omega_r}(s) = \frac{1}{s^2 8t_{\mu\omega}^2 (st_{\mu\omega} + 1) + s4t_{\mu\omega} + 1} =$$

$$= \frac{1}{s^2 8t_{\mu\omega}^3 s^2 8t_{\mu\omega}^2 + s4t_{\mu\omega} + 1} \approx \frac{1}{s4t_{\mu\omega} + 1}. \quad (3.21)$$

$$W_{pez}^{\phi}(s) = W_{poz\phi}^{CO}(s) \frac{s(s4t_{\mu\omega} + 1)}{k_{ред}}. \quad (3.22)$$

$$t_{\mu\phi} = 4t_{\mu\omega}. \quad (3.23)$$

Маємо [5]:

$$W_{pez}^{\phi}(s) = \frac{(s4t_{\mu\phi} + 1)}{s^2 8t_{\mu\phi}^2 (st_{\mu\phi} + 1)} \cdot \frac{s(s4t_{\mu\omega} + 1)}{k_{ред}} =$$

$$= \frac{1}{2t_{\mu\phi} k_{ред}} \frac{(s4t_{\mu\phi} + 1)}{s4t_{\mu\phi}}. \quad (3.24)$$

Тобто створено ПІ-регулятор [5] де:

$$k_{pez}^{\phi} = \frac{1}{2t_{\mu\phi} k_{ред}}, \quad (3.25)$$

$$t_{pez}^{\phi} = 4t_{\mu\phi}, \quad (3.26)$$

$$t_{ф\phi} = 4t_{\mu\phi}. \quad (3.27)$$

3.1.5 Задатчик інтенсивності

Аналіз математичної моделі прямого пуску електропривода виплювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А у стаціонарній координатній базі свідчить про стрибкоподібний характер наростання кутової швидкості та електромагнітного моменту на початковій стадії розгону, що суттєво порушує технологічний регламент процесу випалу окатків.

Для компенсації вказаних динамічних нелінійностей у режимах пуску та гальмування доцільно інтегрувати в контур керування задатчик інтенсивності, алгоритм роботи якого детально описано у джерелі [5]. Використання програмного модуля з S-апроксимацією кривої розгону забезпечує програмне

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.03.РЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

обмеження другої похідної кутової швидкості, що еквівалентно контролю темпу зміни динамічного моменту приводу.

У результаті суттєво підвищується якість динаміки електроприводу випалювальної конвеєрної машини, усуваючи механічні удари та вібрації у кінематичному ланцюгу конвеєрної системи відповідно до вимог [5].

3.2 Система векторного управління електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А

Після завершення розрахункових процедур щодо налаштування параметрів регулювальних контурів та обрання оптимальної конфігурації задатчику інтенсивності з S-характеристикою, доцільно перейти до формування узагальненої структурної схеми системи автоматичного керування електроприводом конвеєрної випалювальної машини.

У якості математичної бази для імітаційного моделювання динаміки виконавчого механізму використовується структурна модель асинхронного електродвигуна, побудована в нерухомій фазній системі координат, що дозволяє адекватно відтворити електромагнітні перехідні процеси в обмотках статора та ротора при безпосередньому включенні в мережу або живленні від перетворювача частоти. Таке представлення забезпечує коректне узгодження сигналів зворотного зв'язку з вихідними координатами регуляторів та дає змогу верифікувати працездатність синтезованої системи керування в умовах, максимально наближених до реальних експлуатаційних режимів технологічного обладнання.

Модель створена згідно зі схемою (рис. 3.1) у MATLAB/Simulink за основу якої взято модель [15] показується на рис. 3.7.

Результати симуляції управління головним приводом випалювальної конвеєрної машини з залучення створеної векторної системи керування наводяться на рис. 3.8, 3.9.

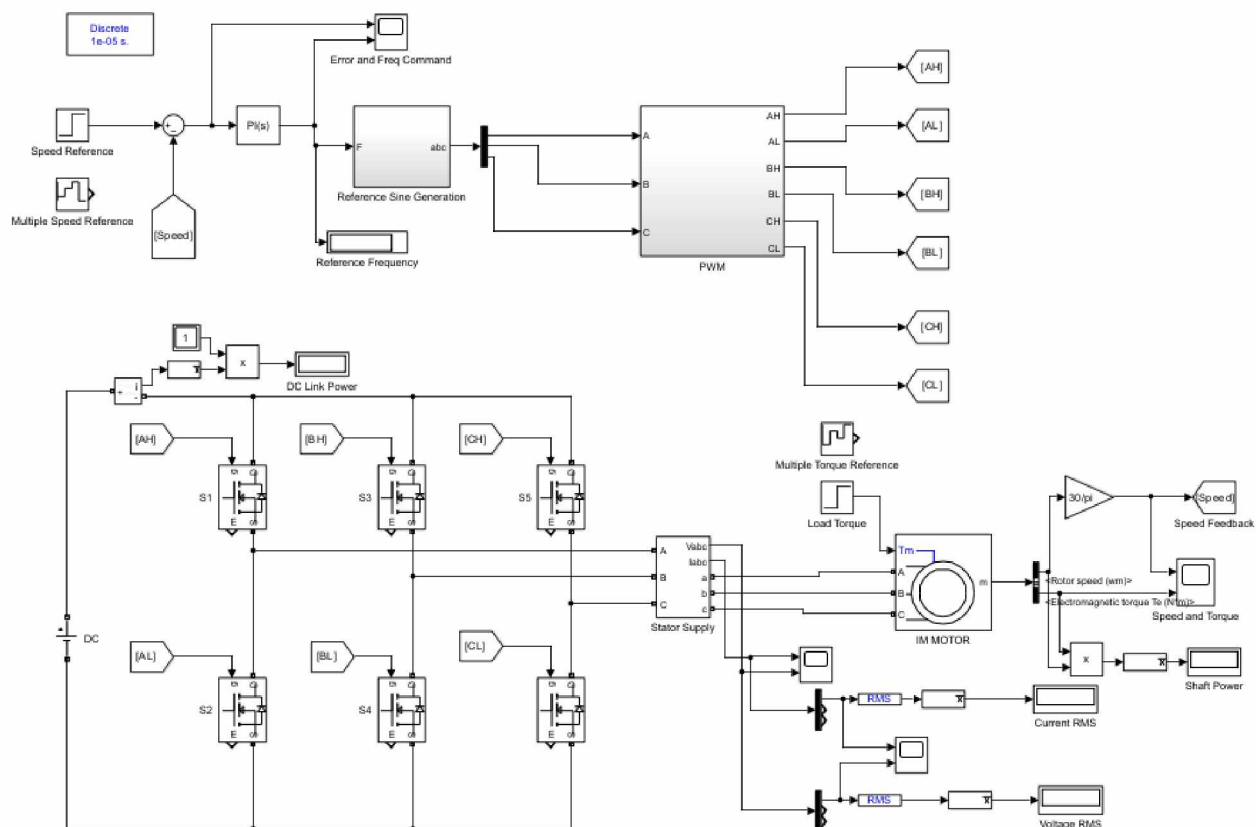


Рисунок 3.7 – Схема САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А з векторним управлінням в MATLAB/Simulink [15]

Аналіз перехідних режимів засвідчує суттєве зменшення амплітуди перерегулювання швидкості під час пуску електропривода та ефективне зниження максимального значення динамічного моменту, тоді як тривалість перехідного процесу залишається практично незмінною порівняно з розімкненим варіантом.

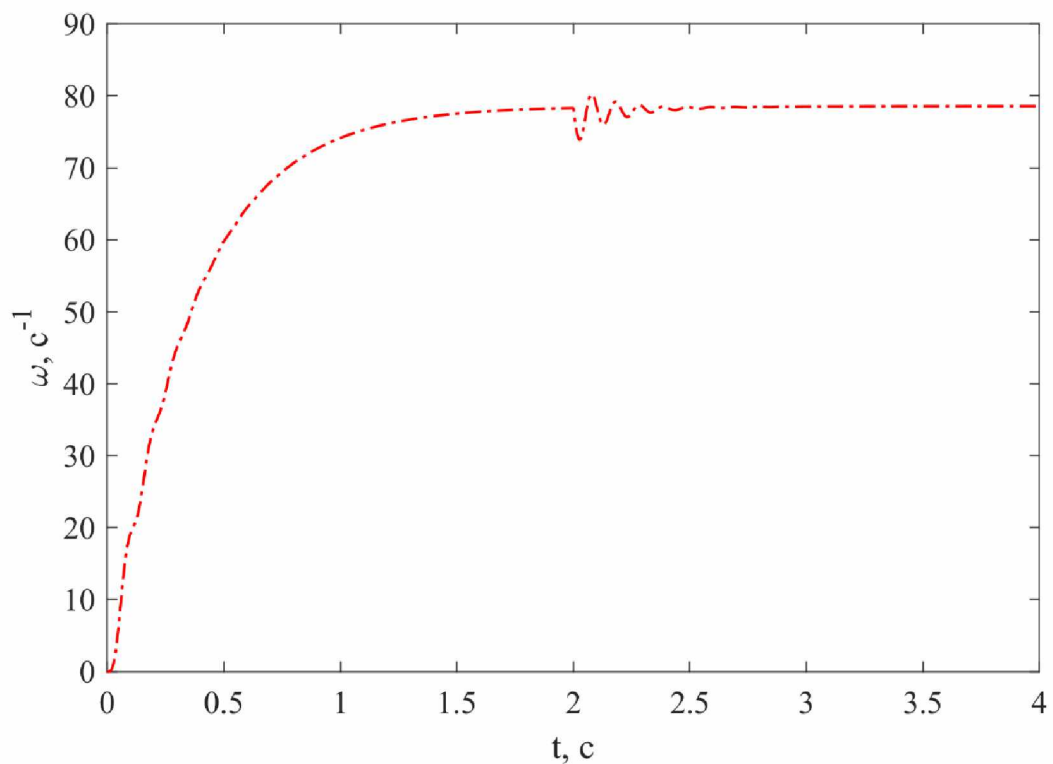


Рисунок 3.8 – Динаміка САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за швидкістю

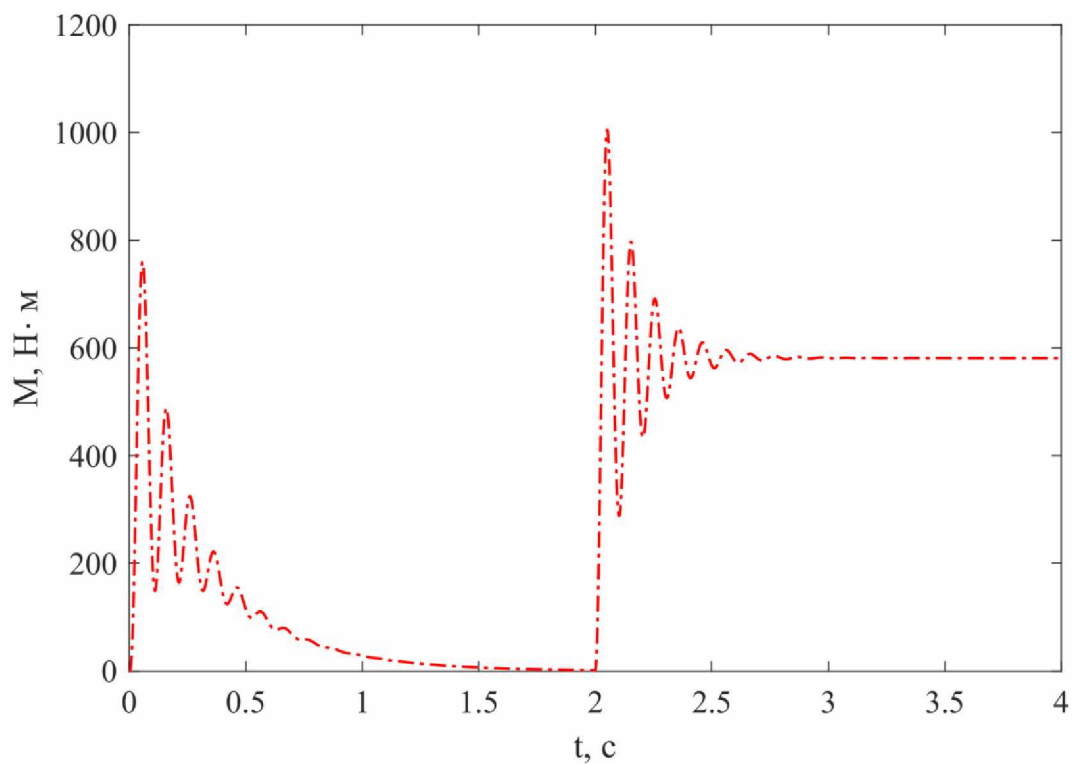


Рисунок 3.9 – Динаміка САУ електроприводом випалювальної конвеєрної машини ЛУРГІ 552А за моментом

Враховуючи отримані динамічні показники та підвищену стійкість системи до змін робочого навантаження, техніко-експлуатаційне впровадження частотно-регульованого приводу на ланцюговому грохоті конвеєрної випалювальної установки ЛУРГІ 552А є цілком обґрунтованим та відповідає вимогам сучасного технологічного регламенту.

Висновок до розділу 3

У розділі створено багатоконтурну САУ електроприводом конвеєрної випалювальної машини з ПІ-контролерами у контурах управління струмом статора, потокозчепленням ротора, швидкістю та положенням. Параметри пропорційно-інтегральних регуляторів розраховано за критеріями модульного та симетричного оптимуму, що забезпечило необхідну швидкодію та запас стійкості замкненої системи, а для усунення стрибкоподібних змін моменту та швидкості в перехідних режимах інтегровано задатчик інтенсивності, який програмно обмежує другу похідну кутової швидкості та підвищує плавність розгону й гальмування. На основі структурної схеми в MATLAB/Simulink створено модель САУ, результати симуляції якої підтвердили ефективність синтезованої структури: зниження перерегулювання та динамічних навантажень при збереженні прийнятної тривалості розгону.

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.03.РЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Висновки

1. Комплексний аналіз технологічного процесу випалювання окатків на ЦВО-2 ПрАТ «ПівнГЗК» виявив критичну залежність якості готової продукції від стабільності швидкості переміщення візків, що обґрунтовує необхідність переходу від нерегульованого електропривода до сучасної системи з частотним керуванням, здатної компенсувати збурення від змінного масового навантаження та коливань тиску технологічних газів.

2. Розрахунок потужності приводу з урахуванням сумарних опорів тертя кочення та ковзання, інерційних навантажень при завантаженні шихти та компенсаційного моменту в зоні розвантаження дозволив обґрунтувати вибір енергоефективного асинхронного двигуна ABB M2BAX 280SB 8 із запасом потужності близько двадцяти відсотків для надійного пуску після тривалих простоїв.

3. На основі аналізу електроенергетичних параметрів та умов експлуатації обрано перетворювач частоти ABB ACS580-01-088A-4, який повністю задовольняє вимогам узгодження потужностей і струмів та забезпечує необхідну перевантажувальну здатність у всьому діапазоні технологічних режимів.

4. Форматизована доцільність застосування векторного керування електроприводом випалювальної конвеєрної машини, оскільки воно гарантує високу якість динаміки, точну стабілізацію швидкості переміщення стрічки візків за змінного масового навантаження та безпосередньо впливає на технологічну стабільність процесу випалу окатків, мінімізуючи відхилення температурного режиму і знижуючи брак готової продукції.

5. Створення багатоконтурної системи векторного керування з ПІ-регуляторами, налаштованими за критеріями модульного та симетричного оптимуму, та інтеграція задатчика інтенсивності забезпечили програмне обмеження другої похідної швидкості, що усуває стрибкоподібні зміни моменту та підвищує плавність перехідних процесів.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.В</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		60

6. Результати симуляцій в MATLAB/Simulink верифікували працездатність розробленої системи автоматичного керування: суттєве зменшення амплітуди перерегулювання швидкості, зниження максимального динамічного моменту та збереження прийнятної тривалості розгону підтверджують технічну ефективність запропонованого рішення для підвищення енергоефективності, надійності та технологічної стабільності процесу випалювання окатків.

					<i>КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.В</i>	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Список використаної літератури

1. Структура ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» [Електронний ресурс] // ТОВ «Метінвест холдинг» [Сайт]. Режим доступу до ресурсу: <https://sevgok.metinvestholding.com/ua/about/structure>.
2. В Кривому Розі на ПівнГЗК оновили обладнання випалювальної машини ЛУРГІ 552А <https://www.veskr.com.ua/krivorozhskie-gorodskie-novosti/71780-v-krivomu-rozi-na-pivngzk-onovili-obladnannya-vipalyuvalnoji-mashini-lurgi-552a.html>
3. Інструкція з експлуатації установок огрудкування у м. Кривий Ріг. Франкфурт-на-Майні, 1979. 240 с.
4. Шиліна, О. П. Технологія конструкційних матеріалів. Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво : навчальний посібник/ [Вид. 2-е, перероб. та доп.]. Вінниця: ВНТУ, 2025. 97 с.
5. Поварніцин О.С. Модернізація електропривода ланцюгового грохота випалювальної машини ЦБК-2 ПрАТ «ПівнГЗК» шляхом упровадження системи частотного регулювання. Випускна кваліфікаційна робота бакалавра. Кривий Ріг. 2022. 68 с.
6. ABB Catalog 2024 Low voltage General performance cast iron motors for Europe. 44 р. URL: https://library.e.abb.com/public/e66a5a81e80849fc8ac71fd0d4e31b7e/9AKK108196_General_performance_cast_iron_motors_09-2024_lowres.pdf?x-sign=3Uzx7hIb6AbGgE1zelPFxh76s7KxoTLVrbuuQQV4o42NRxME7YSLwqxqq1m8Q80u (Дата звернення: 26.05.2026)
7. Приводи АБВ загального призначення Посібник з монтажу та введення в експлуатацію Приводи ACS580-01 (0,75–250 кВт, 1,0–350 к.с.) https://anv.com.ua/ACS580_Hardware_manual_RU.pdf (Дата звернення: 26.05.2026)
8. Kostal, T., Koble, P. Induction Machine On-Line Parameter Identification for Resource-Constrained Microcontrollers Based on Steady-State

					КНУ.РБ.141.26.249с.04.00.Л	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		62

Voltage Model. *Electronics* 2021, 10, 1981.
<https://doi.org/10.3390/electronics10161981>

9. 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.

10. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

11. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2001. 410 с.

12. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

13. Казачковський М.М. Комплектний електропривод. Дніпропетровськ: НГУ, 2003. 226 с.

14. Open-Loop and Closed-Loop Motor Control Techniques. *MathWorks*. URL: https://www.mathworks.com/help/mcb/gs/open-loop-and-closed-loop-control.html#mw_e910950f-e140-4b92-9353-9066cd7dcc27 (Дата звернення: 06.06.2026)

15. ARJUN TM. Closed Loop V/F Control of Induction Motor. *MATLAB Central File Exchange*. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/103230-closed-loop-v-f-control-of-induction-motor>. (Дата звернення: 06.06.2026)