

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ ТА МЕХАТРОНІКИ



ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра на тему:

**«Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу
вагоноперекидача»**

Здобувач: Тимофєєв О.О.

II курсу, групи АЕМм-20

Керівник: доцент Бабіч В.Ф.

Кваліфікаційна робота магістра допускається до захисту.

Рішення кафедри від 17.06.2024 р., протокол № 12.

Завідувач кафедри ЕтаМ _____ Петро ОСАДЧУК

ОДЕСА 2024

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра: Електромеханіки та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Галузь знань: 14 – Електрична інженерія

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри ЕтаМ

д.т.н., доц. Осадчук П.І.

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

здобувачу вищої освіти

Тимофєєву Олексію Олександровичу

Тема роботи: «Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу вагоноперекидача».

Керівник роботи: Бабіч Владислав Федорович, к.т.н., доцент.

2 Затверджено наказом ОНТУ № 504-03 від 07.09.2024 р.

Строк подання студентом роботи: 07.06.2024 р.

3 Вихідні дані до роботи: Вагоноперекидач типу ВРС-75 (ВРС-120), Кут повороту ротора – 175 градус; час розвантаження напіввагонів (прямий та зворотний хід) – 63...75 с; рід струму – змінний; напруга – 380 В.

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

Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.

1 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми підготовки шихти. Конструкція і характеристики вагоноперекидача. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода вагоноперекидача. Сучасні методи регулювання швидкості обертання електроприводу вагоноперекидача. Формулювання вимог до електроприводу вагоноперекидача, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок параметрів схеми заміщення та статичних характеристик двигуна.

2 Дослідження динамічних властивостей електроприводу вагоноперекидача на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу вагоноперекидача. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу вагоноперекидача до і після модернізації.

3 Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.

Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.

Список використаних джерел. Додатки.

5 Перелік демонстраційного матеріалу: слайди презентації (12 шт.): 1 Титульний аркуш . 2 Мета, задачі, методи дослідження. 3 Технологічна схема вагоноперекидача. 4 Розрахунок потужності двигуна, технічні характеристики. 5 Статичні характеристики електроприводу. 6 Структурна схема перетворювача частоти. 7 Принципова електрична схема силової частини. 8 Модель електроприводу вагоноперекидача з прямим пуском. 9 Результати моделювання приводу з прямим пуском. 10-11. Модель модернізованого

електроприводу вагоноперекидача. 12-13. Результати моделювання електроприводу після модернізації. 14 Висновки.

6 Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7 Дата видачі завдання: 05.02.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів	Прим.
1	Вступ. Загальна характеристика роботи. Актуальність теми. Об'єкт і мета роботи.	05.04.2024	
2	1 Розрахунково-конструкторська частина. Опис технологічної схеми підготовки шихти. Конструкція і характеристики вагоноперекидача. Опис принципу дії, конструкції та кінематичної схеми привода вагоноперекидача. Сучасні методи регулювання швидкості обертання електроприводу вагоноперекидача. Формулювання вимог до електроприводу вагоноперекидача, обґрунтування типу двигуна, розрахунок його потужності. Розрахунок параметрів схеми заміщення та статичних характеристик двигуна.	30.04.2024	
3	Дослідження динамічних властивостей електроприводу вагоноперекидача на моделі. Обґрунтування вибору, розробка структурних і функціональних схем та розрахунок параметрів окремих елементів системи електроприводу вагоноперекидача. Опис системи ПЧ-АД. Моделювання динамічних режимів електромеханічної системи електроприводу вагоноперекидача до і після модернізації.	25.05.2024	
5	Економічна частина. Розрахунок економічної ефективності від модернізації електроприводу.	10.06.2024	
6	Висновки і рекомендації за прийнятими в роботі рішеннями.		
7	Попередній захист кваліфікаційної роботи магістра	17.06.2024	
8	Перевірка роботи на доброчесність. Рецензування роботи	18.06.2024	
9	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.06.2024	

Здобувач-дипломник _____ Тимофєєв О.О.

Керівник _____ Бабіч В.Ф.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Тимофєєв О.О.

РЕФЕРАТ

Тимофєєв О.О. «Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу вагоноперекидача». Кваліфікаційна робота магістра. Одеса: ОНТУ, 2024. – 81 с. Іл.: 44. Табл.: 6.

У кваліфікаційній роботі описано автоматизований електропривод вагоноперекидача, області його застосування та конструктивні особливості. Сформульовано вимоги до електроприводу, розраховано навантаження та обрано двигун для приводу вагоноперекидача.

Вибрано систему електроприводу «перетворювач частоти - асинхронний двигун», обрано та досліджено закон керування за допомогою перетворювача частоти.

Розраховано електричні параметри схеми заміщення двигуна. Змодельовано перехідні процеси двигуна при прямому пуску та в комбінації з перетворювачем частоти, побудовано механічні та електромеханічні статичні характеристики.

Розраховано економічний ефект від модернізації електроприводу вагоноперекидача та наведено заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: вагоноперекидач, автоматизований електропривод, перетворювач частоти, математична модель, частотне регулювання обертів, механічна характеристика.

ABSTRACT

Timofeev O.O. "Research and improvement of the operation of the electric drive of the wagon dumper". Master's qualification work. Odesa: ONTU, 2024. – 81 p. Illustration: 24. Table: 6.

The qualification work describes the automated electric drive of the car dumper, its areas of application and design features. The requirements for the electric drive have been formulated, the load has been calculated, and the engine has been selected to drive the wagon tipper.

The electric drive system "frequency converter - asynchronous motor" was selected, the control law using the frequency converter was selected and investigated.

The electrical parameters of the engine replacement scheme were calculated. Transient processes of the engine during direct start and in combination with a frequency converter were simulated, mechanical and electromechanical static characteristics were constructed.

The economic effect of the modernization of the electric drive of the wagon tipper is calculated, and measures for occupational health and safety are given.

Key words: derailleur, automated electric drive, frequency converter, mathematical model, frequency regulation of revolutions, mechanical characteristics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ.....	12
1.1 Структура та технологічні операції агломераційного виробництва	12
1.2 Устаткування для розвантаження вагонів із сипучими матеріалами	16
1.2.1 Вагоноперекидачі	18
1.2.2 Технічні характеристики стаціонарного роторного вагоно-перекидача типу ВРС-75 (ВРС-120)	19
1.2.3 Тахограма роботи роторного вагоноперекидача	22
1.2.3 Кінематична схема роторного вагоноперекидача	24
1.3 Розрахунок потужності електроприводу роторного вагоноперекидача ВРС-75.....	25
1.3.1 Визначення моменту опору при кантуванні ротора	25
1.3.2 Розрахунок потужності електропривода.....	28
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ВАГОНОПЕРЕКИДАЧА	30
2.1 Вибір потужності та типу електродвигуна	30
Рисунок 2.1 – Загальний вигляд та габаритно-приєднувальні розміри асинхронного електродвигуна 5АМ315S10БУ2 виконання ІМ1081(В3)	30
2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД	31
2.4 Вибір перетворювача частоти	37
2.4.1 Вибір потужності ПЧ	41
2.4.2 Вибір типу перетворювача частоти.....	42
2.5 Вибір закону керування системи керування електроприводом на основі ПЧ46	
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ВАГОНОПЕРЕКИДАЧА	50

					<i>КРМ.ЕтаМ.141.504-03.6</i>		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Тимофеев О.О...			<i>Дослідження та вдосконалення роботи електроприводу вагоноперекидача</i>	Літ.	Аркуш
Керівник		Бабіч В.Ф.					6
						ОНТУ, АЕМм-20а	
Зав.кафедри		Осадчук П.І.					

3.1 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна	50
3.2 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску	52
3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем.....	57
3.4 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електроприводу з векторним керуванням та мережевим інвертором	60
3.4.1 Рекуперація енергії мережевими інверторами.....	60
3.4.2 Налаштування блоку векторного керування <i>Vector Control</i> та результати моделювання	66
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	72
4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту	73
4.2 Розрахунок фонду заробітної платні	74
4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів.....	75
4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	75
4.5 Розрахунок економічної ефективності.....	76
5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА.....	78
5.1 Висновки і рекомендації, засновані на рішеннях, прийнятих в ході даного дослідження.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АД – асинхронний двигун;
ЕП – електропривод;
ДШ – датчик швидкості;
ПЧ – перетворювач частоти;
АІН – автономний інвертор напруги;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;
ККД, η – коефіцієнт корисної дії;
 ω – кутова швидкість (частота обертання), рад/с;
 M – момент сили, Н·м;
 H, h – тиск, Па;
 Q – продуктивність, витрата, м³/с, вага, Н;
 P, N – потужність, Вт;
 I, i – струм (сила електричного струму), А;
 Ψ, ψ – потокозчеплення, Вб;
 f – частота, Гц;
 R, r – електричний опір, Ом;
 T, t – час, с;
 L, l – індуктивність, Гн;
 S, s – ковзання, %;
 J, j – динамічний момент інерції, кг·м².

ВСТУП

Одним з ключових факторів підвищення продуктивності праці та якості металургічної продукції є автоматизація процесів вивантаження сипучих шихтових компонентів агломерату із залізничних напіввагонів. Така автоматизація забезпечує безпечні умови експлуатації систем підготовки шихти для виплавлення металу, зменшує викиди шкідливих речовин в атмосферу та звільняє людей від монотонної та важкої праці.

Нині в промисловості понад 90 % спожитої електричної енергії використовують системи електроприводу, електротехнічні та освітлювальні установки. Значний потенціал енергозбереження полягає в удосконаленні електроприводів, на які припадає близько 60 % загального споживання електроенергії. У деяких галузях промисловості електроприводи споживають до 80 % електроенергії. Узгодження швидкості двигуна електроприводу зі швидкістю робочого механізму дозволяє заощадити і покращити керування технологічним процесом.

Використання мікропроцесорних систем керування технологічними процесами робить керування процесами більш гнучким і оперативним, одночасно адаптуючи впливи навколишнього середовища на роботу об'єкта керування.

Таким чином, сучасні установки і технічні процеси, що здійснюються в них, вимагають широкого використання сучасних засобів автоматичного керування, заснованих на постійному моніторингу, різних вимірювальних приладів і безперервному отриманні інформації про хід процесу за допомогою відповідних вимірювань. У зв'язку з цим необхідність створення автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) обумовлена рядом причин, найбільш важливими з яких є:

- зростаючі економічні вимоги до енерговитрат на виробництво продукції;
- велика кількість інформації, яку необхідно обробляти;
- складність керування.

Системи керування технологічними процесами повинні вирішувати такі основні завдання:

- збирання та первинну обробку інформації про стан об'єкта керування;

- оптимальне керування для зменшення втрат;
- регулювання параметрів процесу;
- облік на робочих місцях і в масштабах підприємства;
- діагностичний контроль робочого стану обладнання;
- оперативне керування режимами роботи системи.

Для вагоноперекидачів основними робочими процесами є процеси введення вагону всередину вагоноперекидача, його закріплення, поворот навколо продольної осі на кут до 175° , очищення вагону від залишків матеріалу за допомогою вібраторів, повернення перекидача у вихідне положення, виведення вагону з перекидача. Час протікання і параметри процесів вивантаження (тахограми) залежать від температури навколишнього середовища (змерзання матеріалу), виду матеріалу та інших збурень. Крім того, конструктивні особливості, потужність і режим роботи вагоноперекидача впливають на структуру блоку керування.

Надійна робота вагоноперекидача забезпечується застосуванням якісного електромеханічного обладнання, в тому числі електропривода ротора, який споживає значну потужність.

В даній кваліфікаційній роботі розглянуті питання автоматизації технологічного процесу розвантаження вагонів з сипучими матеріалами, а також виконана детальна розробка системи автоматичного керування електроприводом ротора вагоноперекидача.

Актуальність теми

Актуальність теми визначається потребою в забезпеченні стійкої і економічної роботи електропривода ротора вагоноперекидача при використанні сучасних засобів та законів частотного регулювання асинхронного електроприводу.

Мета дослідження

Метою роботи є дослідження електропривода ротора вагоноперекидача з скалярним та векторним частотним керуванням, що дозволяє підвищити показники якості регулювання та енергозбереження.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процеси керування асинхронним електроприводом.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є асинхронний електропривод з скалярним та векторним частотним керуванням.

Задачі дослідження

1. Провести аналіз проблем керування, технічних характеристик, особливостей роботи асинхронного електроприводу ротора вагоноперекидача.
2. Запропонувати структуру системи керування і провести оптимізацію параметрів контурів регулювання електропривода.
3. Розробити математичні моделі асинхронного електропривода з скалярним та векторним частотним керуванням на базі запропонованої структури системи керування.
4. Провести аналіз динамічних властивостей електроприводу ротора вагоноперекидача.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНОГО НАПРЯМУ РОБОТИ

1.1 Структура та технологічні операції агломераційного виробництва

Агломераційне виробництво призначене для одержання офлюсованого агломерату з руди, концентрату, відходів металургійного виробництва руд, флюсів та палива. Після їх підготовки, спікання та сортування кондиційний агломерат відправляють у доменні цехи.

Для виробництва агломерату гірничозбагачувальні комбінати на агломераційну фабрику поставляють руди та концентрати з основними розмірами шматочків 6...8 мм, а для окатишів концентрати, подрібнені до 0,050...0,070 мм.



Рисунок 1.1 – Агломерат

Для отримання агломерату до складу фабрики входять підрозділи [12]:

- корпусів для розвантаження вагонів із сипучими матеріалами;
- складів для усереднення та зберігання матеріалів;
- корпусів для дроблення вапняку та подрібнення палива;
- корпусів для дозування компонентів шихти;
- корпусів для змішування та оздоблення агломераційної шихти;
- корпусів спікання, охолодження та сортування агломерату.

Зі складів шихтові матеріали стрічковими конвеєрами 1 і 2 (рисунок 1.2) до бункера 3 подають залізовмісну частину шихти (руд, концентрат, колошниковий

пил і повернення), паливо (дрібниця коксу та вугілля), флюси (вапняк і доломіт) та відходи металургійного виробництва (колошниковий пил, шлам, окалина та ін.). Перед подачею вапняк дроблять у молотковій дробарці, а коксик – у чотирьох-валковій.

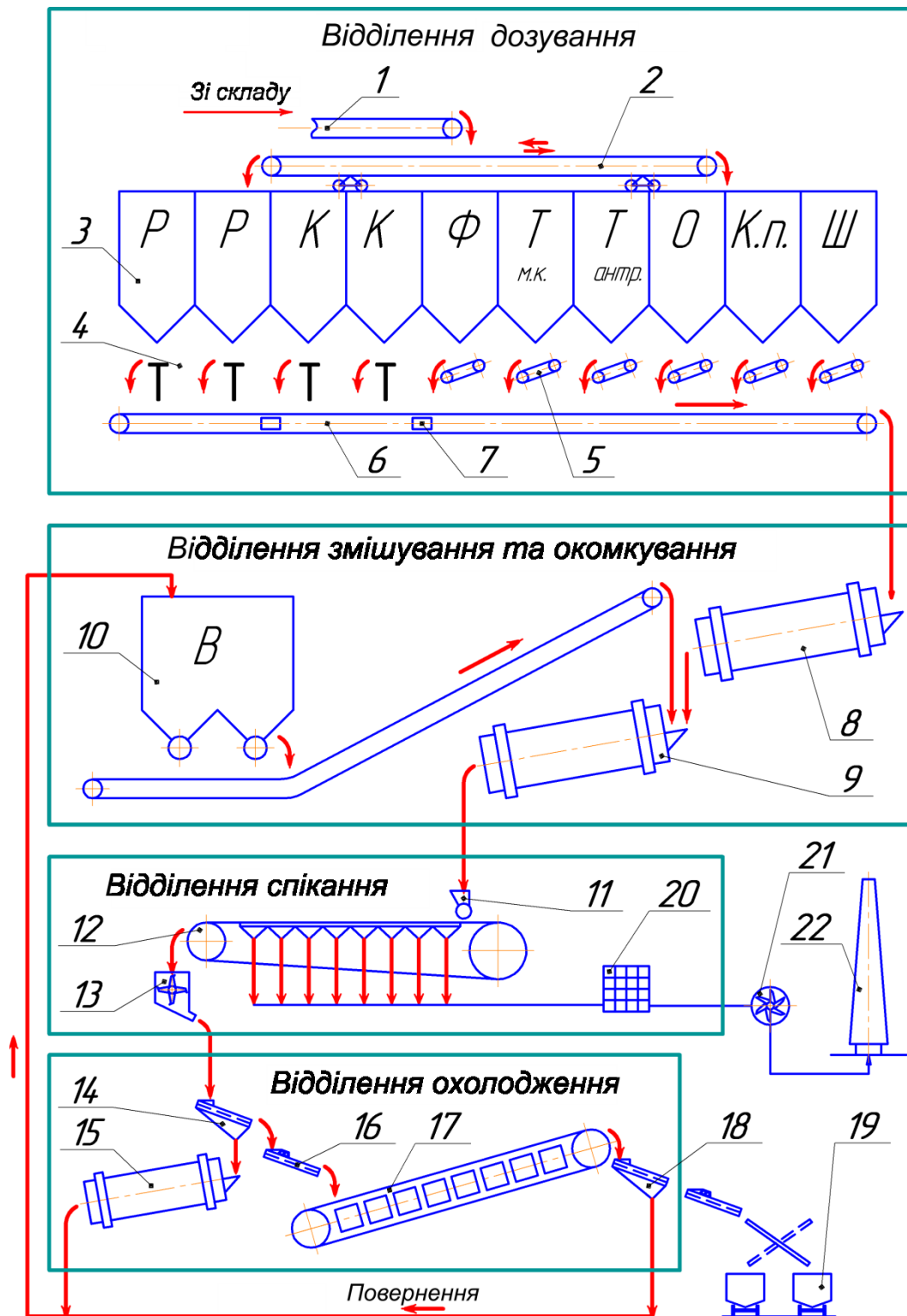


Рисунок 1.2 – Принципова схема виробництва агломерату

З бункерів шихтові матеріали у певних співвідношеннях, контрольованих вагами 7, видають живильниками 4 та стрічковими дозаторами 5 на збірний стрічковий конвеєр 6. Крім залізовмісних компонентів до складу шихти вводять флюси (15...20 %), паливо (4...6 %). Всі перераховані компоненти шихти подають барабанний змішувач 8, де їх зволожують (4...5 % води) і ретельно перемішують. Після перемішування з бункерів 10 в шихту додають дрібницю (менше 5,0 мм) агломерату (повернення) (20...30 %) і передають її для озброєння (одержання гранул) барабанний окомкователь 9. Підготовлена до спікання шихта човниковим розподільником, приймальною лійкою та барабанним живильником 11 укладається на стрічку агломераційної машини 12 шаром заввишки 350...450 мм. Шихта, що укладається на візки (стрічку), що безперервно рухаються, надходить під запальний горн, в якому факел пальників запалює коксик, що знаходиться в шихті. Горіння, що почалося у верхньому шарі, поступово поширюється вниз до колосникових грат візків. У шарі горіння розвивається температура 1300...1500 °С, яка призводить до утворення легкоплавких сполук (фаяліту, силікату та фериту кальцію та ін.). Рідка фаза, що містить ці сполуки, при затвердінні скріплює частинки шихти в твердий пористий матеріал – агломерат.

Для протікання процесу горіння кисень повітря ексаустером просмоктують через шар шихти в спікальному візку зверху-вниз. Ексаустер створює розрядження 10...14 кПа під робочою гілкою машини у вакуум-камерах, що забезпечує видалення в атмосферу через димову трубу 22 газоподібних продуктів згоряння, які проходячи через циклони-пиловловлювачі 20, очищаються від пилу та просипу шихти та агломерату.

На виході з агломащини агломерат у вигляді «пирога» піддається руйнуванню в одновалковій дробарці 13 і розсіву по фракціях на гуркоті 14. Дрібна фракція після охолодження в охолоджувачі 15 дрібниці агломерату (повернення) повертається в бункер 10 на повторно.

Велика фракція агломерату (більше 10 мм) має температуру у верхньому шарі 500...600 °С, а в нижній частині – 1200 °С. Тому агломерат піддається охолодженню в лінійних, кільцевих або чашеві охолоджувачах 17, розсіву на гуркоті холодного агломерату 18 і відправки його агловозах 19.

Для виробництва агломерату на склади (рисунок 1.3) агломераційної фабрики надходять:

- залізовмісні матеріали: руди (до 60 % Fe), концентрат (до 70 % Fe), шлами (доменні, сталеплавильні та агломераційні), окалина (до 78 % Fe), колошниковий пил, шлам (до 36 % Fe) з розмірами до 10 мм;
- флюси (вапняк < 22 мм і доломіт < 40 мм);
- паливо (дрібниця коксу та вугілля < 22 мм)

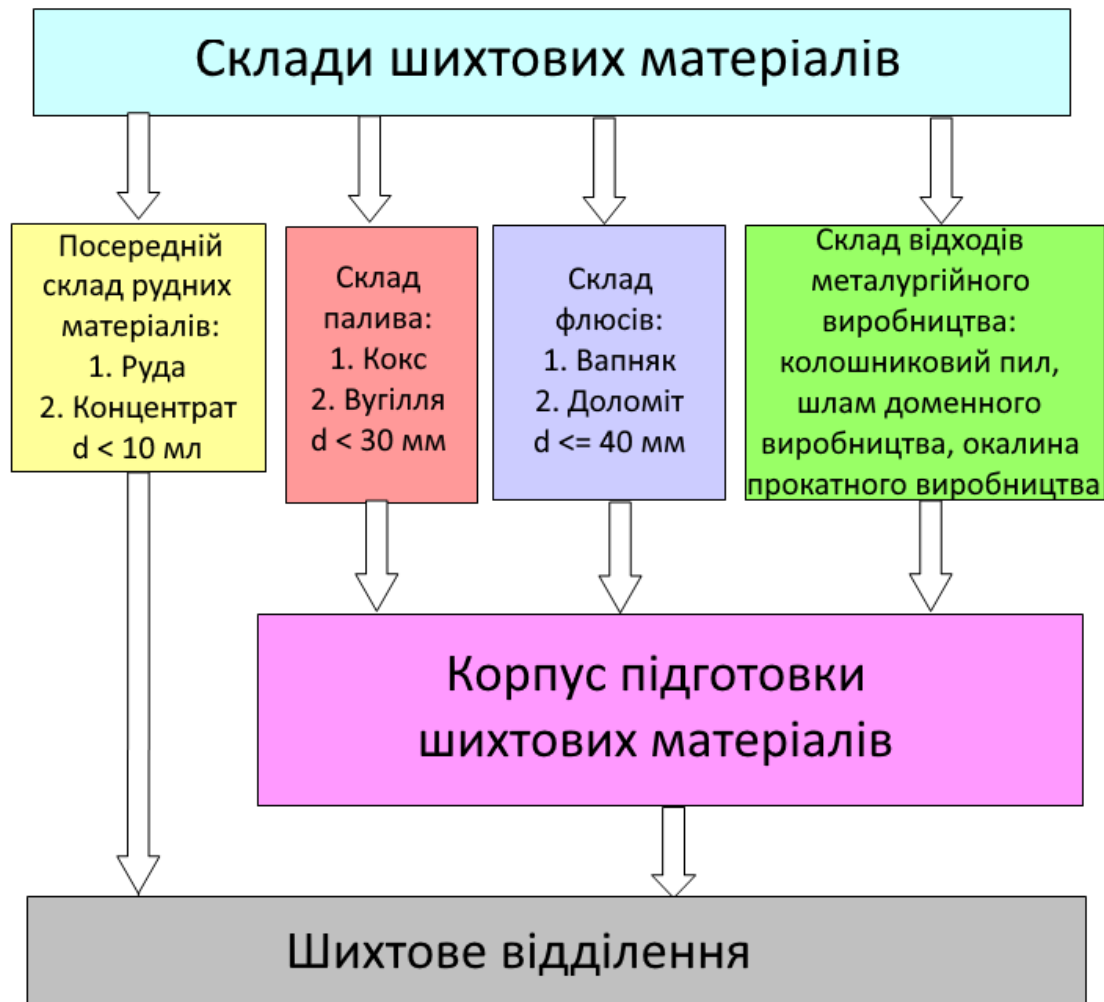


Рисунок 1.3 – Структура складів для шихтових матеріалів агломераційної фабрики

З них руди та концентрати подають на усереднювальні склади, виробляють укладання матеріалу штабель та його паркан зі штабеля з метою усереднення рудної частини шихти за гранулометричним складом. Решта компонентів подається свій склад для тимчасового зберігання.

1.2 Устаткування для розвантаження вагонів із сипучими матеріалами

На агломераційну фабрику шихтові матеріали надходять у відкритих напіввагонах вантажопідйомністю 63, 90 і 125 т. Розвантаження вагонів здійснюють у корпусі (рисунок 1.4), в якому, як правило, встановлюють два стаціонарні роторні перекидачі [3], що забезпечують розвантаження вагонів з виробництва агломерату до 7,0 млн. тонн на рік. Для захисту від атмосферних опадів вагоноперекидачі встановлюють у критій будівлі. У кожному прольоті корпусу для проведення монтажних та ремонтних робіт встановлені мостові крани. Подачу вагонів під розвантаження та їх видачу з вагоноперекидача здійснює візковий штовхач з електричним приводом. У разі надходження вагонів із замерзлими матеріалами їх відправляють у гаражі-розморожувачі.

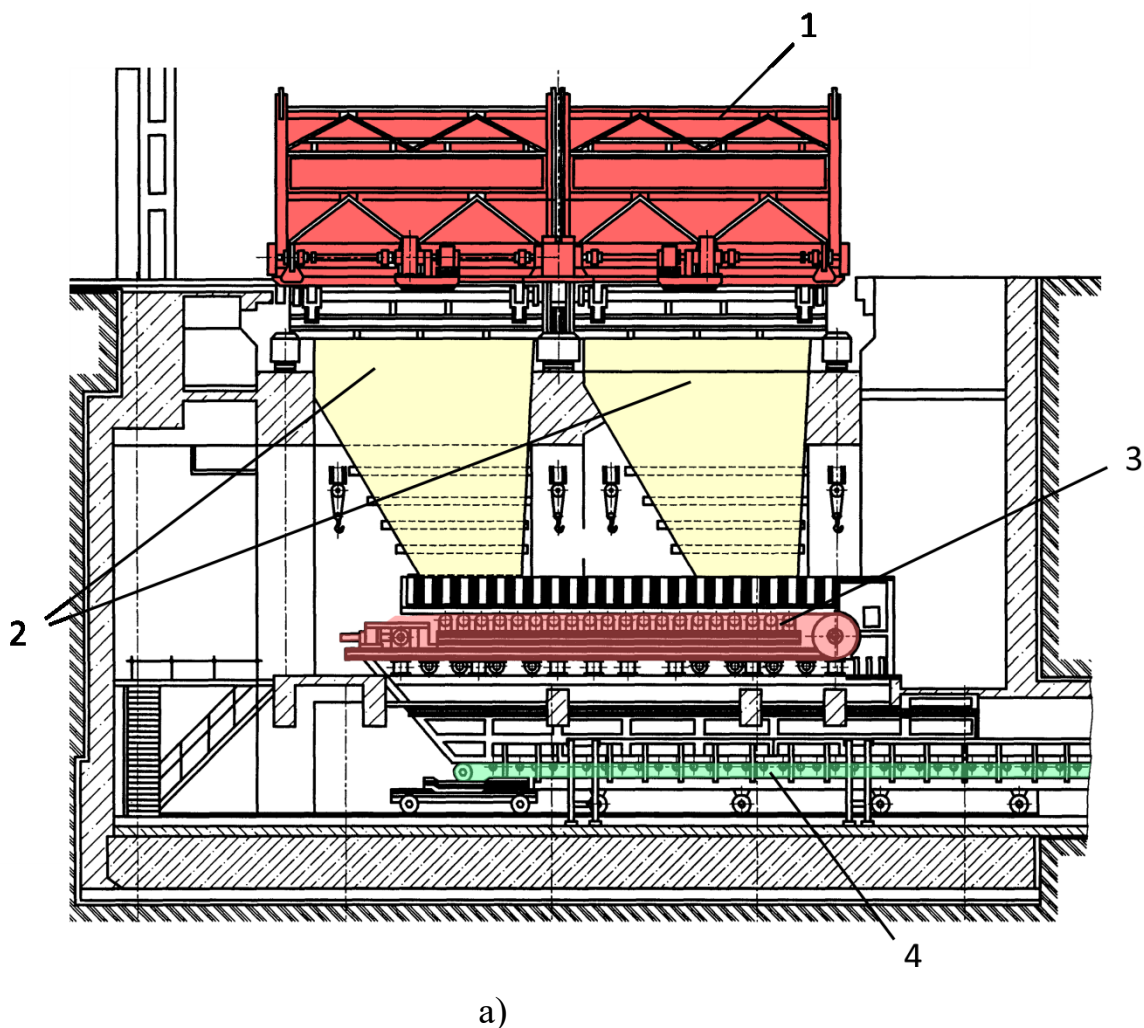
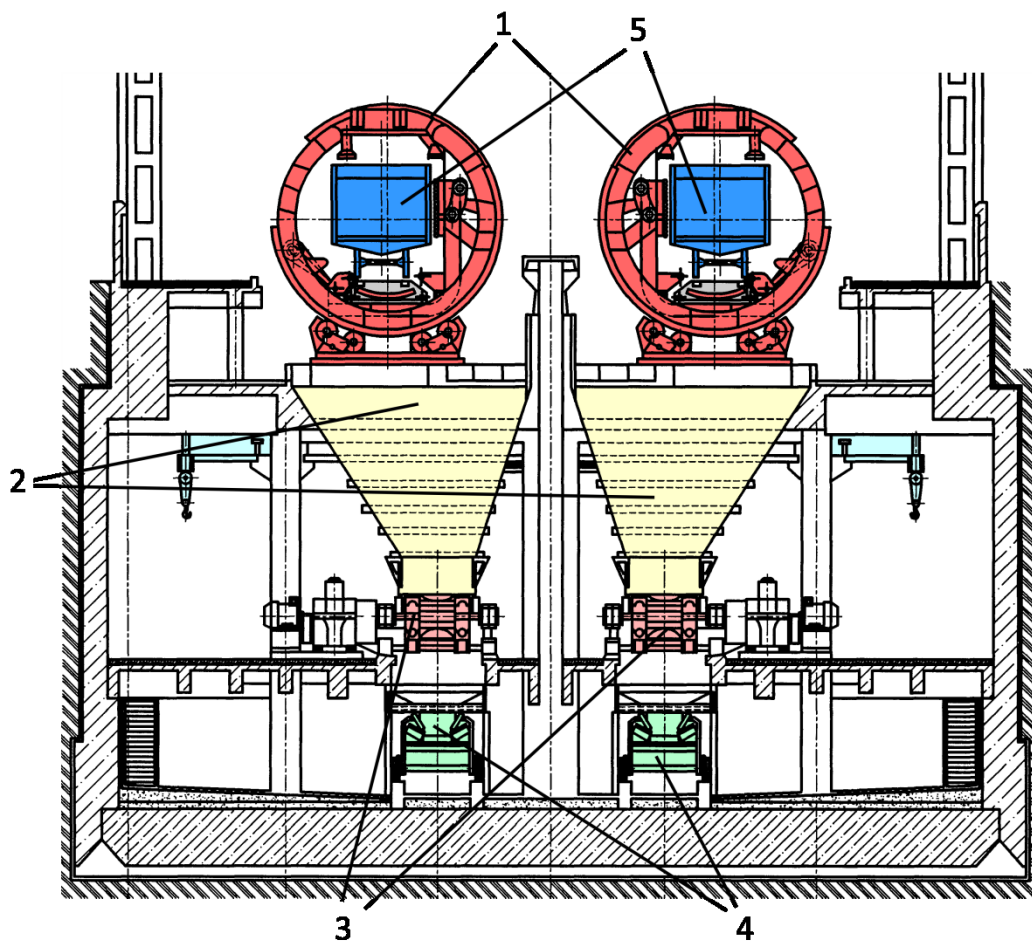


Рисунок 1.4 – Корпус для розвантаження вагонів з двома роторними вагоноперекидачами: а – повздовжній переріз; 1 – роторний вагоноперекидач; 2 – накопичувальні бункери; 3 – пластинчасті живильники; 4 – стрічкові конвеєри



б)

Продовження рисунку 1.4:

б – поперечний переріз; 5 – вагони з сипучими матеріалами

Після перекидання вагона матеріал надходить у два або три бункери, ємністю до 130 т кожен. Розвантаження несправних або нестандартних вагонів проводиться вручну в бункери, розташовані між вагоноперекидачами.

З бункерів матеріал пластинчастими живильниками подається на стрічкові конвеєри для транспортування до складу. Бункери, живильники та стрічкові конвеєри розташовуються нижче за рівень головки рейки залізничних колій на глибині 16...20 м. Для подачі вагона у вагоноперекидач застосовується штовхач, що представляє собою електровоз з дистанційним керуванням автозчіпкою, що зчіпляється з пересувним складом.

1.2.1 Вагоноперекидачі

На вітчизняних металургійних заводах використовуються вагоноперекидачі: пересувні та стаціонарні, баштові з бічним розвантаженням та роторні. Склади сучасних аглофабрик обладнуються в основному стаціонарними вагоноперекидачами роторного типу [3].

Стаціонарні вагоноперекидачі призначені для розвантаження вагонів вантажопідйомністю 63, 90 і 125 т. Розвантаження вагонів проводиться в бункери, розташовані нижче за рівень головки залізничних рейок.

Роторний вагоноперекидач (рисунок 1.5) складається з одного або двох роторів з люльками та однієї платформи.

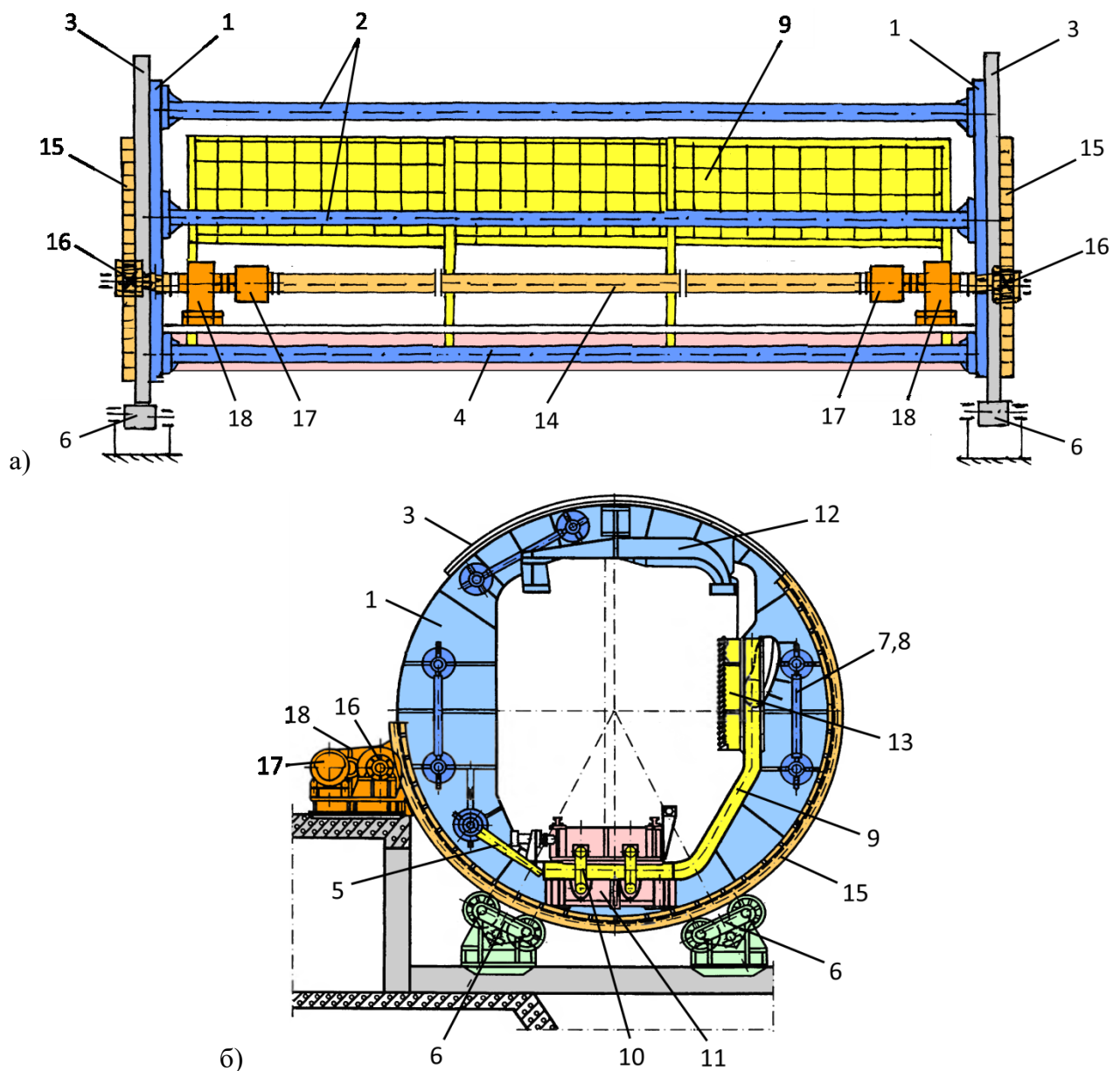


Рисунок 1.5 – Стаціонарний роторний вагоноперекидач:

а і б – поздовжній та поперечний розрізи

Ротор є металоконструкцією, що складається з двох дисків 1, з'єднаних між собою трубчастими балками 2. На дисках встановлені бандажі 3, що спираються на балансирні ролики 6. На нижніх поздовжніх балках ротора 4 встановлена L-подібна зварна люлька 9, горизонтальне плече якої за допомогою двох тяг 5 (по одній на кожному диску) з'єднене з опорами ротора. На вертикальному плечі люльки встановлені ролики 7, які можуть переміщатися в вирізах направляючих 8 дисків ротора. За допомогою шарнірного паралелограма 10 з люлькою з'єднана платформа 11 з рейками для встановлення вагонів, що розвантажуються.

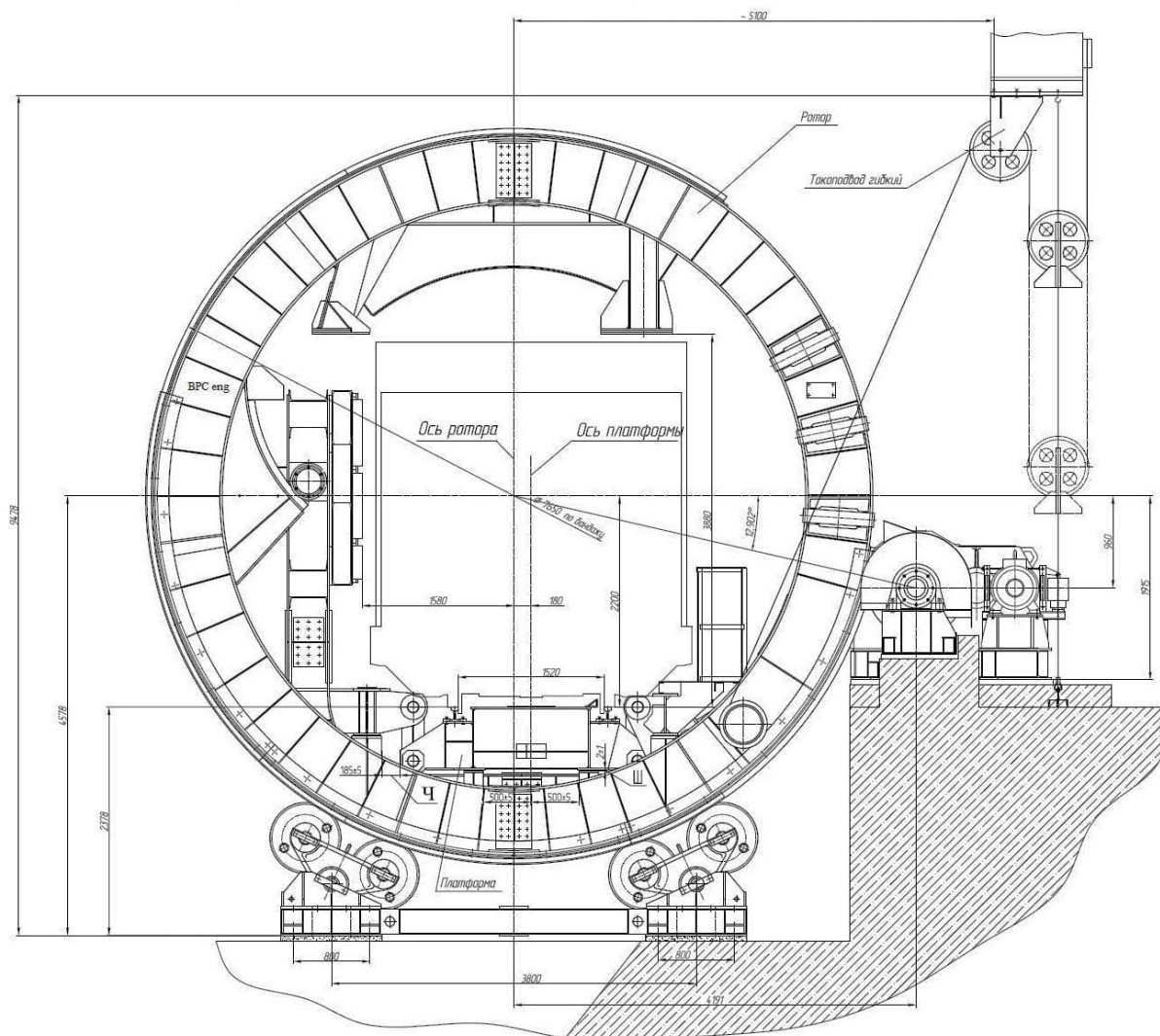
На верхніх поздовжніх балках є упори 12, куди при повороті ротора лягає вагон. На цих балках встановлені вібратори, призначені для очищення вагонів від залишків матеріалів у процесі їх розвантаження. При повороті ротора платформа, пов'язана паралелограмом з люльками, повертається разом із встановленим вагоном. Переміщення люльок відбувається до тих пір, поки вагон не ляже на привальну стінку 13, а потім верхні упори 12. Для повного розвантаження вагона ротор повертається на кут 175° .

Ротори вагоноперекидача обертаються двома приводами, з'єднаними між собою трансмісійним валом 14. На дисках ротора закріплені зубчасті сектори 15, що знаходяться в зачепленні з шестернями 16, що приводяться в обертання електродвигунами 17 через редуктори 18.

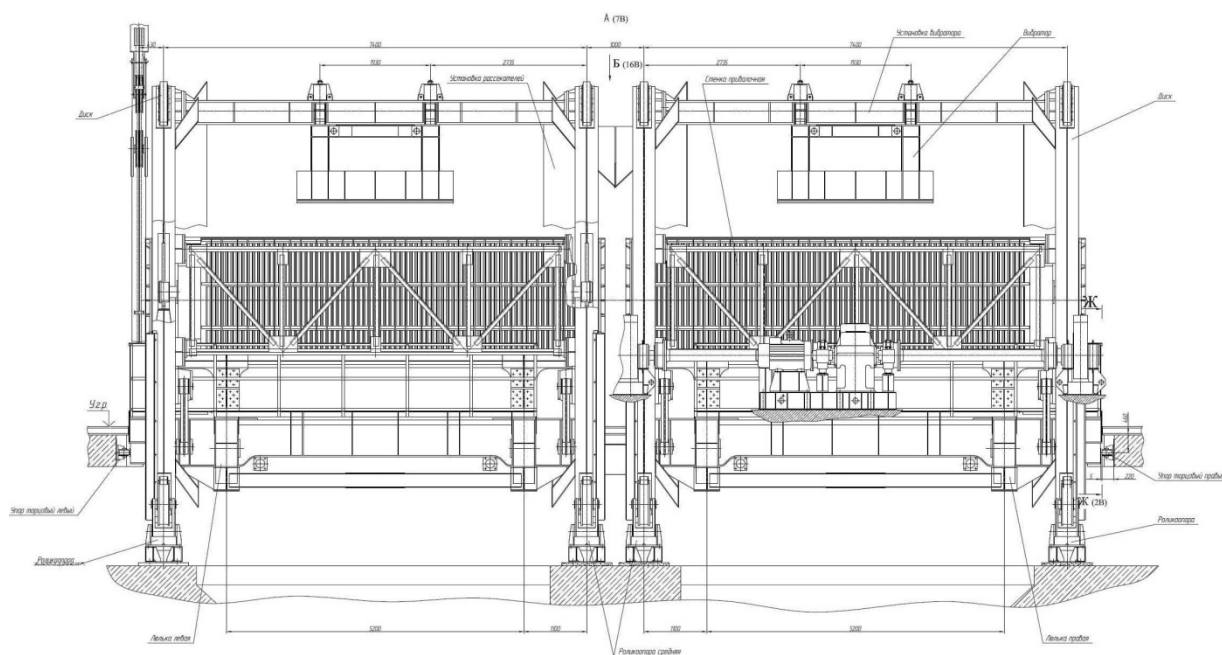
1.2.2 Технічні характеристики стаціонарного роторного вагоно-перекидача типу ВРС-75 (ВРС-120)

Креслення і геометричні розміри вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120) [3] для розвантаження вагонів вантажопідйомністю 63, 90 та 125 т наведені на рисунку 1.6.

Технічні характеристики вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120) наведені в таблиці 1.1.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Поперечний (а) і повздовжній (б) розрізи стаціонарного роторного вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120)

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики стаціонарного роторного вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120)

Параметр	Значення
Габаритні розміри вагоноперекидача, мм	Висота – 8748; ширина – 9634; довжина по платформі – 17020
Маса вагоноперекидача, т	186,5
Габарити напіввагонів, що розвантажуються, мм	Висота від головки рейки – 3274...3800; ширина – 3130...3220; довжина (по осях автозчепів) – 13920...16400.
Колія, мм	1520
Загальні показники	Кут повороту ротора, рад (градус) – 2,063...3,05 (170...175); час розвантаження напіввагонів (прямий та зворотний хід), с – 63...75; рід струму – змінний; напруга, В – 380
Привод повороту ротора	Електродвигун – тип 5АМ315S10У2-0000; потужність, кВт – 55; частота обертання, с^{-1} (об/хв) – 9,83 (590); кількість, шт. – 2
Редуктор	Тип – ЦДН-630-50-33-Т2; передавальне число – 50; кількість, шт. – 2
Гальмо	Тип – ТКГ-400; максимальний гальмівний момент, Н·м – 1200; штовхач – ТЕ-80; кількість, шт. – 4.
Відкрита передача	Тип – циліндрична, прямозуба; модуль, мм – 32; передавальне число: – 8,066; загальне передавальне число – 403,3.
Вібратор	Тип – ІВ-11-50; рід струму – змінний; напруга живлення, В – 380; збурювальна сила, кН – 5,6...11,3; потужність, кВт – 0,98; кількість, шт. – 8.
Гальмівний пристрій	Тип приводу – ПВМ600х250-І; тягове зусилля на штоці, кГс – 600; швидкість руху штока, мм/с – 77...10; напруга, В – 380; потужність, кВт – 1,4; кількість, шт. – 1
Віброочистка	Тип вібратора – ІВ-11-50; потужність, кВт – 0,98; напруга живлення, В – 380; частота живлення, Гц – 50; кількість, шт. – 16.
Абсолютний енкодер (контроль кута повороту ротора)	Тип А125-1213-1С-6-2-Е; кількість, шт. – 1.

1.2.3 Тахограма роботи роторного вагоноперекидача

Призначені для розвантаження напіввагони подаються до вагоноперекидача і по одному встановлюються на його платформі. Для фіксації напіввагонів у заданому положенні передбачено гальмівний пристрій.

Після встановлення та фіксації піввагону в роторі вагоноперекидача подається команда на його розвантаження.

У початковий період (рисунок 1.7) ротор обертається в уповільненому режимі для плавної бічної привалки напіввагону до стіни привалки. Привалка здійснюється під дією своєї маси платформи з напіввагоном і пружинних буферів у роторі, що обертає.

Бічна привалка закінчується при повороті ротора на кут $5,1 \dots 8,3^\circ$ в момент часу t_1 залежно від параметрів напіввагону, що розвантажуються.

При повороті ротора на кут 9° включаються приводи опускання гаків. Гаки опускаються на верхню обв'язку напіввагону. При досягненні гаками верхньої обв'язки напіввагона ланцюг слабшає, важіль гака, опускаючись, входить у зону дії кінцевого вимикача індукційного типу та відключає привод гаків, штанга гака затиснута колодками важільно-кліщового захвату. Під час досягнення кута повороту 20° ротор прискорюється до номінального значення швидкості обертання.

При повороті ротора на кут 90° привалкова стінка з напіввагоном, переміщаючись, тягне за собою гаки, які фіксуються на штанзі за допомогою важеля кліщового захоплення і утримують напіввагон. Платформа при цьому рухається за напіввагоном, виключаючи відрив колісних пар від головок рейок.

При повороті ротора на кут 165° його обертання сповільнюється для плавної зупинки (момент часу t_2).

При досягненні кута повороту ротора 170° інкрементний датчик імпульсів відключає привод обертання ротора і ротор зупиняється (момент часу t_3).

У разі продовження обертання ротора на рамі приводу обертання встановлений кінцевий вимикач для аварійної зупинки ротора в перекинутому та вихідному положеннях.

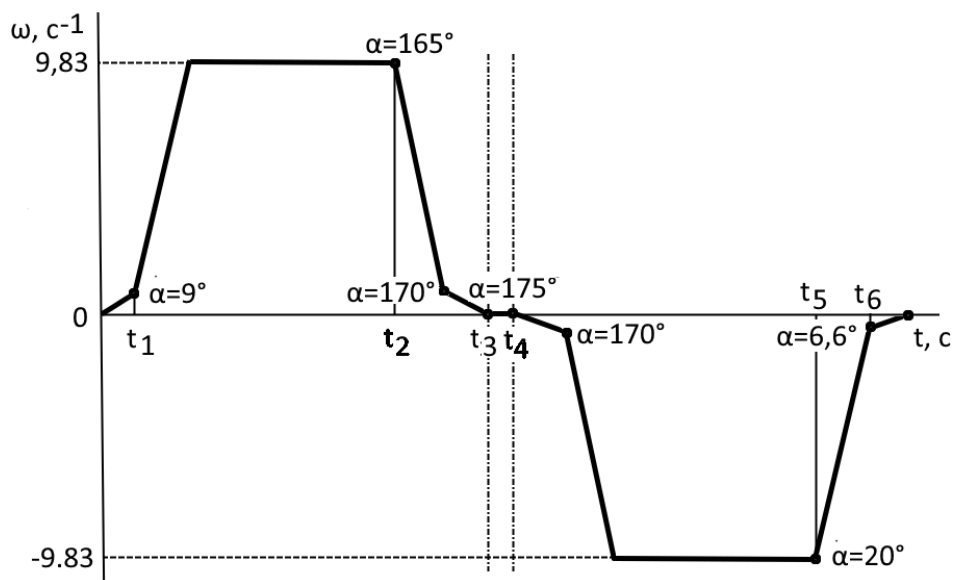


Рисунок 1.7 – Тахограма ротора вагоноперекидача

Після витримки 3...5 с в перекинутому стані, при необхідності, включаються вібратори (режим роботи вібратора визначає оператор) для повного очищення напіввагону. Напіввагон розвантажений.

Електродвигуни обертання ротора включаються на зворотний хід у момент часу t_4 . Ротор плавно розганяється до номінальної швидкості обертання.

При досягненні ротором кута 20° від вихідного положення у момент часу t_5 , його обертання сповільнюється, включаються електродвигуни підйому гаків і через вантажний пластинчастий ланцюг діють на важелі захоплення гаків. Важелі впливають на серезки захоплення і відводять затискні колодки від штанги, звільняючи її від захоплення. Гаки піднімаються у вихідне положення. Електродвигуни підйому гаків відключаються. Досягнувши кута повороту ротора $6,6^\circ$ від вихідного положення, бічний ролик платформи підходить до фундаменту і платформа з напіввагоном встановлюється у вихідне положення (момент часу t_6).

Після повернення ротора у вихідне положення порожній напіввагон виштовхується з вагоноперекидача наступним навантаженим напіввагоном, який встановлюється на його місце і робочий цикл повторюється.

1.2.3 Кінематична схема роторного вагоноперекидача

Кінематична схема стаціонарного роторного вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120) наведена на рисунку 1.7.

Ротор вагоноперекидача обертається двома приводами, з'єднаними між собою трансмісійним валом 5. На дисках ротора закріплені зубчасті сектори 4, що знаходяться в зачепленні з шестернями 3, що приводяться в обертання електродвигунами 1 через редуктори 2 і відкриті шестерні 3. Ротор при обертанні підтримується чотирма парами котків.

Для фіксації положення ротора при зупинках використовують електромеханічні гальма 6. На рисунку не показаний окремий гальмівний пристрій, призначений для зменшення вибігу при підходах до крайніх положень масивного ротора з вагоном.

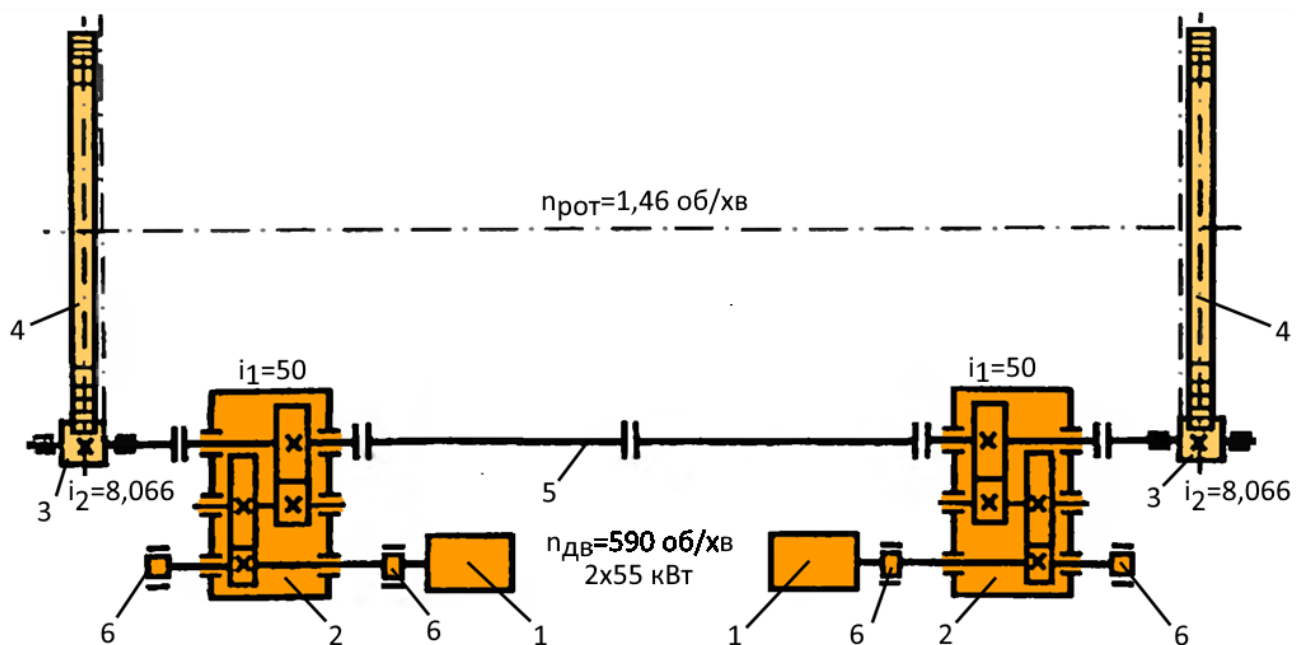


Рисунок 1.7 – Кінематична схема приводу стаціонарного роторного вагоноперекидача

1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – шестерня; 4 – зубчастий сектор;

5 – трансмісійний вал; 6 – гальма

1.3 Розрахунок потужності електроприводу роторного вагоноперекидача ВРС-75 (ВРС-120)

1.3.1 Визначення моменту опору при кантуванні ротора

Статичний момент опору обертанню ротора дорівнює сумі статичного моменту M_1 , створюваного силами ваги матеріалу, вагона та ротора і моменту M_2 , що створюється силами тертя в опорних котках роторного вагоноперекидача [13]

$$M = M_1 + M_2. \quad (1.1)$$

а) Підйом вагона з сипучим матеріалом.

Статичний момент M_1 , створюваний силами ваги матеріалу, вагона та ротора

$$M_1 = Q \cdot h, \quad (1.2)$$

де Q – вага матеріалу, вагона та ротора, Н;

$$Q = Q_M + Q_{\text{в}} + Q_p = 780000 + 225000 + 300000 = 1440000 \text{ Н};$$

Q_M – вага матеріалу у вагоні, $Q_M = 780000 \text{ Н}$ (80 т);

$Q_{\text{в}}$ – вага вагона, $Q_{\text{в}} = 225000 \text{ Н}$ (23 т);

Q_p – вага ротора, $Q_p = 300000 \text{ Н}$ (30 т);

h – плече сили ваги Q щодо осі обертання ротора, м (рисунок 1.8) [1]. Як видно з графіка, величина плеча залежить від кута поворота ротора $h = f(\alpha)$, тобто точка прикладення сили Q змінюється нелінійно при повороті ротора на кут α при висипанні сипучого матеріалу з вагону. Максимальна величина плеча $h_{\text{max}} = 255 \text{ мм}$ відповідає куту повороту ротора $\alpha = 70^\circ$. Залежність куа поворота ротора у часі наведена на рисунку 1.9.

Максимальний статичний момент M_1 дорівнює

$$M_1 = Q \cdot h_{\text{max}} = 1440000 \cdot 0,225 = 324000 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

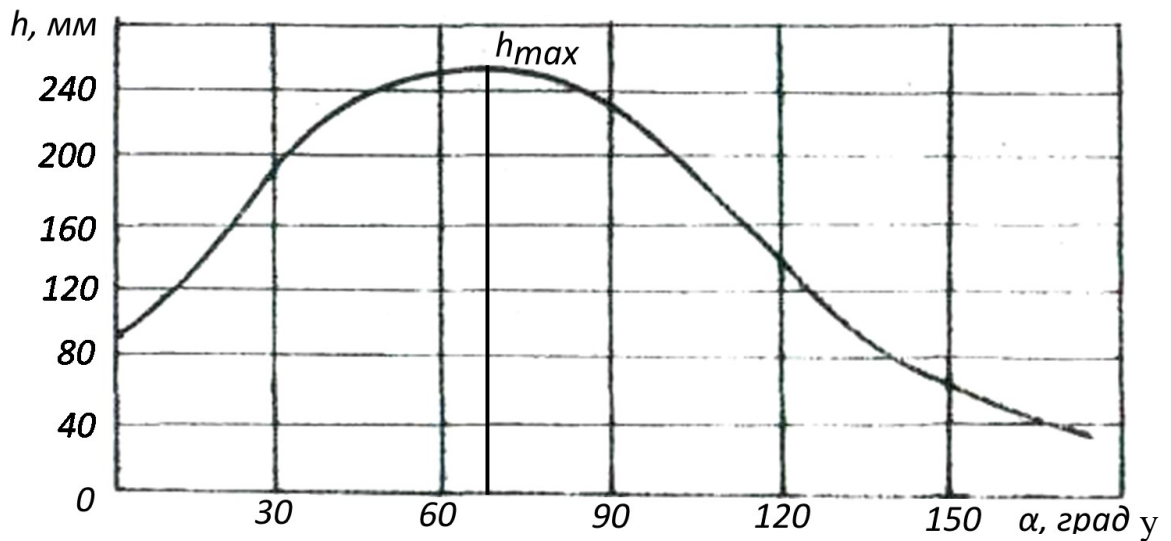


Рисунок 1.8 – Графік зміни величини плеча h залежно від кута повороту ротора α

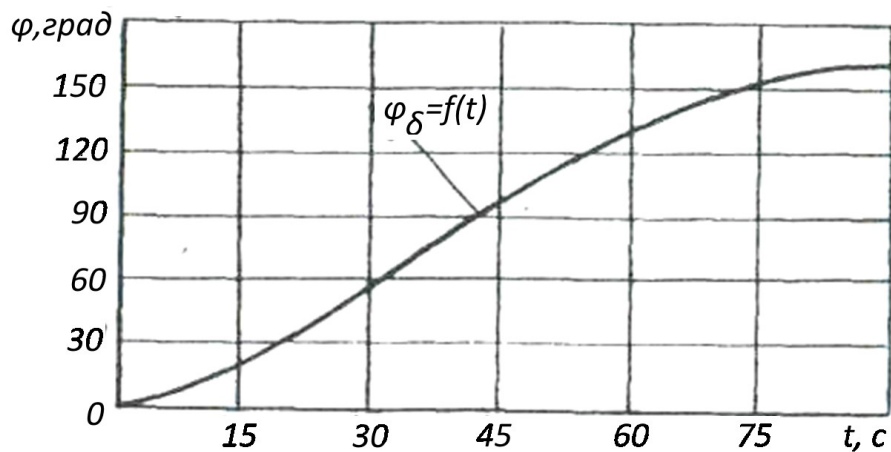


Рисунок 1.9 – Залежність кута повороту ротора ваганоперекидача від часу

Момент M_2 , що створюється силами тертя в опорних катках роторного ваганоперекидача, у загальному випадку може бути розрахований за виразом [2]

$$M_2 = \sum A \cdot f_{np} \cdot R; \quad (1.3)$$

де $\sum A$ – арифметична сума реакцій опор;

f_{np} – коефіцієнт питомого опору пересування бандажа ротора по катках, значення якого складно розрахувати при відсутності аналітичних виразів для конкретного устаткування;

R – радіус ротора.

У роботі [13] для визначення моменту тертя M_2 для роторного вагоноперекидача наведено наступну формулу:

$$M_2 = \sum A \cdot \frac{\mu \cdot d + 2 \cdot K}{D} \cdot \beta \cdot R, \quad (1.4)$$

де μ – коефіцієнт тертя ковзання у підшипниках опорних котків, $\mu = 0,15$;
 d – діаметр цапфи котка (з рисунку 1.6), $d = 300$ мм;
 K – коефіцієнт тертя при коченні, $K = 0,005 \dots 0,1$;
 β – коефіцієнт, що враховує бічне тертя (тертя у ребордах), $\beta = 1,8 \dots 2,5$;
 D – діаметр опорного ролика (з рисунку 1.6), $D = 750$ мм;
 R – радіус ротора, $R = 3904$ мм;

$\sum A$ – арифметична сума реакцій, яка визначається з умови, що тиск ротора на опорні катки розподіляється рівномірно, оскільки вони розташовані на балансирах (впливом зусиль у канатах механізму перекидання через відносну їх малість порівняно з вагою ротора і вагона при розрахунку опорних реакцій ковзаник нехтують).

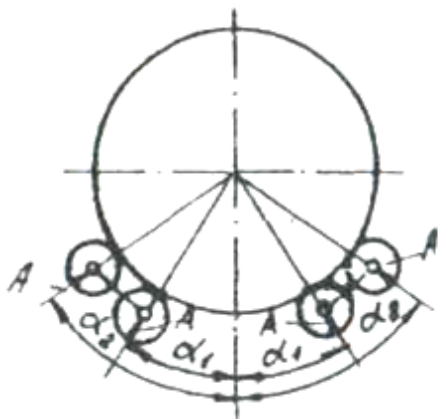


Рисунок 1.10 – Схема до визначення моменту, що створюється силами тертя в опорних котках роторного вагоноперекидача

Реакцію A з боку опорного ролика (рисунок 1.10) визначають за такою формулою:

$$A = \frac{Q}{4 \cdot (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)}. \quad (1.5)$$

Тоді реакція для всіх 8 опорних роликів дорівнює

$$\sum A = 8 \cdot A = \frac{2 \cdot Q}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}. \quad (1.6)$$

В нашому випадку опорні катки розташовані під кутами $\alpha_1 = 25^\circ$; $\alpha_2 = 40^\circ$.

$$\sum A = \frac{2 \cdot Q}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2} = \frac{2 \cdot 1440000}{\cos 25^\circ + \cos 40^\circ} = \frac{2880000}{0,9063 + 0,7660} = 1722179 \text{ Н.}$$

Розрахункове значення моменту M_2 , що створюється силами тертя в опорних катках:

$$M_2 = \sum A \cdot \frac{\mu \cdot d + 2 \cdot K}{D} \cdot \beta \cdot R = 1722179 \cdot \frac{0,15 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,055}{0,75} \cdot 1,8 \cdot 3,904 = 2260000 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Статичний момент опору обертанню ротора при підйомі вагона

$$M = M_1 + M_2 = 324000 + 2260000 = 2584730 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (1.7)$$

б) Опускання порожнього вагону.

Розрахунки моментів опору при поверненні порожнього вагону за виразами (1.2) і (1.3) при $Q_M = 0$ дали наступні результати $M_1 = 126000 \text{ Нм}$, $M_2 = 972649 \text{ Нм}$.

Статичний момент опору обертанню ротора при опусканні вагона

$$M = M_1 + M_2 = 126000 + 972649 = 1098649 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

1.3.2 Розрахунок потужності електропривода

Визначаємо необхідну максимальну потужність приводу вагоноперекидача при підйомі вагона за значенням кутової швидкості та статичним моментом опору обертанню:

$$N_{\text{дв}} = \frac{M \cdot \omega}{i \cdot \eta}, \quad (1.8)$$

де M – момент опору ротора, Н·м;

ω – кутова швидкість обертання ротора, $\omega = 9,83 \text{ с}^{-1}$;

i – загальне передатне число від двигуна до зубчатого сектора, $i = 403,3$.

η – коефіцієнт корисної дії привода, $\eta = 0,6$.

$$N_{\partial\partial} = \frac{M \cdot \omega}{i \cdot \eta} = \frac{2584730 \cdot 9,83}{403,3 \cdot 0,6} = 105 \text{ кВт.} \quad (1.9)$$

Виходячи з конструкції ваганоперекидача (рисунок 1.7), для попередження перекосів ротора використовуємо два з'єднаних механічно електропривода по 55 кВт сумарною потужністю 110 кВт, що працюють на загальний приводний вал.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ВАГОНОПЕРЕКИДАЧА

2.1 Вибір потужності та типу електродвигуна

Номінальна потужність електроприводу ротора вагоноперекидача повинна дорівнювати або перевищувати потужність опору на валу ротора у всіх можливих технічних режимах роботи [2]. Як видно з рисунку 1.8, електропривод повинен розвивати максимальну потужність на валу $N_{\text{дв}\Sigma} \geq 110$ кВт при куті повороту ротора $\alpha = 70^\circ$.

Оскільки в конструкції вагоноперекидача передбачена передача обертового моменту електропривода одночасно до правого і лівого відкритих зубчастих секторів ротора через приводні шестерні, з'єднані між собою і приводом трансмісійним валом для вирівнювання швидкостей обертання ротора, то використовуємо два однакових комплекти електроприводів половинної потужності, вихідні вали яких з'єднані механічно.

В якості приводних електродвигунів обираємо найближчі більші за потужністю асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором типу 5АМ315S10БУ2 [4, 6] потужністю по $N_{\text{дв}} = 55$ кВт, які при роботі на загальний вал розвивають сумарну потужність $N_{\text{дв}\Sigma} = 110$ кВт.

Загальний вигляд електродвигуна 5АМ315S10БУ2 наведено на рисунку 2.1, технічні характеристики двигуна наведені в таблиці 2.1.

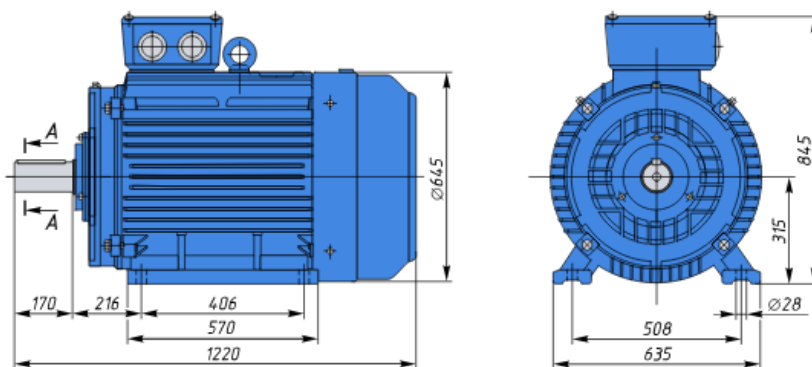


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд та габаритно-приєднувальні розміри асинхронного електродвигуна 5АМ315S10БУ2 виконання ІМ1081(В3)

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики електродвигуна 5AM315S10BY2

n_0 , об/хв	U_{1H} , В	$P_{дв.н.}$, кВт	При номінальному навантаженні				$J_{дв.н.}$, кг·м ²
			I_H 380 В, А	M_H , Н·м	$\cos\varphi_H$	η_H , %	
590	380/660	55	109	890	0,82	93,5	5,97

Продовження таблиці 2.1

$m_n = \frac{M_{пуск}}{M_H}$	$m_k = \frac{M_{макс}}{M_H}$	$k_{i.дв} = \frac{I_{пуск}}{I_H}$	Вага, кг	Ступінь захисту
1,6	2,2	6,5	885	IP 55

2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД

Математичне моделювання асинхронних двигунів вимагає визначення параметрів їхніх схем заміщення. Разом з різними експериментальними методами параметри схеми заміщення двигуна можуть бути розраховані опосередковано на основі довідкових даних. Однофазна Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна показана на рисунку 2.1.

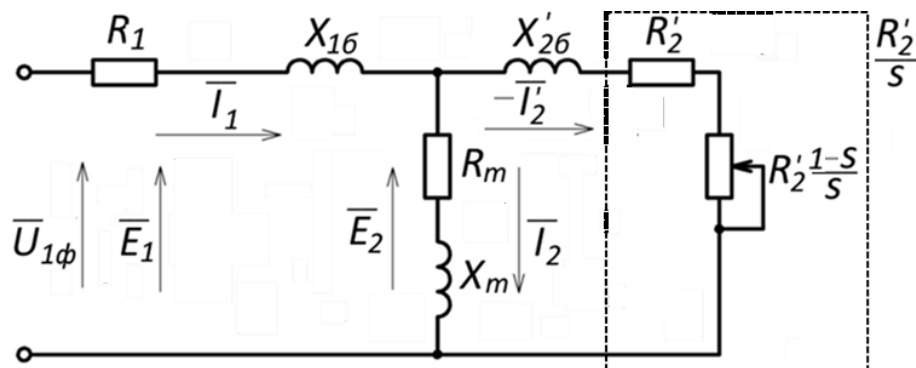


Рисунок 2.1 – Однофазна схема заміщення асинхронного двигуна

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають прийнятій схемі заміщення [7]:

$$\begin{cases} \bar{U}_{1\phi} = -\bar{E}_m + \bar{I}_1 \cdot (j \cdot X_{1\sigma} + R_1), \\ \bar{E}_m - \bar{I}_2' \cdot j \cdot X_{2\sigma}' - \bar{I}_2' \cdot R' - \bar{I}_2' \cdot R' \cdot \frac{1-s}{s} = 0, \\ \bar{I}_2 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2'. \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\bar{U}_{1\phi}$ – вектор фазної напруги;

$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_2'$ – вектори струмів статора, магнітного ланцюга та струму ротора, приведенного до струму статора;

$\bar{E}_m$ – вектор ЕРС магнітного ланцюга;

R_1, R_2' – активні опори статора і ротора, приведенного до статора;

$X_{1\sigma}, X_{2\sigma}'$ – реактивні опори статора і ротора, приведенного до статора;

s – ковзання ротора двигуна.

На рисунку 2. 2 показані векторні діаграми для струму, ЕРС і напруги, що відповідають наведеним вище рівнянням (2.1).

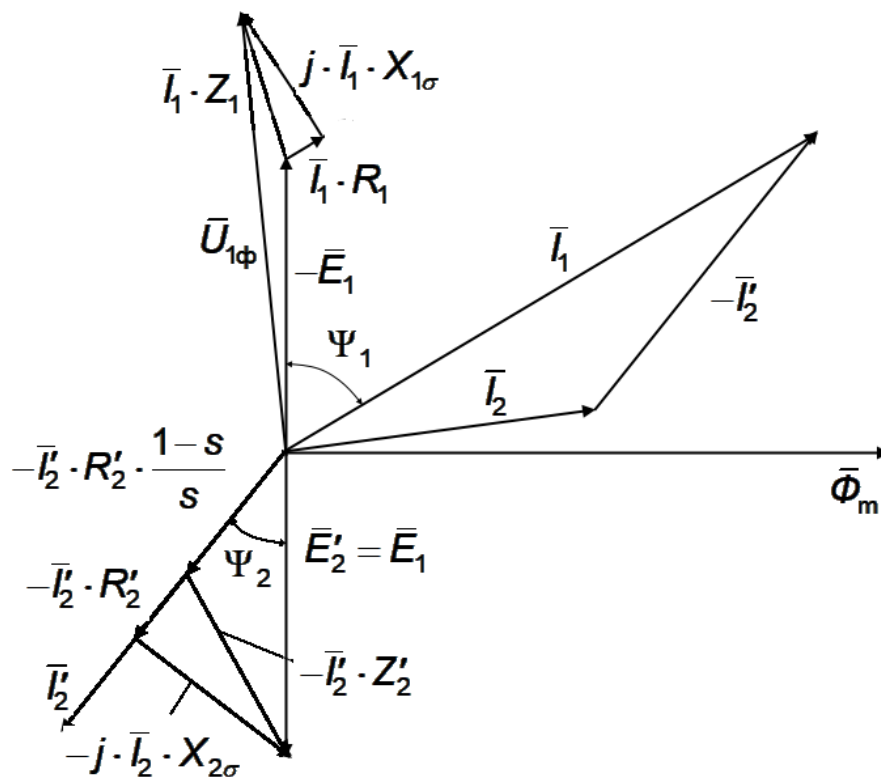


Рисунок 2.2 – Векторна діаграма асинхронної машини з короткозамкненим ротором

За каталожними даними двигуна [4] визначаємо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна.

Синхронна кутова частота обертання поля статора двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 600}{30} = 62,83 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальна кутова швидкість обертання ротора двигуна:

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 590}{30} = 61,78 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальне ковзання

$$s_{\text{н}} = 1 - \frac{f_{\text{н}}}{f_0} = 1 - \frac{590}{600} = 0,0167.$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{55000}{61,785} = 890,19 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номінальна фазна напруга і номінальний фазний та лінійний струми статора

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219,39 \text{ В}$$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{55000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,82 \cdot 0,935} = 108,99 \text{ А}.$$

Струм фази статора при частковому навантаженні

$$I_{1p'} = \frac{p' \cdot P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{p'} \cdot \eta_{p'}} = \frac{0,75 \cdot 55000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,812 \cdot 0,86} = 89,77 \text{ А}$$

де $\eta_{p'} = 0,812$ – ККД при частковому навантаженні;

$\cos \varphi_{p'} = 0,86$ – коефіцієнт потужності при частковому навантаженні;

$p' = P/P_{\text{н}} = 0,75$ – коефіцієнт завантаження двигуна;

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{p'}$ для при частковому навантаженні $p' = 0,75$ значно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, і значення $\frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi}$ залежить від потужності двигуна і відповідає

залежностям, показаним на рисунку 2.3 для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю.

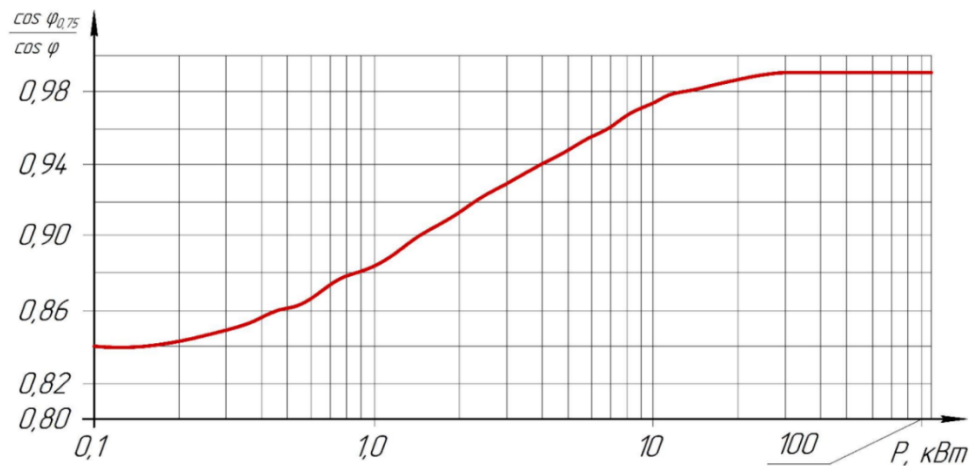


Рисунок 2.3 – Залежність $\frac{\cos \varphi_{0.75}}{\cos \varphi_H}$ від потужності асинхронного двигуна

Визначимо критичне ковзання

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0.0167 \cdot \frac{2.2 + \sqrt{2.2^2 - (1 - 2 \cdot 0.0167 \cdot 1.5 \cdot (2.2 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0.0167 \cdot 1.5 \cdot (2.2 - 1)} = 0.0740$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p'}^2 - (I_{1\phi H} \cdot p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{89.77^2 - (108.99 \cdot 0.75 \cdot (1 - 0.0167) / (1 - 0.75 \cdot 0.0167))^2}{1 - (0.75 \cdot (1 - 0.0167) / (1 - 0.75 \cdot 0.0167))^2}} = 56.92 \text{ A}.$$

Активний опір обмотки ротора R'_2 , приведений до обмотки статора.

Проміжний коефіцієнт:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\phi H}} = 1 + \frac{56,92}{2 \cdot 6,5 \cdot 108,99} = 1,04,$$

$$R'_2 = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot k_{\max} \cdot P_H \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_K}\right)} =$$
$$= \frac{3 \cdot 219,39 \cdot (1 - 0,0167)}{2 \cdot 2,2 \cdot 55000 \cdot 1,040^2 \cdot (1,5 + 1/0,0740)} = 0,0361 \text{ Ом}$$

Активний опір статора в номінальному режимі

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot C_1 = 0,0361 \cdot 1,5 \cdot 1,04 = 0,0564 \text{ Ом}$$

Параметр γ для визначення індуктивного опору короткого замикання в номінальному режимі:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{1/0,0740^2 - 1,5^2} = 13,426$$

Опір короткого замикання:

$$X_{KH} = R'_2 \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,03613 \cdot 13,426 \cdot 1,040 = 0,5046 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання роторної обмотки, приведений до статорної:

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,5046}{1,0096} = 0,28135 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 0,5046 = 0,2119 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання обмотки статора:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,2119}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,000675 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, наведений до обмотки статора, в номінальному режимі

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{KH}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,5046}{1,040} = 0,28135 \text{ Ом}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, наведена до статорної:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,28135}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,000895 \text{ Гн}$$

Електрорушійна сила гілки намагнічування, індукована потоком повітряного зазору в обмотках статора під час номінальної роботи:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\Phi H} \cdot \cos\varphi - R_1 \cdot I_{1\Phi H})^2 + (U_{1\Phi H} \cdot \sin\varphi - X_{1\sigma} \cdot I_{1\Phi H})^2} = \\ &= \sqrt{(219,39 \cdot 0,82 - 108,99 \cdot 0,05637)^2 + (219,39 \cdot 0,5724 - 108,99 \cdot 0,21192)^2} = \\ &= 201,72 \text{ В} \end{aligned}$$

Індуктивний опір намагнічування

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{201,72}{56,92} = 3,5438 \text{ Ом}$$

Результуюча індуктивність гілки намагнічування

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{3,5438}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,01128 \text{ Гн}$$

Значення номінального потокозчеплення

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_M = \sqrt{2} \cdot 56,92 \cdot 0,01128 = 0,9081.$$

Еквівалентна індуктивність обмотки статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_\mu = 0,000674 + 0,011280 = 0,01196 \text{ Гн}$$

Еквівалентна індуктивність обмотки ротора

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_\mu = 0,000896 + 0,011280 = 0,01218 \text{ Гн}$$

Коефіцієнт розсіювання

$$\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_1 + L'_2} = 1 - \frac{0,01128^2}{0,01195 + 0,01218} = 0,9947.$$

Розрахункові параметри схеми заміщення двигуна наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_r , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	X_μ , Ом	L_μ , Гн
0,056373	0,21192	0,000675	3,543849	0,01128
R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, Гн	X_{KH} , Ом	η
0,03613	0,28135	0,000896	0,50458	0,935

2.4 Вибір перетворювача частоти

Перетворювач частоти для асинхронного приводу перетворює змінну напругу електричної мережі в трифазну змінну напругу заданої частоти. У більшості випадків перетворювачі частоти в даний час засновані на повністю керованих силових напівпровідникових вентиляторів, таких як силові транзистори і тиристори, що замикаються.

Типова функціональна схема сучасного електроприводу змінного струму на базі перетворювача частоти з ланкою постійного струму показана на рисунку 2.6. З рисунка видно, що основою асинхронного електроприводу є перетворювач частоти, який об'єднує в собі перетворювач, і мікропроцесорний контролер, відповідно до класичного визначенням електроприводу. Через це перетворювач частоти часто називають електроприводом, що звичайно є застарілим терміном [5].

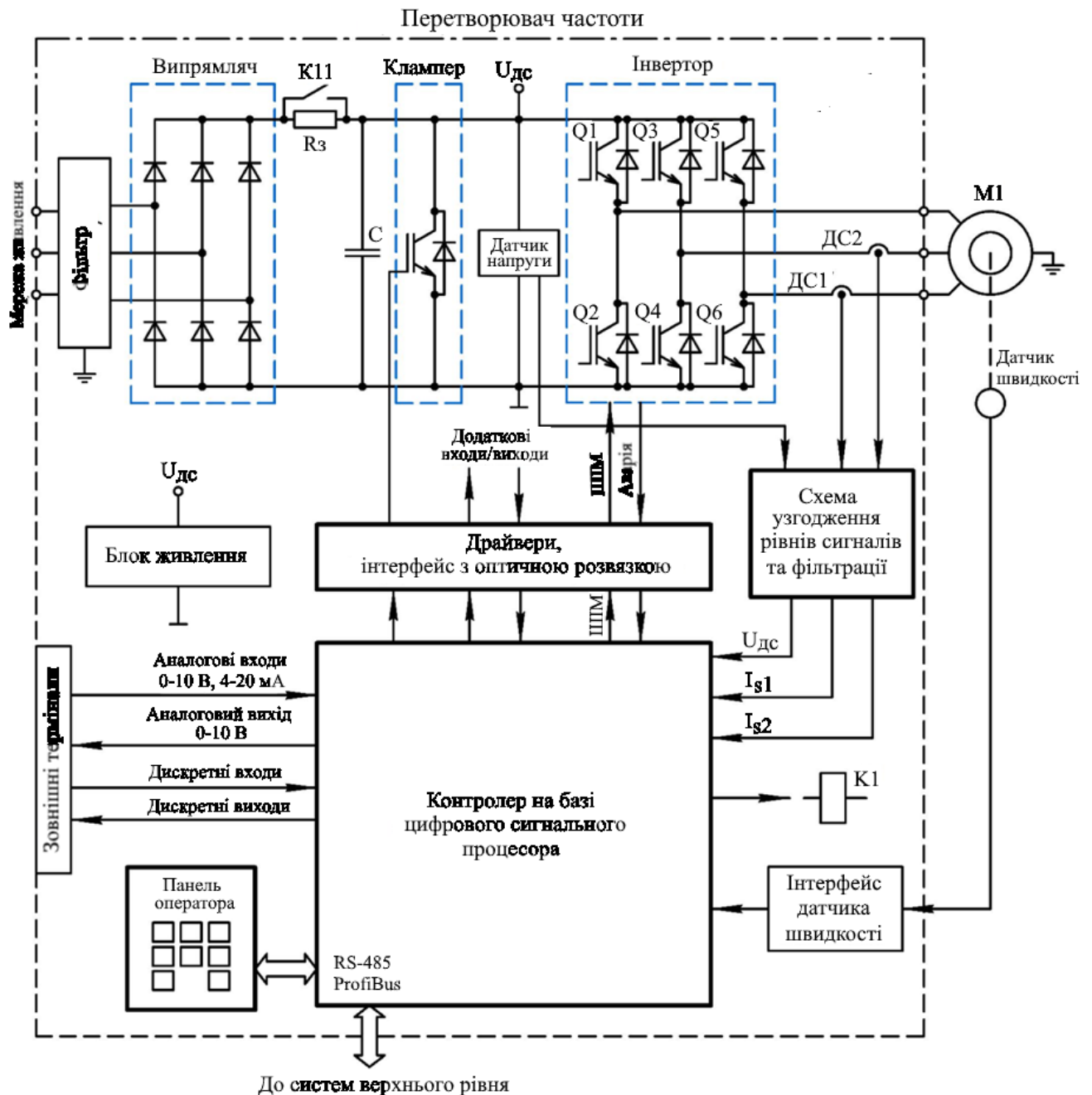


Рисунок 2.6 – Функціональна схема перетворювача частоти асинхронного електропривода

Перетворювач частоти складається з двох основних компонентів:

– **блока живлення**, що включає вхідний фільтр, некерований випрямляч, ланцюг зарядки, ємність фільтра випрямляча, клампер, датчик напруги ланки постійного струму, інвертор, датчик вихідного струму, схему драйвера, гальванічну розв'язку інвертора і сигналів керування клампером, а також блок живлення;

– **контролера керування**. Звичайно включає корпус цифрового контролера, який базується на мікропроцесорному сигнальному процесорі, і схему узгодження сигналів.

Склад основних модулів та елементів перетворювача частоти показано на рисунку 2.6.

Фільтр звичайно складається з 2 основних компонентів. Варистор, який запобігає від перенапруження постійним струмом через стрибки напруги в лінії електроживлення, і фільтр радіоперешкод, який запобігає поширенню високочастотних перешкод через включення інвертора в лінію електроживлення

Ланцюг зарядки (резистор R_z і реле $K1$) плавно заряджає ємність фільтра випрямляча C при включенні живлення перетворювача. Після завершення зарядки контакт реле $K1.1$ буде замкнутий.

Клампер (фіксатор) – це пристрій, призначений для стабілізації напруги в лінії постійного струму в генераторному режимі роботи двигуна з рекуперацією енергії лінії постійного струму.

Датчик напруги призначений для передачі інформації про напругу лінії постійного струму U_{dc} на контролер керування. Він використовується для генерації імпульсів для забезпечення захисту, контролю зарядної здатності випрямного фільтра і керування ключем інвертора відповідно до методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Інвертор перетворює напругу лінії постійного струму в трифазну напругу, заданої амплітуди і частоти на виході перетворювача, і результуючий вектор (усереднений за період ШІМ), що має заданий модуль, частоту і кут нахилу.

Датчики струму DC1 і DC2 призначені для передачі інформації про фазний струм двигуна в контролер керування і використовуються для організації функцій захисту інвертора і двигуна, а також для організації зворотного зв'язку системи векторного керування.

Датчик швидкості призначений для вимірювання кутової швидкості (положення) контролера для організації функцій зворотного зв'язку і захисту.

Драйвер змінює параметри керуючого імпульсу силового ключа, що надходить від контролера, забезпечуючи надійний запуск і замикання *IGBT*-ключа. На практиці драйвер можна розглядати як підсилювач сигналу. У багатьох випадках драйвер також забезпечує захист від струмів короткого замикання в інверторі.

Оптична розв'язка – це гальванічна розв'язка окремих керуючих сигналів, яка підвищує захист керуючого контролера від перешкод і запобігає виходу з ладу в разі аварійної ситуації в блоці живлення. У потужних перетворювачах це робиться за допомогою оптичної пари або волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Керуючий контролер виконує всі функції автоматичного керування перетворювача, отримує завдання за координатами керування, обчислює алгоритм керування двигуном, генерує основний керуючий імпульс, реалізує функцію захисту і взаємодіє з системою верхнього рівня.

Схеми узгодження і фільтрації сигналів необхідні для узгодження рівня сигналів, одержуваних від датчиків струму і напруги, з допустимим рівнем вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Підвищити стійкість системи керування від перешкод можна також за допомогою фільтрації відображень сигналів.

Інтерфейс датчика швидкості – до контролера можуть бути підключені оптичні імпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило, вони мають гальванічну ізоляцію.

Блок живлення – це пристрій, що забезпечує енергоспоживання самого інвертора (наприклад, живлення контролера, живлення драйвера, зовнішні напруги +10 В і +24 В, живлення датчика). У сучасних інверторах вхідна напруга

джерела живлення береться від лінії постійного струму, що забезпечує безпечне відключення системи в разі збою живлення.

Зовнішні клеми використовуються для підключення цифрових входів/виходів до перетворювача (наприклад, сигналів керування перетворювачем «Пуск», «Стоп», «Реверс») і аналогових входів/виходів (наприклад, уставки швидкості, зворотного зв'язку з параметрами процесу).

Панель керування призначена для налаштування параметрів системи, відправки команд на перетворювач, установки керуючого значення в ручному режимі, моніторингу та діагностики керуючого значення.

Додаткові входи і виходи використовуються для керування додатковими системами роботою, наприклад, зарядного реле, вентиляторами та насосами системи охолодження.

2.4.1 Вибір потужності ПЧ

Перетворювачі частоти вибираються відповідно до рекомендацій [1]:

1. Параметри електричної мережі: 3 фази 380 В, 50 Гц.
2. Вихідні параметри перетворювача частоти.
 - 3-фазна напруга;
 - максимальна вихідна напруга: 380 В.
3. Потужність перетворювача частоти вибираємо за умовами:
 - потужність ПЧ повинна бути рівною або перевищувати сумарну потужність двигунів, що підключаються до нього

$$P_{\text{ПЧ}} \geq \Sigma P_{\text{двн}} = 2 \cdot 55 = 110 \text{ кВт}; \quad (2.1)$$

– номінальний (довготривалий допустимий) струм $I_{1\text{н}}$ повинен бути рівним або перевищувати номінальний струм двигунів

$$I_{1\text{н}} \geq I_{1\text{дн}} = 109 \text{ А}; \quad (2.2)$$

– коефіцієнт запасу K повинен враховувати високі пускові струми і перенавантаження електроприводу механізму вагоноперекидача, а також несприятливі умови експлуатації. Приймаємо $K = 2$.

Таким чином, необхідна потужність ПЧ повинна дорівнювати або бути більшою:

$$P_{\text{ПЧ}} \geq \Sigma P_{\text{двн}} \cdot K = 110 \cdot 2 = 220 \text{ кВт.}$$

2.4.2 Вибір типу перетворювача частоти

В якості перетворювача частоти для електроприводу ротора вагоноперекидача вибираю ПЧ типу SINAMICS S150 виробництва компанії SIEMENS [5]. Спрощена схема перетворювача частоти SINAMICS S150 показана

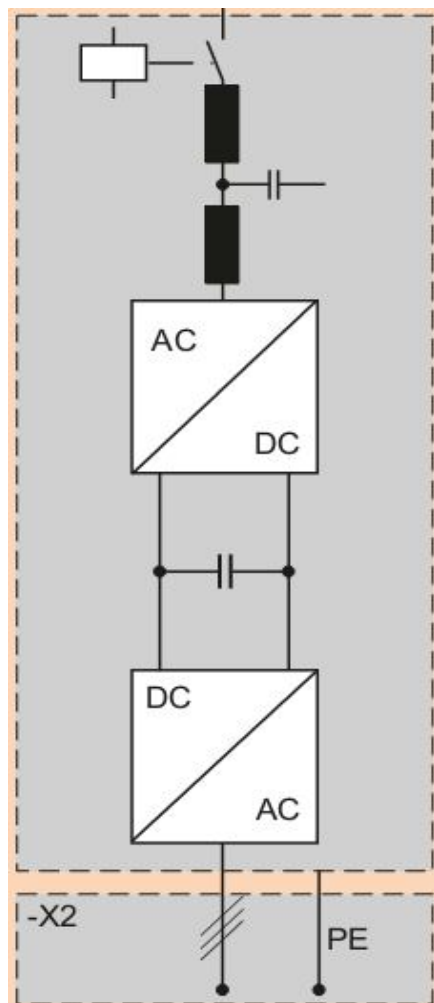


Рисунок 2.7 – Спрощена схема перетворювача частоти SINAMICS S150

на рисунку 2.7. Зовнішній вигляд перетворювача частоти показаний на рисунку 2.8, а схема підключення перетворювача приведена на рисунку 2.9.

Для підвищення надійності системи розавнтаження використовуються 2 перетворювача частоти: основний та резервний.

Замовний номер: 6SL3710-7LE35-0AA3 (шафне виконання, ступінь захисту: IP54, у комплекті з вихідним фільтром).

Основні технічні параметри:

– номінальна потужність: 250 кВт (нормальна робота за температури +50 °С, враховані значні перевантаження, пов'язані з особливостями механізму ротора вагоноперекидача);



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд ПЧ SINAMICS S150: 1 – панель керування; 2 – кнопка аврійного відключення; 3 – головний вимикач Q1; 4 – блокування дверей; 5 – вентиляційні решітки

– ступінь захисту – IP54 (шафне виконання);
– вбудований 4-х квадрантний блок живлення (рекуперація у мережу).

Технічні характеристики перетворювача наведені в таблицях 2.3 і 2.4.

Особливості перетворювача частоти SINAMICS S150:

Автоматичний, імпульсний блок живлення/рекуперації, виконаний за технологією *IBGT*, у комбінації з фільтром *Clean Power* забезпечує режим максимальної мережевої сумісності:

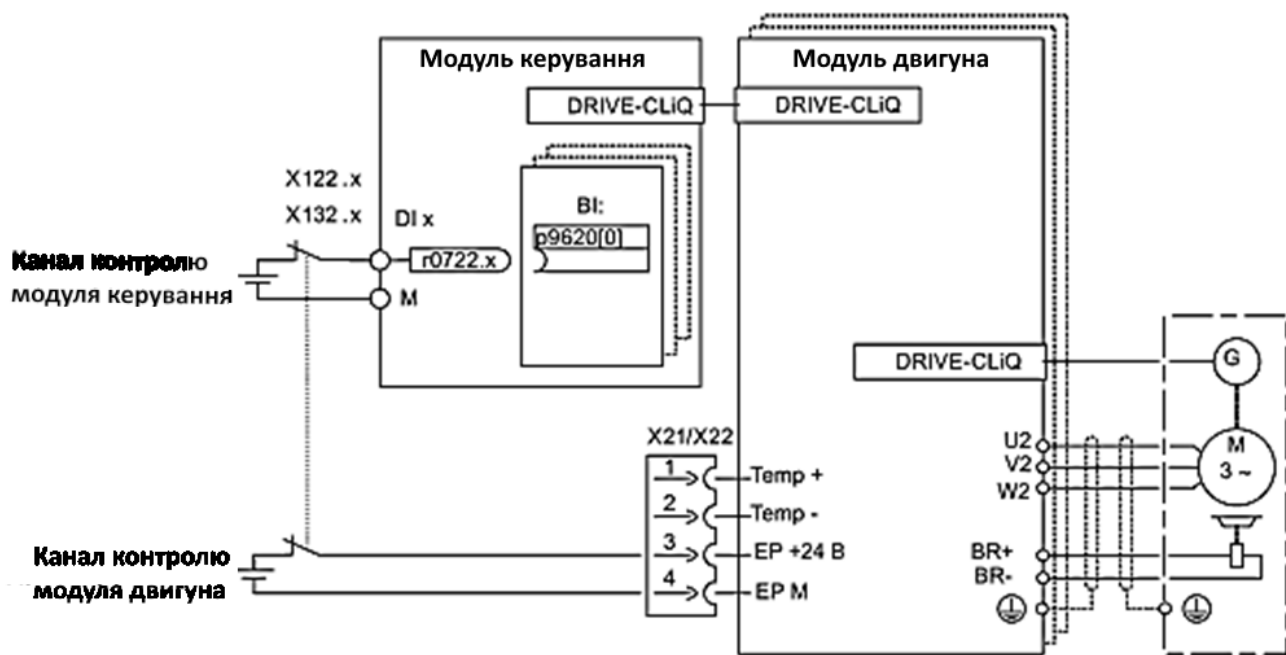


Рисунок 2.9 – Схема підключення перетворювач частоти SINAMICS S150

- швидке введення в експлуатацію за допомогою меню без трудомісткого параметрування;
- зневажливо малі зворотні впливи на мережу завдяки інноваційному фільтру *Clean-Power*;
- рекуперація енергії (режим 4Q);
- допуск щодо коливань напруги мережі;
- робота на слабких мережах;
- можливість компенсації реактивної потужності;
- висока динаміка приводу.

Крім того враховані фактори, що забезпечують **просте поводження** з приводом від проектування до експлуатації, а саме:

- компактна модульна конструкція з оптимальною зручністю сервісного обслуговування;
- раціональне проектування та введення в експлуатацію завдяки підтримці таких інструментів як *SIZER* та *STARTER*;
- повна готовність до підключення, завдяки чому забезпечується простий монтаж;
- наочне та зручне спостереження за приводом/діагностикою, введенням в експлуатацію та керування за допомогою комфортабельної графічної панелі керування з індикаторами виміряних значень у вигляді відкритого тексту або гістограм;
- SINAMICS є невід'ємною складовою комплексної автоматизації (*Totally Integrated Automation, TIA*). TIA – це концепція для оптимально підбраного спектру продукції техніки автоматизації та приводів. Ядром даної концепції є наскрізне проектування, комунікація та зберігання даних з усіх продуктів. SINAMICS повністю використовує концепцію TIA.

Розроблені власні модулі S7/PCS7 та лицьові плати під *SCADA WinCC*.

- інтеграція в систему SIMATIC H забезпечується за допомогою технології *Y-Link*.
- *Drive Control Chart (DCC)*, що розширює можливості простого налаштування конфігурації техно-логічних функцій для SINAMICS. Бібліотека

модулів містить великий вибір регулюючих, обчислювальних та логічних блоків, а також великі функції керування та регулювання. Зручний редактор DCC забезпечує просте використання графічне проектування і наочне уявлення структур автоматичного регулювання, і навіть широку можливість багаторазового використання вже створених схем.

DCC – це доповнення до утиліти для введення в експлуатацію STARTER.

- призначений для використання в металургійній промисловості, механізмах з важкими умовами експлуатації (підйомно-транспортне обладнання, млини, преси);
- можливість швидкодіючої компенсації реактивної потужності за допомогою блоку живлення ПЧ;
- відсутність гармонік;
- коефіцієнт потужності, близький до 1;
- високий ККД (порівняно з приводами з гальмівними опорами);
- можливість режиму роботи: швидкодіюча компенсація реактивної потужності.

Максимальне значення коефіцієнта підсилення інвертора:

$$k_{\text{інв}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}}}{U_{\text{кер.макс}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,11 \frac{\text{В}}{\text{В}}$$

де $U_{\text{кер.макс}} = 10 \text{ В}$ – максимально допустиме значення напруги керування на вході перетворювача.

Таблиця 2.3 – Номінальні параметри перетворювача частоти SINAMICS S150
замовний номер 6SL3710-7LE35-0AA3

Параметри мережі живлення	Допустиме навантаження	Потужність на валу двигуна	Макс. струм I_N (2 с), А	Типо-розмір шафи
	Безперервний струм I_L при 40 °С, А	Потужність живлення 400 В при 40 °С (низьке навантаження), кВт		
3×380 В, 50 Гц	490	250	715	А

Еквівалентна постійна часу інвертора:

$$T_{\text{інв}} = \frac{0,5}{f_{\text{ШІМ}}} = \frac{0,5}{2000} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики SINAMICS S150, замовний номер 6SL3710-7LE35-0AA3

Підключення до мережі	Вхідна напруга	380 В 3 фази
	Вхідна частота	50...60 Гц
Підключення двигуна	Вихідна частота	0...300 Гц
ККД	> 98 %	
Вид керування	Скалярне, векторне без датчика швидкості	
Ланцюги керування	Входи та виходи	2 аналог. входи, 6 цифр. входів, 1 аналог. вихід, 10 В опорн., 24 В вх., 3 рел. виходу або 2 рел. виходи + вхід термісторів
	Ethernet	PROFINET, PROFIBUS
Умови навколишнього середи	Робоча температура навколишнього повітря	0...+50 °С, зниження номінальних характеристик 1,5 %/1 °С за температури вище 40 °С
	Ступінь захисту корпусу	IP21у стандартній версії IP54 за замовленням
ЕМС	Завадостійкість	ІЕС 61800-3, перші та другі умови експлуатації
	Випромінювання перешкод	ІЕС 61800-3, категорія С2 ІЕС 61800-3, категорія С3 для модулів IP00 та корпусних перетворювачів частоти

2.5 Вибір закону керування системи керування електроприводом на основі ПЧ

Системи керування електроприводом на основі ПЧ можуть бути налаштовані на скалярний та векторний закони керування.

2.4.1 Принцип роботи скалярних систем керування електроприводом.
Скалярне керування (U/f -керування асинхронними двигунами) – це зміна швидкості обертання електродвигуна шляхом впливу на частоту статора при одночасній зміні коефіцієнта цієї напруги.

При U/f -керуванні частота і напруга є двома керуючими впливами, які звичайно контролюються разом, діють як два керуючих впливів, які звичайно регулюються разом. У цьому випадку частота розглядається як незалежний вплив, а значення напруги на заданій частоті визначається на основі того, як повинні змінюватися механічні властивості приводу з частотою, тобто як повинен змінюватися граничний момент двигуна з частотою.

Для досягнення такого закону керування необхідно забезпечити співвідношення $U/f = \text{const}$ (U – напруга статора, f – частота напруги статора). Якщо перевантажувальна здатність постійна, то номінальна потужність і коефіцієнт корисної дії двигуна залишаються практично незмінними у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Деякі закони U/f -регулювання пов'язують величину напруги живлення двигуна з частотою (наприклад, $U/\sqrt{f} = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$ та інші).

Перевага скалярного керування полягає в тому, що при цьому можна керувати кількома двигунами одночасно. Скалярне керування використовується для більшості практичних застосувань частотних приводів з діапазонами регулювання швидкості двигуна до 1:40 без використання датчиків зворотного зв'язку.

Скалярні алгоритми керування не дозволяють керувати моментом та позиціонуванням двигунів. Найбільш ефективним застосуванням цього методу керування є вентилятори, насоси та конвеєри.

2.4.2 Принцип роботи системи керування двигуном з векторним керуванням.

Векторне керування – це метод керування асинхронним двигуном, який не тільки генерує гармонічні струми і фазні напруги, але і управляє магнітним потоком двигуна. Векторне керування засноване на поданні напруги, струму і магнітного потоку як просторових векторів.

На відміну від скалярного керування, векторне керування з асинхронним електричним приводом дозволяє підтримувати постійним магнітний потік ротора під час перехідних процесів. При скалярному керуванні зміна струму статора і струму ротора під час перехідного процесу призводить до зміни потокозчеплення ротора і зменшення швидкості зміни електромагнітного моменту. У приводі з векторним керуванням, який може підтримувати постійний потік ротора, електромагнітний крутний момент змінюється з тією ж швидкістю, що і складова струму статора (подібно до зміни крутного моменту при зміні струму якоря машини постійного струму).

Векторне керування означає, що в блоці керування є узгоджена математична модель електроприводу.

Режими векторного керування можна класифікувати наступним чином:

1. Залежно від **точності математичної моделі** електроприводу, використовуваної в блоці керування:

- використовувати математичні моделі **без додаткових уточнюючих вимірювань** контролером параметрів двигуна (використовуються тільки типові дані двигуна, введені користувачем).

- **додаткове уточнення параметрів** двигуна контролером можливо за допомогою математичних моделей з вимірюваннями, наприклад, активного і реактивного опору статора і ротора, напруги і струму двигуна тощо.

2. Залежно від наявності або відсутності зворотного зв'язку за швидкістю (датчика швидкості) векторне керування можна розділити на:

- керування двигуном **без зворотного зв'язку за швидкістю** – в цьому випадку контролер використовує дані з математичної моделі двигуна і значення, отримані шляхом вимірювання струму статора і/або ротора.

- керування двигуном **за допомогою зворотного зв'язку за швидкістю** – в цьому випадку контролер використовує значення, отримані шляхом вимірювання струму статора і/або ротора двигуна (як і в попередньому випадку), а також дані про частоту обертання (положенні) ротора від датчика.

Основними законами векторного керування є:

а). Закон, що гарантує незмінність потокозчеплення статора Ψ_1 (що відповідає $E_{\text{зовн}}/f = \text{const}$).

б). Закон, що гарантує сталість коерцитивної сили потоку Ψ_0 в повітряному зазорі (що відповідає $E/f = \text{const}$).

в). Закон, що гарантує сталість потоку Ψ_2 в роторі (що відповідає $E/f = \text{const}$). Закон забезпечення сталості потоку статора досягається за рахунок підтримки постійного відношення ЕРС статора до кутової частоти магнітного поля. Основним недоліком цього закону є те, що при роботі на високих частотах знижується перевантажувальна здатність двигуна. Це відбувається тому, що індукційний опір статора збільшується, і в результаті магнітний потік в зазорі між статором і ротором зменшується зі збільшенням навантаження.

При підтримці основного потоку постійна перевантажувальна здатність двигуна збільшується, але апаратна реалізація системи керування стає більш складною, вимагаючи змін в конструкції машини або використання спеціальних датчиків. Коли потік ротора підтримується постійним, крутний момент двигуна не максимізується, але коли навантаження збільшується, потік збільшується, магнітний ланцюг насичується, і, як наслідок, потік ротора не може підтримуватися постійним.

Отже, використання скалярного закону керування електродвигуном приводу роторного вагоноререкидача з розімкненими системами керування дозволяє підтримувати частоту обертання двигуна з точністю до 5 %, що відповідає технічним вимогам до приводу роторних вагоноперекидачів.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОТОРА ВАГОНОПЕРЕКИДАЧА

3.1 Побудова сімейства механічних характеристик двигуна

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна (при частоті 50 Гц) будується відповідно до наступного рівняння, з діапазоном ковзання s з кроком 0,01 в діапазоні від 1 до 0,00001, $n(s) = n_0 \cdot (1 - s)$:

$$M_{\text{ем}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}.$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 590}{30} = 61,75 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номінальний момент за паспортними даними

$$M_{\text{н(паспорт)}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{55000}{61,75} = 890,69 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент за паспортними даними

$$M_{\text{к(паспорт)}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 2,2 \cdot 890,69 = 1958,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент за паспортними даними

$$M_{\text{п(паспорт)}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{н(паспорт)}} = 1,6 \cdot 890,19 = 1424,30 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент за формулою Клосса [7]

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2})} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 62,83 \cdot 1,04 \cdot (0,05637 + \sqrt{0,05637^2 + 0,50458^2})} = 1958,42 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номінальний момент за формулою Клосса

$$M_H = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + R_1 \cdot \frac{s_K}{R_2'})}{\frac{s_K}{s_H} + \frac{s_H}{s_K} + 2 \cdot R_1 \cdot \frac{s_K}{R_2'}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1958,42 \cdot (1 + 0,05637 \cdot \frac{0,0740}{0,0361})}{\frac{0,0740}{0,0361} + \frac{0,0361}{0,0740} + 2 \cdot 0,05637 \cdot \frac{0,0740}{0,0361}} = 892,14 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Пусковий момент за формулою Клосса при нерухомому роторі (s = 1)

$$M_{\Pi} = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + R_1 \cdot \frac{s_K}{R_2'})}{\frac{s_K}{s_{\Pi}} + \frac{s_{\Pi}}{s_K} + 2 \cdot R_1 \cdot \frac{s_K}{R_2'}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1958,42 \cdot (1 + 0,05637 \cdot \frac{0,0740}{0,0361})}{\frac{0,0740}{1} + \frac{1}{0,0740} + 2 \cdot 0,05637 \cdot \frac{0,0740}{0,0361}} = 316,28 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Побудова сімейства механічних характеристик здійснюється за наступними рівняннями для частот обертання двигуна в робочому діапазоні 0.... 600 об/хв.

$$M_{em}(s, f_1) = \frac{3 \cdot (U_{1\Phi H} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}})^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]}$$

Для побудови графіків сімейства механічних характеристик в пакеті *Mathcad* 15 залежність швидкості двигуна від частоти та ковзання показана нижче, де

$$n_1(s, f_1) = n_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s) .$$

Сімейство механічних характеристик електродвигуна 5AM315S10БУ2 наведено на рисунку 3.1.

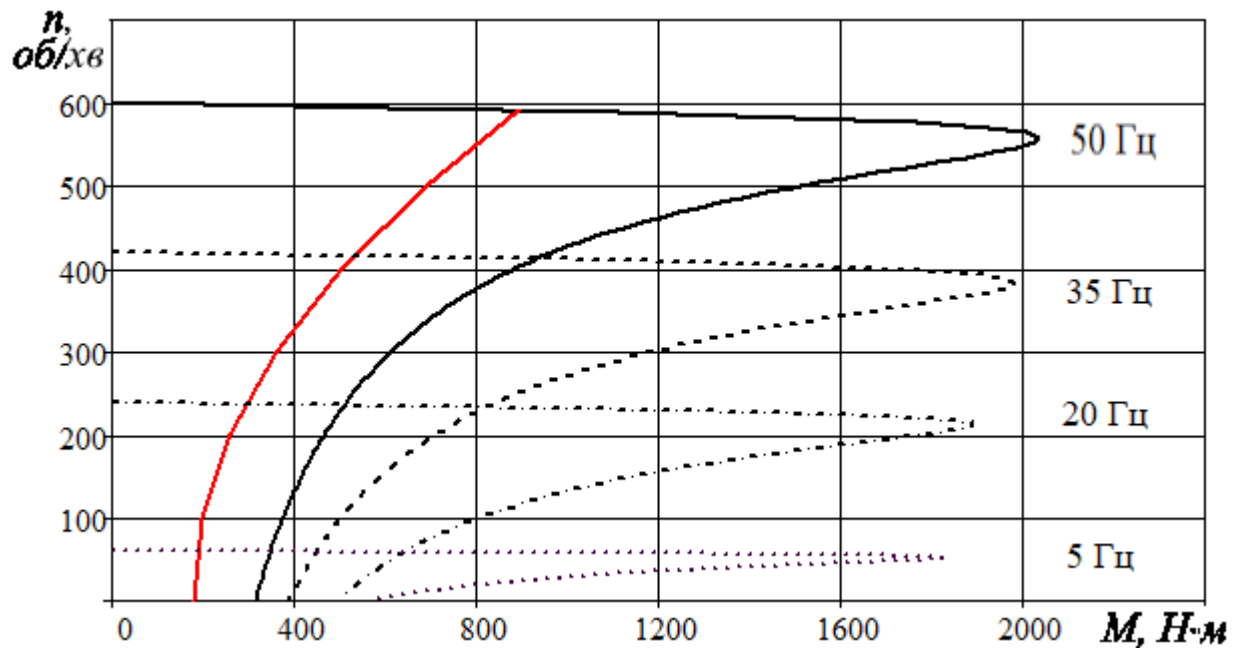


Рисунок 3.1– Сімейство механічних характеристик електродвигуна 5AM315S10БУ2

Отримані результати показують, що розраховані механічні властивості двигуна справедливі лише на робочій гілці механічної характеристики. Це можна пояснити тим, що значення критичного та номінального крутного моменту практично збігаються зі значеннями, розрахованими за паспортними даними. Однак значення пускового моменту, розраховане за паспортними даними, значно перевищують розрахованих значень пускового моменту. Це пов'язано з тим, що в розрахунках не враховується вплив витіснення струму в обмотках ротора.

3.2 Дослідження динамічних характеристик асинхронного двигуна при прямому пуску

Прямий пуск асинхронних двигунів здійснюється за простою схемою з'єднання зі звичайним релейним контактним пристроєм комутації – магнітним пускателем (рисунок 3.2). Такі електроприводи є некерованими і підтримують

Момент інерції ротора робочої машини змінюється при повороті ротора, причому максимальний момент навантаження спостерігається при куті повороту ротора $\alpha = 70^\circ$ (див. рисунок 1.8).

Момент інерції циліндричного ротора відносно поперечної осі

$$\begin{aligned} J_{\text{рот}} &= \frac{1}{12} \cdot Q \cdot (3 \cdot r_{\text{рот}}^2 + L_{\text{рот}}^2) = \\ &= \frac{1}{12} \cdot 133000 \cdot (3 \cdot 3,825^2 + 17^2) = 3683372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \end{aligned}$$

де $Q = 133000 \text{ кг}$ – маса ротора з вагоном;

$r_{\text{рот}} = 3,825 \text{ м}$, $L_{\text{рот}} = 17 \text{ м}$ – радіус і довжина ротора.

Момент інерції ротора, приведений до валу двигуна [11]

$$J'_{\text{рот}} = \frac{J_{\text{рот}}}{i^2} = \frac{3683372}{403,3^2} = 22,64 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Сумарний момент інерції двигуна і робочої машини

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв.н}} + J'_{\text{рот}} = 5,97 + 22,4 = 28,61 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

На рисунку 3.4 показані параметри блоку синусоїди *Sine Wave* і блоку перемикача *Switch*.

На рисунку 3.5 показано схему моделі прямого пуску реверсивного електропривода ротора вагоноперекидача [9, 10].

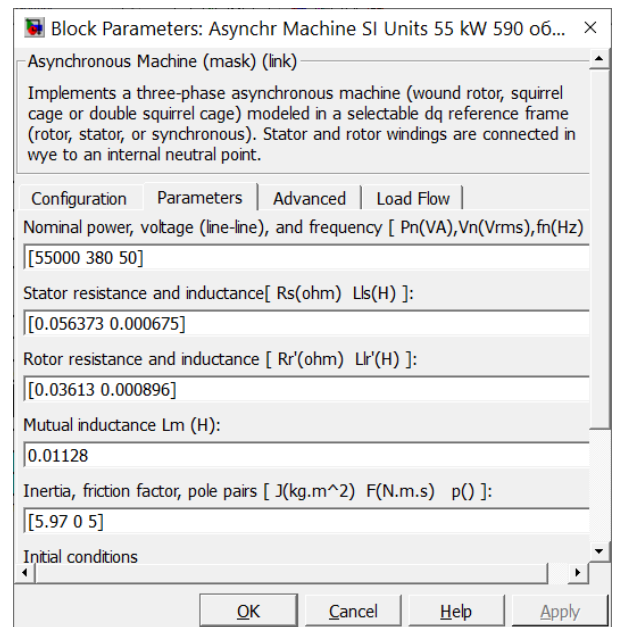
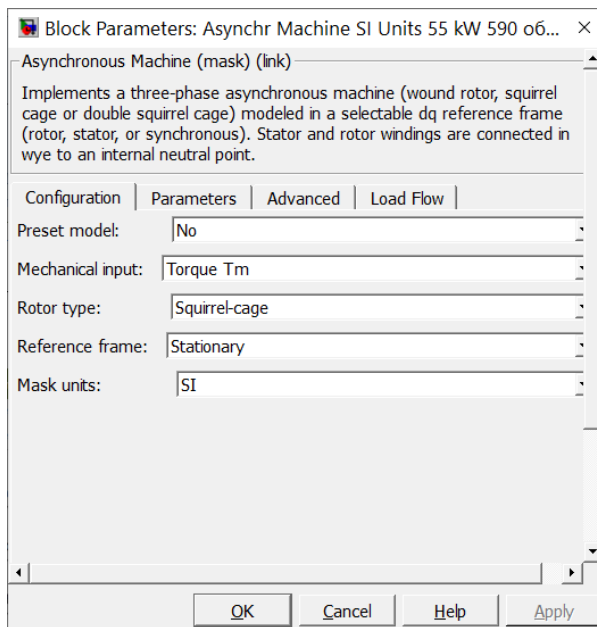


Рисунок 3.3 – Параметри асинхронного двигуна потужністю 55 кВт з таблиці 2.2

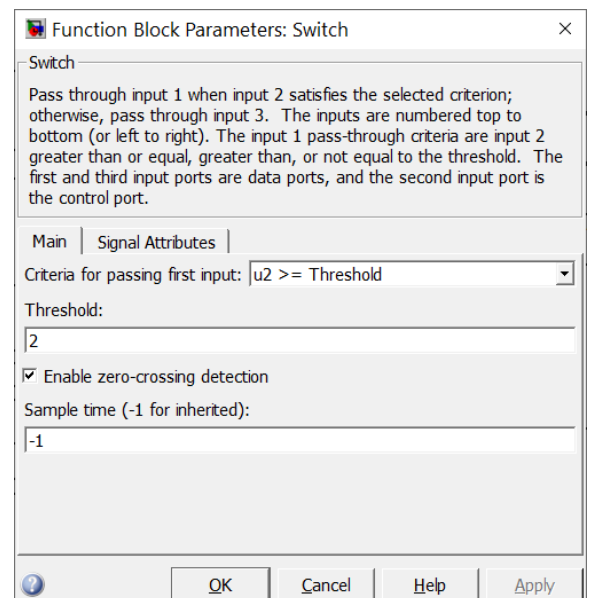
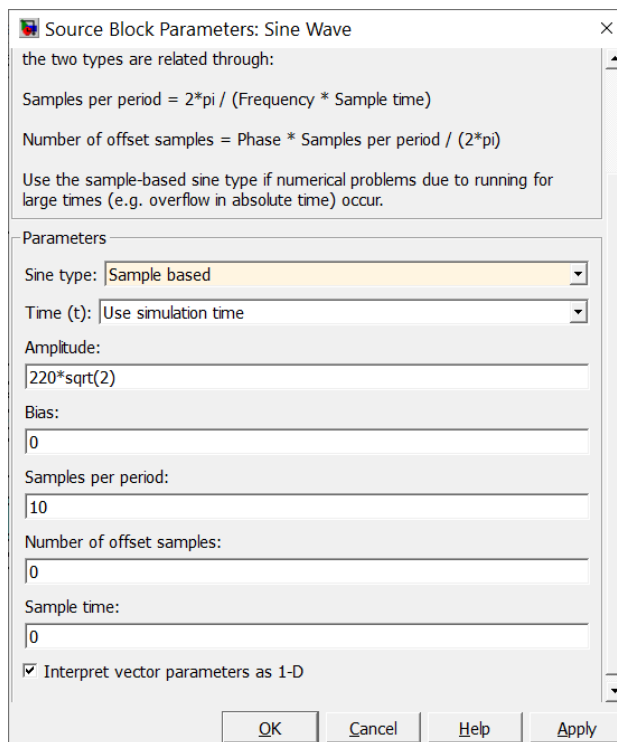


Рисунок 3.4 – Параметри блоку синусоїди *Sine Wave* і блоку перемикача *Switch*

Результати моделювання прямого пуску реверсивного електроприводу на основі трифазного асинхронного привоу показані на рисунку 3.6.

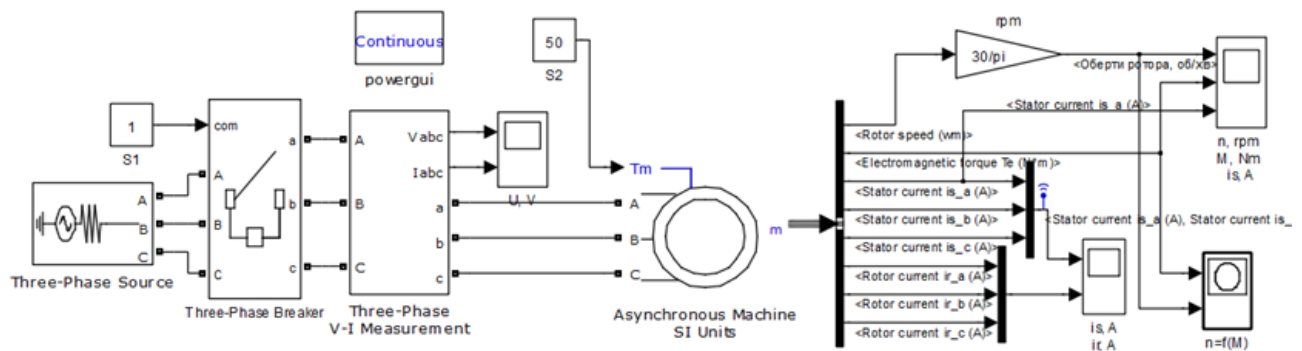


Рисунок 3.5 – Схема моделі прямого пуску реверсивного електропривода ротора вагоноперекидача

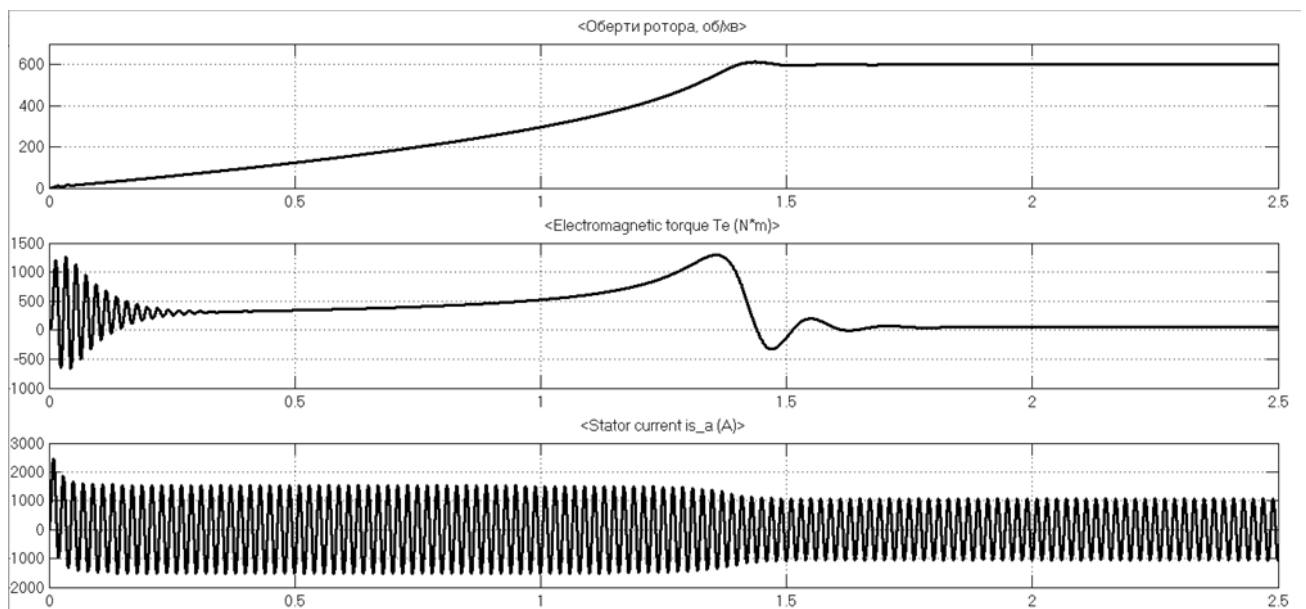


Рисунок 3.6 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при прямому пуску реверсивного електропривода

Як видно з графіка на рисунку 3.6, час встановлення швидкості та моменту при прямому пуску електроприводу становить 1,4 с, електромагнітний момент при пуску досягає приблизно 1200 Н·м, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення, а струм статора при пуску досягає 2400 А, що майже в сім разів перевищує номінальне значення.

3.3 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електропривода з широтно-імпульсним перетворювачем

Схема електроприводу ротора вагоноперекидача з перетворювачем частоти наведена на рисунку 3.7.

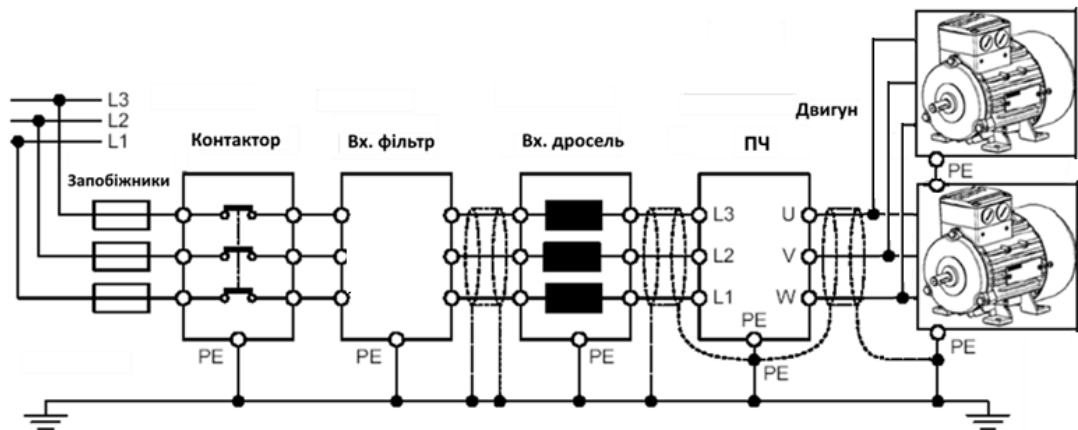


Рисунок 3.7 – Схема електропривода ротора вагоноперекидача з ПЧ

Схема моделі електропривода ротора вагоноперекидача з ПЧ наведена на рисунку 3.8 [8]. Момент навантаження двигуна при моделюванні приймається постійним з параметрами з виразу (3.1). Параметри двигуна подані на рисунку 3.3.

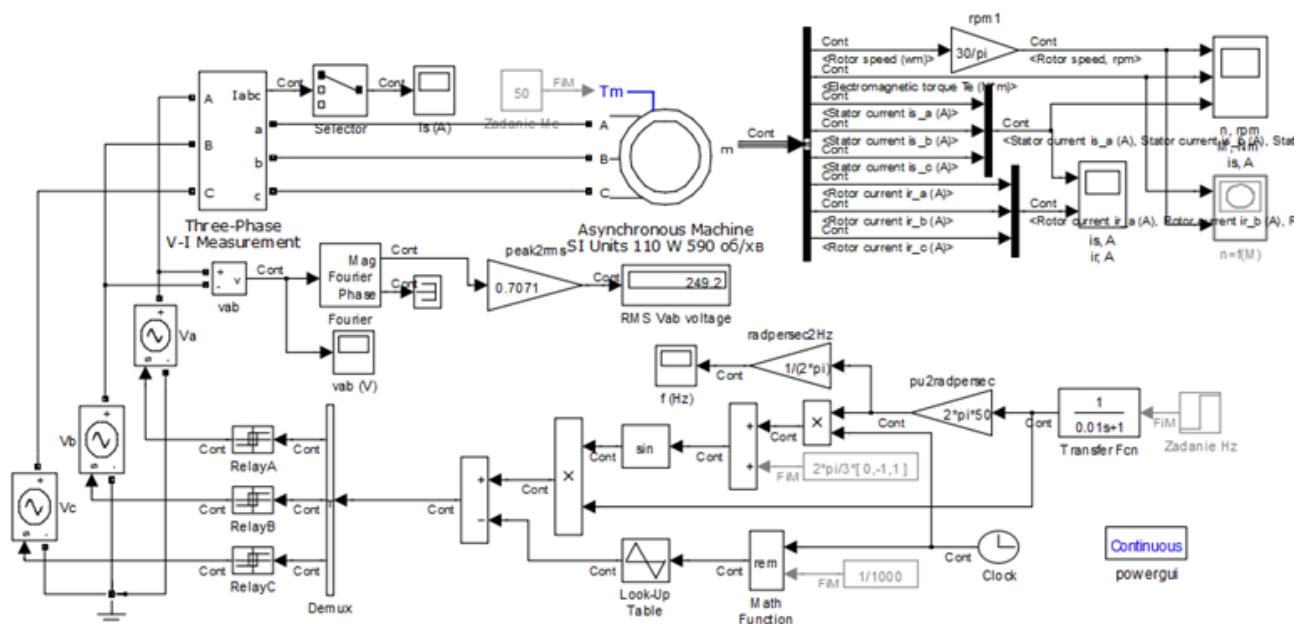


Рисунок 3.8 – Схема моделі електропривода ротора вагоноперекидача з широтно-імпульсним перетворювачем частоти

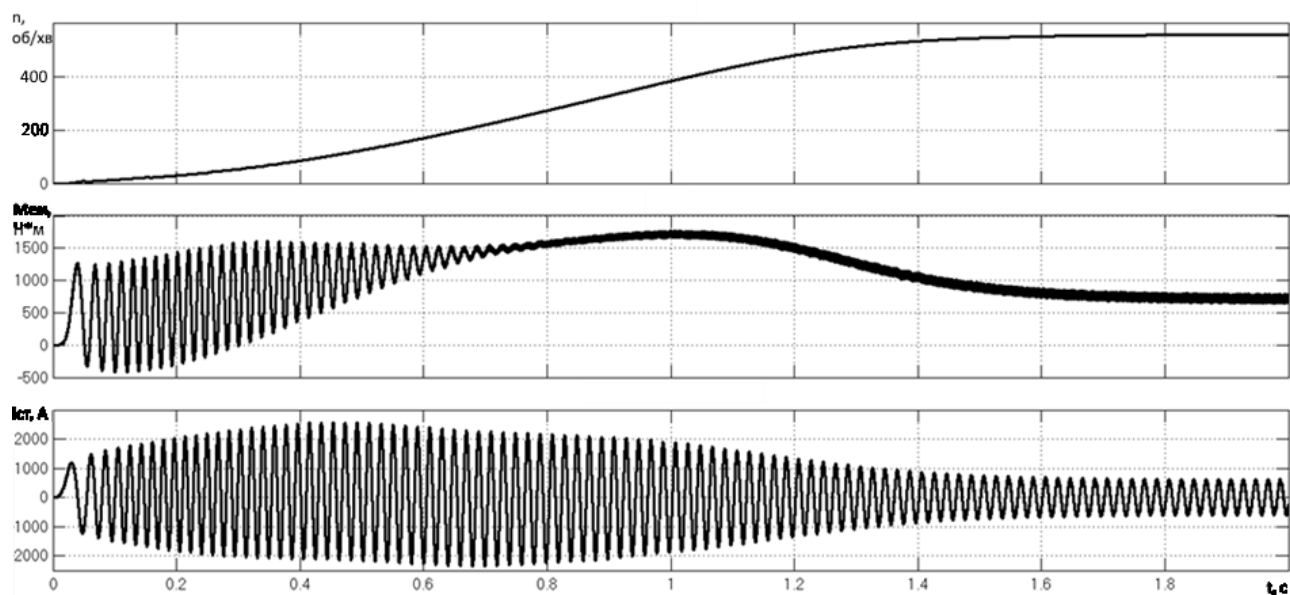


Рисунок 3.9 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при пуску електропривода з ПЧ

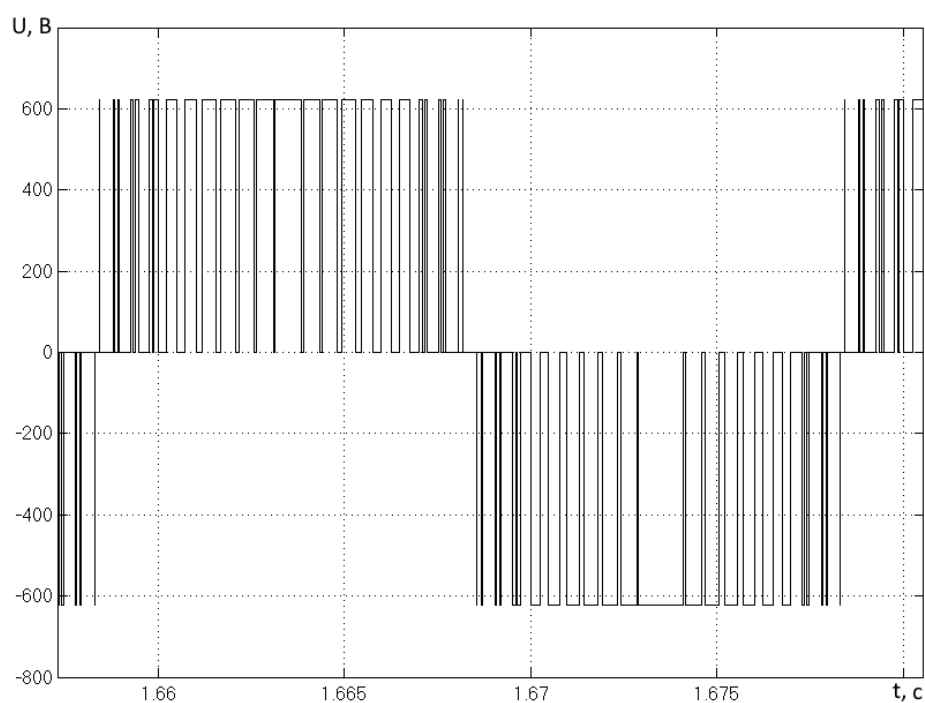


Рисунок 3.10 – Осцилограма формування синусоїдального струму статора широтно-імпульсним перетворювачем

З графіка перехідного процесу під час пуску електропривода з ПЧ (рисунок 3.12) видно, що час набору швидкості та моменту електропривода становить 1,5 с, пусковий електромагнітний момент зменшився до 1700 Н·м, що майже втричі

перевищує номінальне значення, а пусковий струм статора зменшився до 2100 А, що майже в чотири рази перевищує номінальне значення.

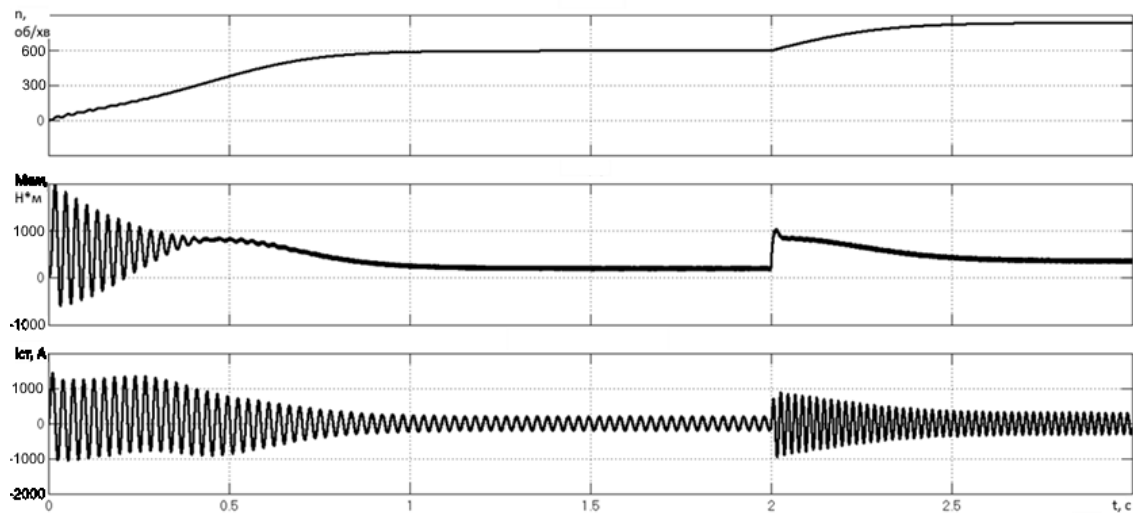


Рисунок 3.11 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні завдання по частоті електропривода з 35 Гц до 50 Гц

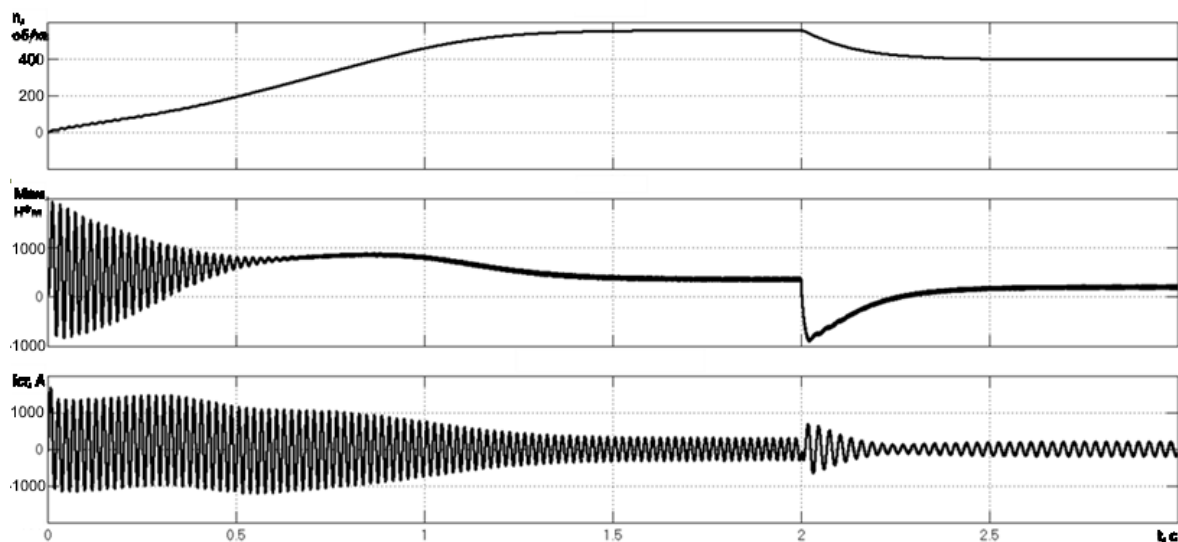


Рисунок 3.12 – Перехідні процеси зміни швидкості, електромагнітного моменту та струму статора при зміні завдання по частоті електропривода з 50 Гц до 35 Гц

Пусковий струм статора зменшився до 2500 А, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення. Перехідні процеси (рисунки 3.11 і 3.12) при збільшенні і зменшенні частоти на 15 Гц мають плавний характер і закінчуються через 0,5 с.

3.4 Дослідження динамічних характеристик асинхронного електроприводу з векторним керуванням та мережевим інвертором

3.4.1 Рекуперація енергії мережевими інверторами

При гальмуванні потужного двигуна енергію, накопичену в ньому, потрібно десь використати. Гальмівні резистори в цьому випадку не використовуються. Розглянемо використання мережевого інвертора для рекуперації енергії гальмування в мережу живлення при гальмуванні асинхронного електроприводу ротора вагоноперекидача.

Мережеві інвертори – це трифазні автономні інвертори напруги, що працюють в режимі струму. Ці інвертори використовуються для частотного і струмового регулювання частоти обертання асинхронних двигунів. Вихід постійного струму мережевого інвертора разом з конденсаторами фільтра утворює вторинне джерело живлення (рисунок 3.13). Основна роль мережевого інвертора полягає в забезпеченні заданого значення напруги на конденсаторі фільтра U_d , який використовується для живлення ШІМ або АІН імпульсного силового перетворювача під час регулювання швидкості двигуна змінного або постійного струму.

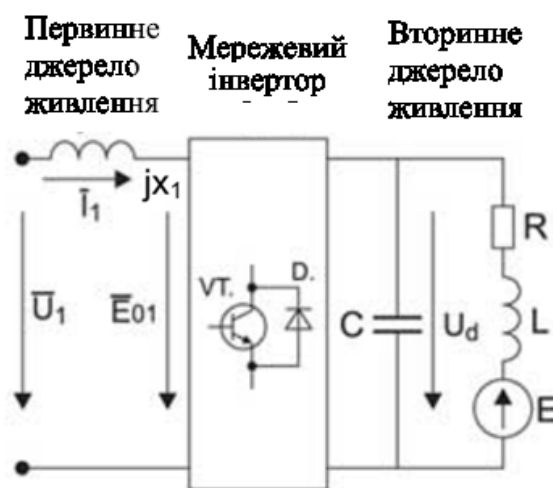


Рисунок 3.13 – Система «мережа – вторинне джерело живлення – силовий напівпровідниковий перетворювач – електрична машина»

Крім того, сам інвертор представлений перетворювачем, який генерує просторовий вектор ЕРС $\vec{E}_{01}$ по відношенню до мережі змінного струму. Це другий вихід мережевого інвертора змінного струму (рисунок 3.14).

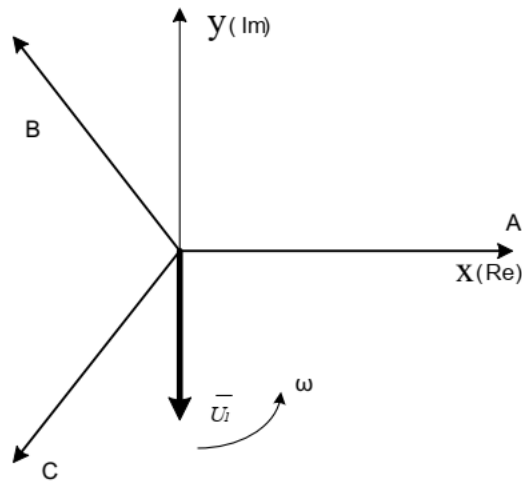


Рисунок 3.14 – Результуючий просторовий вектор мережевої напруги $\vec{U}_1$

Перша гармоніка цієї ЕРС $\vec{E}_{01}$ дорівнює [9]

$$\vec{E}_{01} = \mu_1 \cdot J_d \cdot e^{j\varphi_{1mod}}, \quad (3.1)$$

де μ_1 – коефіцієнт модуляції,

φ_{1mod} – фаза напруги модуляції по відношенню до напруги мережі.

Рівняння схеми на рисунку 3.14, що базується на другому законі Кірхгофа, виглядає наступним чином:

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_{01} + J \cdot \lambda_1 \cdot \vec{I}_1, \quad (3.2)$$

де $\vec{E}_{01}$, $\vec{U}_1$, $\vec{I}_1$ – просторовий вектор електрорушійної сили, напруги мережі та струму мережі на виході мережевого інвертора.

Для мереж змінного струму інвертори можуть працювати або як генератори активної потужності (інвертори), або як споживачі активної потужності (активні випрямлячі). У цьому випадку активна потужність в мережі визначається за формулою [10]

$$P_1 = -((m_1 U_1 E_{01}) / 2x_1) \cdot \sin \varphi_{1mod} = -((m_1 U_1 \mu_1 U_d) / 2x_1) \cdot \sin \varphi_{1mod}, \quad (3.3)$$

де $x_1 = 2\pi f_1 L_1$, L_1 – індуктивність на вході-виході інвертора;

m_1 – число фаз.

Рівняння (3.3) показує, що інвертор генерує активну потужність в мережу при $\varphi_{1mod} \geq 0$. Інвертор споживає активну потужність з мережі при $\varphi_{1mod} \leq 0$. При $\varphi_{1mod} = 0$ вся система знаходиться в режимі холостого ходу.

Реактивна потужність, яку споживає інвертор, визначається за формулою [9]:

$$\begin{aligned} Q_1 &= -(m_1 U_1 E_{01} / 2x) \cdot (\cos \varphi_{1mod} - U_1 / E_{01}) = \\ &= -(m_1 U_1 \mu_1 U_d / 2x) \cdot (\cos \varphi_{1mod} - U_1 / \mu_1 U_d). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Залежно від знака в дужках (5.4), інвертор може споживати реактивну потужність (індуктивну) або реактивну потужність (ємнісну) і діяти як компенсатор.

Універсальний мостовий некерований напівпровідниковий підсилювач живиться від трифазної напруги живлення і забезпечує напругу близько 550 В. Роль конденсатора двояка: по-перше, зменшити пульсації напруги випрямляча, а по-друге, зменшити внутрішній опір джерела при імпульсному навантаженні.

На рисунку 3.2 показані розрахункові параметри асинхронного двигуна і схема перемикачів трифазного інвертора. Напруга живлення інвертора становить 560 В, яке забезпечується елементом постійного струму. Завдання швидкості забезпечується двома блоками *Speed* і *Speed1*, а регулювання навантаження також виконується двома блоками *Torque* і *Torque1*. Два блоки використовуються для розширення можливості комбінування швидкості і навантаження.

Параметри ланцюгів зворотних зв'язків за частотою обертання та струму прийняті розрахунковими.

Процес моделювання цієї моделі виконується на фіксованому етапі з використанням програми дискретного рішення. Крок моделювання T_s налаштовується в спеціальному вікні, доступ до якого можна отримати, перейшовши в головне меню *File Model Properties Callbacks*. У зв'язку з цим

формат відображення налаштувань модельного блоку специфічний, і символ T_s повинен бути вказаний у *Sample (Sampling) Time*. Відповідні перебудови завершені. Крім того, для прискорення рішення використовується процедура *Accelerator*. Перед початком моделювання *Simulink* створює додаткові файли, на які витрачається час. Для візуалізації результатів моделювання використовуються осцилографи *Scope*.

Модель електропривода з частотним керуванням за векторним законом показана на рисунку 3.15 [10].

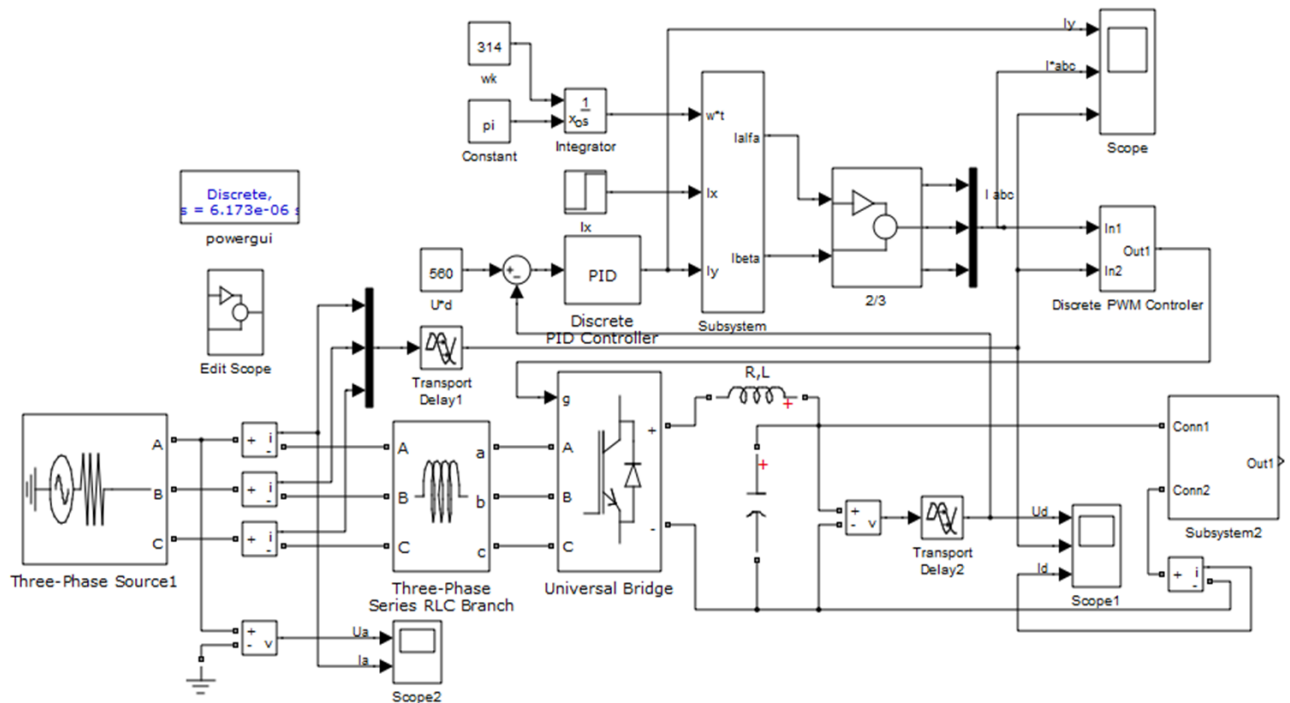


Рисунок 3.16 – Модель електропривода з частотним керуванням за векторним законом

Електропривод упакований у підсистему *Subsystem 2* схема його моделі продемонстрована на рисунку 3.17. Навантаженням двигуна від ротора розраховується за виразом (3.1) і надходить на вхід T_m двигуна. Навантаження залежить від кута повороту ротора і максимальне при куті поворота ротора 70° .

Центральною ланкою електроприводу є схема векторного керування приводом *Vektor control*, модель якого показана на рисунку 3.18.

Деякі елементи схеми є стандартними: це регулятори струму, потоку і швидкості. Різниця між цими моделями контролерів і раніше використовуваними

моделями полягає в тому, що в них використовуються дискретні інтегратори і часове вікно Sampling time заповнюється символами Ts.

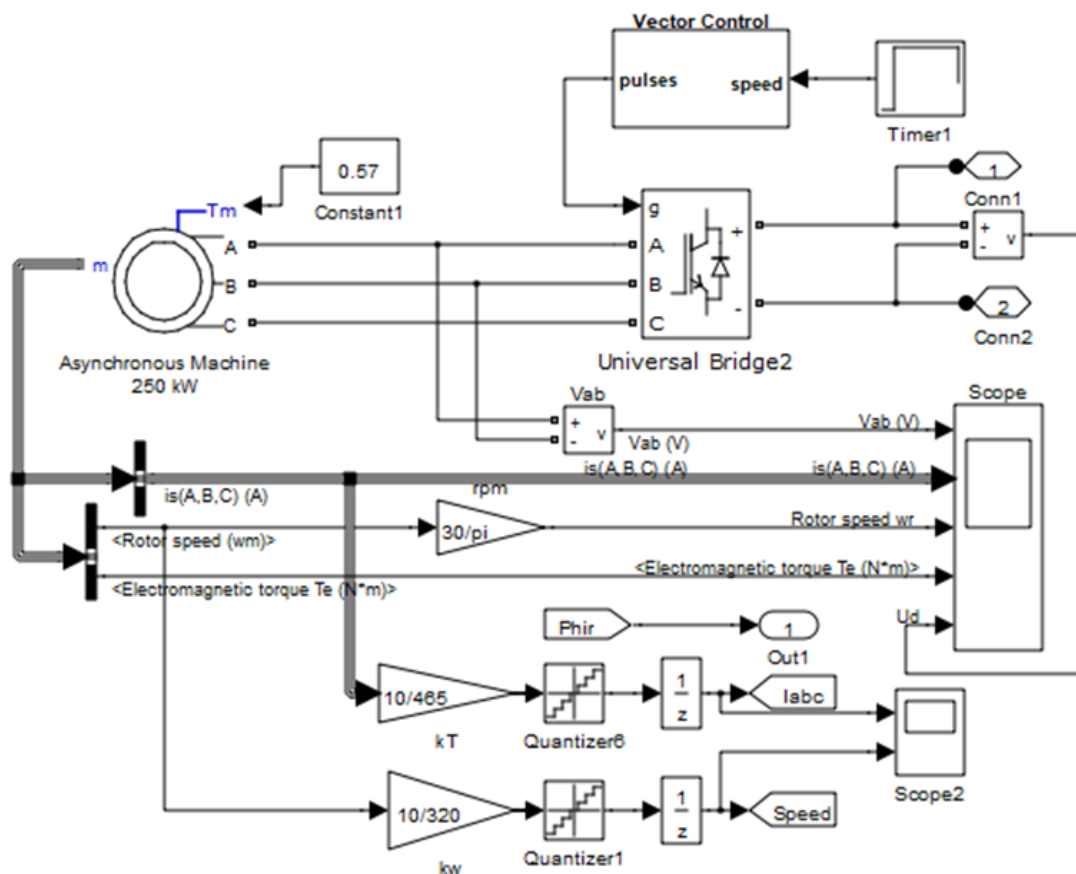


Рисунок 3.17 – Модель електроприводу в підсистемі *Subsystem 2*

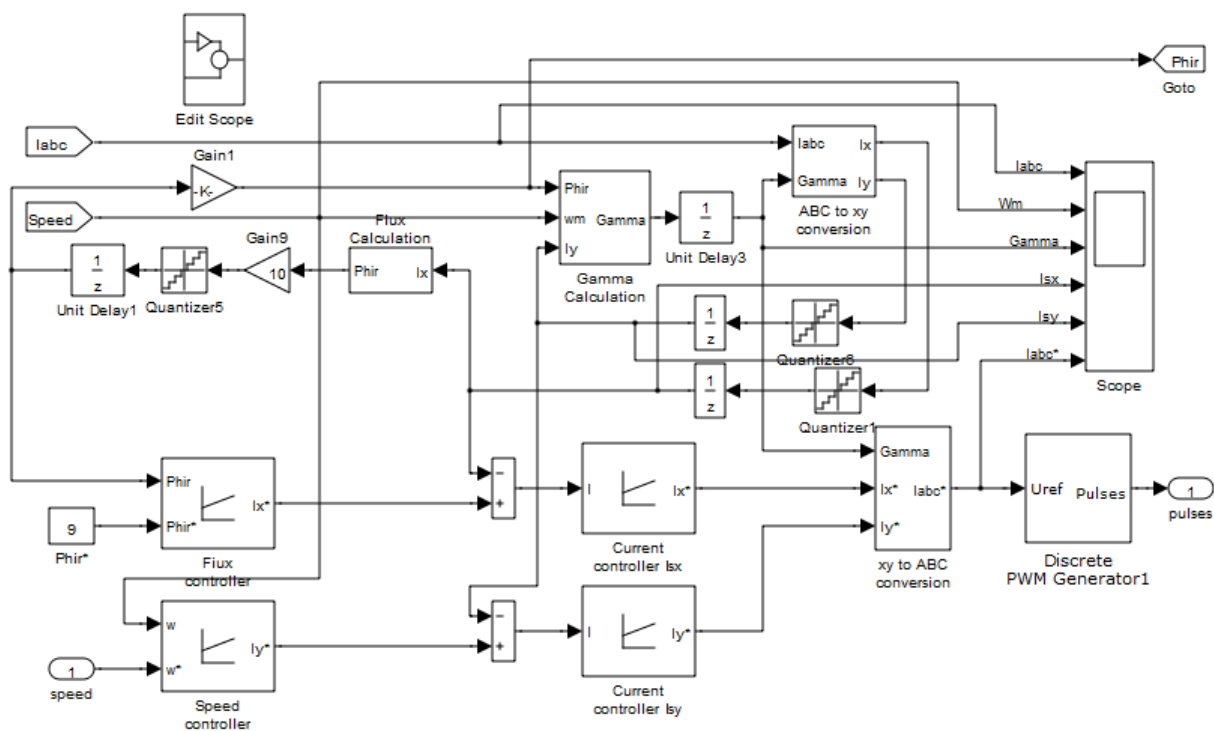


Рисунок 3.18 – Модель схеми векторного керування приводом *Vektor Control*

Розрахунок параметрів регулятора струму (рисунок 3.20) виконаємо за **модульним оптимумом** [11].

За однієї великої постійної часу рекомендується застосування пропорційно-інтегрального регулятора з функцією виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \cdot \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz}} = 7,213 \cdot \frac{0,06691 \cdot s + 1}{0,06691 \cdot s}, \quad (3.6)$$

де
$$K_{pez} = \frac{T'_s \cdot R}{T_{\mu 1} \cdot a_k \cdot K_I \cdot K_{oc1}} = \frac{0,06691 \cdot 0,002609}{0,00022 \cdot 2 \cdot 31,11 \cdot 0,002287} = 5,576$$

$T_{uz} = T'_s = 0,06691$ с – час ізодрому T_{uz} , рівний більшій постійній часу;

$T_{\mu 1} = T_I + T_{f1} = 0,0002 + 0,00002 = 0,00022$ с – еквівалентна менша постійна часу контуру струму;

$a_k = 2$ – коефіцієнт оптимізації.

Розрахунок параметрів регулятора потоку виконаємо за **модульним оптимумом**.

За однієї великої постійної часу застосуємо пропорційно-інтегральний регулятор з функцією виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \cdot \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz} \cdot s} = 68,375 \cdot \frac{2,245 \cdot s + 1}{2,245 \cdot s}, \quad (3.11)$$

де
$$K_{pez} = \frac{T_r \cdot K_{oc1}}{T_{\mu 2} \cdot a_k \cdot K_r \cdot R_r \cdot T_r \cdot K_{oc2}} = \frac{2,245 \cdot 0,002287}{0,00064 \cdot 2 \cdot 0,9811 \cdot 0,00208 \cdot 2,245 \cdot 10} = 87,547,$$

$T_{uz} = T_r = 2,245$ с – час ізодрому T_{uz} , рівний більшій постійній часу;

$T_{\mu 2} = T_C + T_{f2} = 0,00044 + 0,0002 = 0,00064$ с – еквівалентна менша постійна часу контуру потоку;

$a_k = 2$ – коефіцієнт оптимізації.

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора швидкості здійснюється відповідно до **симетричного оптимуму** [11].

Застосуємо рекомендований ПІ-регулятор з передавальною функцією наступного виду

$$W_{pez}(s) = K_{pez} \frac{T_{uz} \cdot s + 1}{T_{uz} \cdot s} = 56,898 \cdot \frac{0,00256 \cdot s + 1}{0,00256 \cdot s}, \quad (3.17)$$

де
$$K_{pez} = \frac{T_{int} \cdot K_{oc1} \cdot J}{T_{\mu3} \cdot a_k \cdot K_{T\theta} \cdot K_{oc3}} = \frac{1 \cdot 0,002287 \cdot 4,8}{0,00064 \cdot 2 \cdot 1,411 \cdot 0,03185} = 190,84;$$

$T_{\mu3} = T_C + T_{f32} = 0,00044 + 0,0002 = 0,00064$ с – менша постійна часу контуру швидкості;

$T_{uz} = a_k \cdot b_k \cdot T_{\mu3} = 2 \cdot 2 \cdot 0,00064 = 0,00256$ с – час ізодрому регулятора, рівний еквівалентній постійній часу оптимізованого контуру швидкості;

$a_k = b_k = 2$ – коефіцієнти оптимізації.

3.4.2 Налаштування блоку векторного керування *Vector Control* та результати моделювання

Блок *Vector Control* (рисунок 3.18) отримує від двигуна два вимірюваних сигналів (трифазний струм статора і частоту обертання ротора). Решта сигнали обчислюються схемою векторного керування. Спочатку нам потрібно обчислити частоту обертання координати ω_k (частоту інвертора) і поточний кут повороту координати γ . Ця функція виконується блоком обчислення *Gamma Calculation*, модельна схема якого показана на рисунку 3.32.

Блок реалізує два рівняння
$$\gamma = \frac{1}{s} \omega_k \quad \text{та} \quad \omega_u = \omega_k = p \omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}.$$

Рівняння записане в абсолютних одиницях, а ω_m в схемі працює в машинних одиницях, тому на вході з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення ω_m (рисунок 3.19). З тієї ж причини на вході I_y з'явився підсилювач з коефіцієнтом підсилення 1/0,66. Кут повороту системи координат формує

дискретний інтегратор, в схемі керування інтегратором забезпечується скидання, і вихідна напруга інтегратора досягає нуля, коли воно досягає значення 2π .

Крім того, регулятори струму контурів потоку і швидкості виробляють завдання в двофазній і обертальній системах координат на струм статора двигуна. Необхідно перевести завдання в нерухому систему і відправити трифазний сигнал. Це завдання виконується блоком *xy to ABC conversion*. Вищевказані два перетворювача об'єднані в один блок (рисунок 3.20).

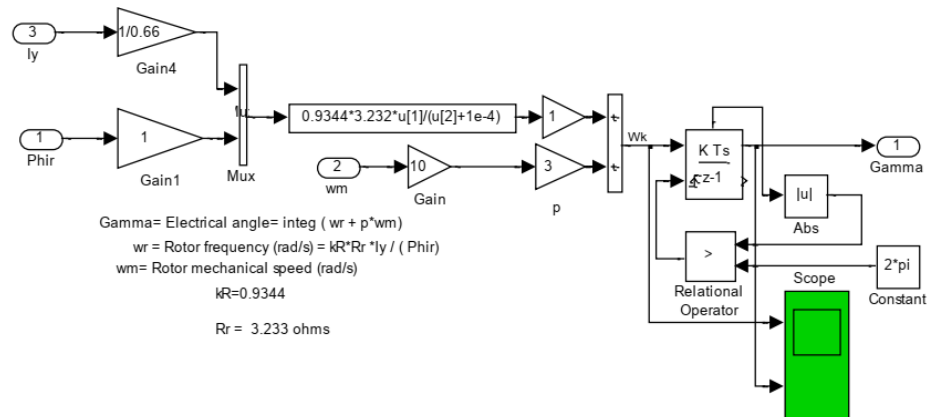


Рисунок 3.19 – Схема моделі блоку *Gamma Calculation*

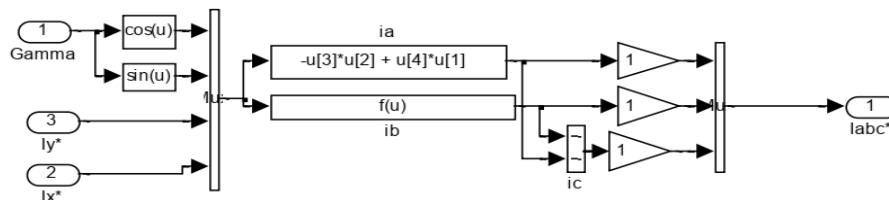


Рисунок 3.20 – Схема моделі блоку *xy to ABC conversion*

Оскільки перетворення здійснюється у машинних одиницях, масштабні коефіцієнти не вводяться. На виході пристрою є трифазне завдання на необхідній частоті струму інвертора.

Трифазний сигнал завдання, необхідної частоти і амплітуди струму статора надходять в блок керування інвертора *Discrete PWM Generator*. Вікно налаштування параметрів блоку керування інвертором показане на рисунку 3.21.

Відмінною особливістю схеми керування інвертором є завдання несучої частоти 1250 Гц, що становить половину значення частоти перемикання (пульсації). Максимальна амплітуда вхідного сигналу для будь-якої полярності становить 10 В.

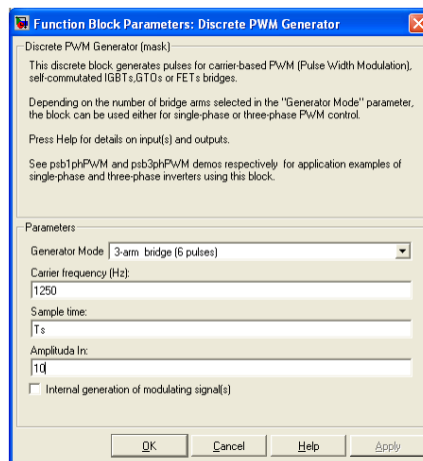


Рисунок 3.21 – Вікно введення параметрів блоку *Discrete PWM Generator*

Вихідний сигнал блоку *Discrete PWM Generator* надходить на мікропроцесорну шину, забезпечуючи керування шістьма транзисторами інвертора.

Інвертор виконує поставлене завдання: напруга і струм надходять на обмотки двигуна. Регулятор струму керує струмом статора вздовж осі x таким чином, що швидше виконати завдання при обмеженні струму на прийнятному рівні.

Сигнал зворотного зв'язку для фактичного струму статора квантується і затримується після обробки до заздалегідь узгодженого значення і відправляється в блок *ABC to xy conversion*, в якому перетворюється в двофазний і перетворюється в обертову систему координат. Схема моделі блоку показана на рисунку 3.22.

Сигнали зворотного зв'язку, отримані (по своїм осям), квантовані за рівнями і затримані під час обробки, надходять в схему порівняння зі заданими значеннями, встановленими в регуляторах струму.

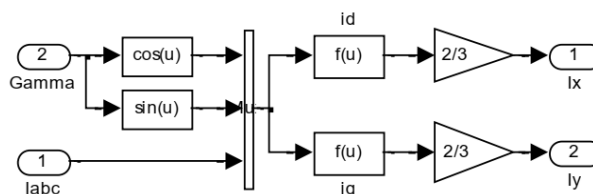


Рисунок 3.22 – Схема моделі блоку *ABC to xy conversion*

Оскільки елемент зворотного зв'язку по магнітному потоку відсутній, схема намагнічування двигуна повинна бути змодельована відповідно до розрахунку схеми заміщення. Модель схеми намагнічування двигуна показана на рисунку 3.23.

Модель розрахунку потоку складається відповідно до наступної формули

$$\psi_{rx} = \frac{1}{1 + T_r s} \cdot T_r k_r R_r \cdot i_{sx}.$$

Єдина відмінність полягає в тому, що вона має коефіцієнт зворотного зв'язку для перетворення струму в машині i_{sx} в абсолютне значення. Сигнал, що генерується на виході цього блоку, використовується в якості зворотного зв'язку за потоком в контурі потоку.

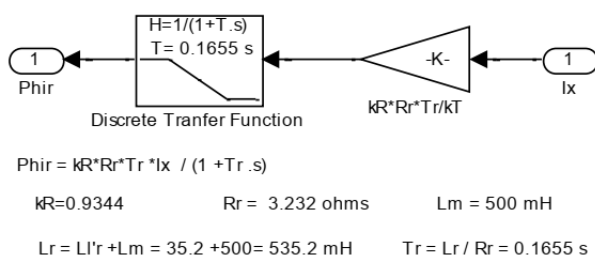


Рисунок 3.23 – Схема моделі ланцюга намагнічування двигуна

Квантування та запізнення, введені в контур зворотного зв'язку, характеризують час, витрачений на обчислення моделі з певною точністю.

Останній блок *Edit Scope*, який включений в схему керування приводом *Vector Control*, дозволяє відкрити головне меню графічних діаграм, створених в процесі моделювання.

У головному меню відображаються всі функції редагування та обробки, які *Simulink* надає для створеної діаграми. Щоб відкрити меню, необхідно відкрити порожній екран *Scope* і запустити моделювання. Результати моделювання та головне меню відображаються на екрані.

Найбільш напруженим режимом роботи приводу є генераторний (рекуперативний). Ємність конденсатора *C1* встановлена рівною 300 мкФ. Програма для керування частотою обертання і активним моментом вводиться в таймери *Timer1* і *Timer Timer*, як показано на рисунку 3.24.

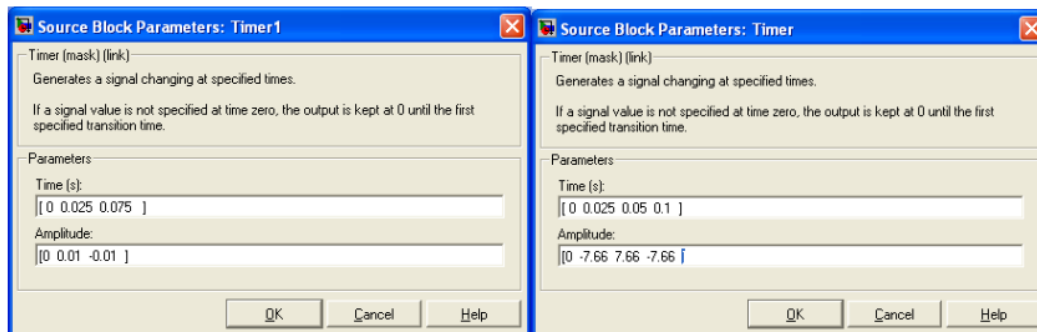


Рисунок 3.24 – Часові програми керування частотою обертання та активним моментом опору

На рисунку 3.25 показані результати моделювання роботи електроприводу з векторним керуванням з повністю необхідним обладнанням.

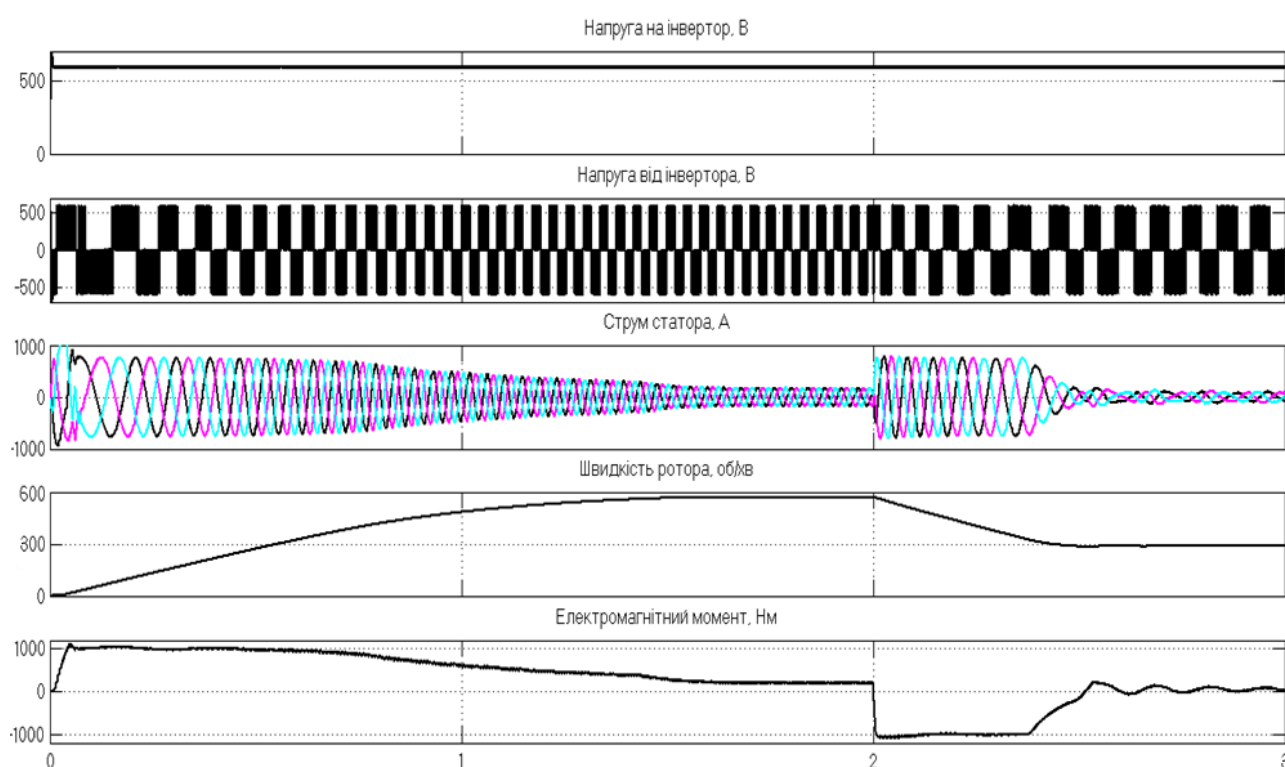


Рисунок 3.25 – Результати моделювання електроприводу з векторним керуванням при роботі на активне навантаження при переході з великої на середню швидкість

Висновки:

1. В порівнянні зі скалярним законом керування характер реакції приводу на керування та збурення принципово інший, в перехідних процесах підтримується постійний обертальний момент.

2. Перерегулювання стало чітко вираженим фактом і є наслідком дії активного моменту. Однак завдання щодо частоти обертання виконується досить акуратно, хоча через великі перерегулювання чіткість відпрацювання заданої частоти обертання в цьому масштабі дещо розмита.

3. Напруга джерела живлення вибирається у 600 В, за винятком моменту включення приводу до мережі.

Як видно з результатів моделювання, розроблений електропривод впевнено працює у діапазоні 1:1000 з різним характером навантаження, при впливі навантаження номінального значення астатичні властивості системи не порушуються у всьому діапазоні частоти обертання.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У кваліфікаційній роботі розглянутий автоматизований електропривод ротора вагоноперекидача. Для реалізації даного рішення власник залучає власні кошти, несе витрати з розробки, впровадження та експлуатації нової розробки.

Головний шлях до якісного зсуву у виробничих силах – перехід до якісного інтенсивного розвитку, для реалізації якого необхідні значні зусилля з створення машин, механізмів і технологій з впровадження в практику досягнень науки та техніки. При цьому особливого значення набувають вибір найбільш надійних шляхів підвищення ефективності виробництва, якості продукції, принципи наукового обґрунтованого ціноутворення.

Модернізація електроприводу ротора вагоноперекидача виконується за рахунок заміни базової системи електроприводу на основі електродвигунів постійного струму на систему асинхронного електроприводу з перетворювача частоти (АД-ПЧ). В порівнянні з базовою системою керування нова система має такі переваги:

- а) покращення показників економії електроенергії;
- б) зменшення похибки керування;
- в) підвищенням ефективності та надійності системи;

Визначимо ефективність застосування нової системи керування електроприводу шляхом співставлення показників базового і нового варіантів.

При співставленні варіантів технічних рішень з впровадження нових видів обладнання і технологічних процесів використовують метод порівняльної економічної ефективності. При цьому методі основними показниками є мінімум приведених затрат Z , який є сумою річних експлуатаційних затрат C і капітальних вкладень K , приведених до однієї розмірності в відповідність з нормативним коефіцієнтом ефективності E_n .

Капітальні вкладення включають в себе всі одноразові витрати: відпускну ціну нової техніки, затрати на її транспортування, монтаж і наладку, затрати на демонтаж старого обладнання та інше.

$$З = C + E_n \cdot K, \quad (4.1)$$

де $E_n = 0,08 \dots 0,15$ (для нової техніки $E_n = 0,15$).

Повні економічні витрати:

$$З_e = З_{en} + З_{op} + З_{ab} + З_{mb}, \quad (4.2)$$

де індекси b і n відносяться до базового і нового варіантів.

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K_n - K_b}{З_b - З_n}, \quad (4.3)$$

де $T_{ок}$ – термін окупності додаткових капітальних вкладень, років.

4.1 Визначення величини капітальних витрат нового варіанту

Кошторис на обладнання для базового і нового варіантів наведений в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Визначення кошторису витрат для нового і старого варіантів

Найменування електрообладнання	Кількість, шт.	Кошторисна вартість			
		Базова		Нова	
		за шт.,	Всього,	за шт.,	Всього,
		грн	грн	грн	грн
Релейно-контакторна система	1	30000	30000	-	-
Двигун МТВ-613-10	2	103200	206400	-	-
Двигун 5AM315S10Y2	2	-	-	127692	255384
Перетворювач частоти Siemens S150 5SL3710-7LE35-0AA3	1	-	-	2273000	2273000
Всього			236400		2528384
Транспортні витрати (13 %)			30732		328690
Всього ціна обладнання			267132		2857074
Монтажні роботи (10 %)			26713,2		285707,4
Капітальні вкладення, всього			293845,2		3142781,4

4.2 Розрахунок фонду заробітної плати

Розрахуємо оплату праці по існуючому тарифу. Так як установка є установкою з напругою до 1000 В, де напруга живлення $U = 0,4$ кВ, то згідно ПУЕ обслуговувати дану установку може 2 робітники, у яких розряд не нижче п'ятого, а група допуску не нижче, ніж третя по електробезпеці.

Постійна заробітна плата електромеханіка 5-го розряду по існуючому тарифу складає

$$З_{\text{т}} = 25500 \text{ грн.} \quad (4/4)$$

Оплата праці за шкідливі умови праці:

$$П_{\text{у}} = З_{\text{т}} \cdot H_{\text{уп}} = 25500 \cdot 0,04 = 1020 \text{ грн} \quad (4.4)$$

де $H_{\text{уп}}$ – надбавка за умови праці, що для четвертого розряду складає 4 %.

Всього постійна заробітна плата 1 робітника складає:

$$З_{\text{пост}} = З_{\text{т}} + П_{\text{уп}} = 25500 + 1020 = 26520 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Оплата премій $K_{\text{п}} = 15 \dots 20\%$.

$$П_{\text{пр}} = \frac{З_{\text{т}} \cdot K_{\text{п}}}{100} = \frac{26520 \cdot 15}{100} = 3978 \text{ грн.} \quad (4.9)$$

Всього основна заробітна плата:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{пост}} + П_{\text{пр}} = 26520 + 3978 = 30498 \text{ грн.} \quad (4.10)$$

Розрахуємо додаткову заробітну плату:

$$З_{\text{дод}} = З_{\text{т}} \cdot 0,1 = 25500 \cdot 0,1 = 2550 \text{ грн.} \quad (4.11)$$

Знайдемо відрахування на єдиний соціальний внесок, що складають 22 % від суми додаткової та основної заробітної плати.

$$Z_{\text{вв}} = 0,22 \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}) = 0,22 \cdot (30498 + 2550) = 7270,56 \text{ грн.} \quad (4.12)$$

Загальний фонд оплати праці 2 працівників складає:

$$\Phi = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}} + Z_{\text{вв}}) \cdot 2 \cdot 12 = (30498 + 2550 + 7270,56) \cdot 2 \cdot 12 = 967645,44 \text{ грн.} \quad (4.13)$$

4.3 Розрахунок експлуатаційних витрат для базового і нового варіантів

Розмір капіталовкладень для базового і нового варіантів:

$$K_{\text{б}} = 293845,2 \text{ грн,} \quad K_{\text{н}} = 3142781,4 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію при встановленні перетворювача частоти зменшується на 30 %:

$$Z_{\text{енб}} = P \cdot \Phi \cdot m_0 \cdot K, \quad (4.14)$$

де $P = 110 \text{ кВт}$ – сумарна потужність двигунів;

$\Phi = 10 \text{ год}$ – кількість робочих годин в день при ПВ = 40 %;

$m_0 = 335$ – кількість робочих днів у році;

$K = 6,95 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$ – вартість електроенергії.

Для привода ротора вагоноперекидача:

$$Z_{\text{енб}} = 110 \cdot 10 \cdot 335 \cdot 6,95 = 2561075 \text{ грн,}$$

$$Z_{\text{енн}} = Z_{\text{енб}} - 0,3 \cdot Z_{\text{енб}} = 2561075 - 0,3 \cdot 2561075 = 1792752,5 \text{ грн.} \quad (4.15)$$

4.4 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

При використанні частотного перетворювача можлива безперервна робота електродвигуна, зменшуються пускові струми, втрати в кабелях, збільшується

надійність всієї установки, тобто кількість поломок зменшується, а отже надійність системи електроприводу зростає. Заплановані витрати на поточний ремонт і обслуговування при базовому варіанті становлять 10 %, а при новому 3 %.

$$Z_{\text{бр}} = 0,1 \cdot K_{\text{б}} = 0,1 \cdot 293845,2 = 29384,52 \text{ грн.} \quad (4.16)$$

$$Z_{\text{нр}} = 0,03 \cdot K_{\text{н}} = 0,03 \cdot 3142781,4 = 94283,44 \text{ грн.} \quad (4.17)$$

Витрати на амортизаційні відрахування:

$$Z_a = \sum N_{ai} \cdot K_i, \quad (4.18)$$

$$Z_{\text{аб}} = 0,5 \cdot 293845,2 = 146922,6 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{ан}} = 0,5 \cdot 3142781,4 = 1571390,7 \text{ грн.}$$

де N_a – норма амортизаційних відрахувань;

Витрати на допоміжні матеріали для ремонту та обслуговування при базовому варіанті складають 20 %, а при новому 5 % від фонду оплати праці:

$$Z_m = 0,2 \cdot \Phi \quad (4.19)$$

$$Z_{\text{мб}} = 0,2 \cdot 967645,44 = 193529,09 \text{ грн.},$$

$$Z_{\text{мн}} = 0,05 \cdot 967645,44 = 48382,27 \text{ грн.}$$

Повні експлуатаційні витрати:

$$Z_e = Z_{\text{ен}} + Z_{\text{бр}} + Z_{\text{аб}} + Z_{\text{мб}} \quad (4.20)$$

$$Z_{\text{еб}} = 2561075 + 29384,52 + 146922,6 + 193529,09 = 2930911,21 \text{ грн.},$$

$$Z_{\text{ен}} = 1792752,5 + 94283,44 + 1571390,7 + 48382,27 = 3506808,91 \text{ грн.}$$

4.5 Розрахунок економічної ефективності

Розрахуємо річний економічний ефект за експлуатаційними витратами згідно формули (4.2):

$$Z_{ef} = 2930911,21 - 3506808,91 = 575897,71 \text{ грн.}$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{K_n - K_o}{Z_o - Z_n} = \frac{3142781,4 - 293845,2}{2930911,21 - 3506808,91} = 4,95 \text{ років.} \quad (4.21)$$

Отже, модернізація для даного типу обладнання є економічно доцільною. Значний термін окупності пояснюється порівняно невеликою різницею капітальних вкладень для базового та нового варіантів.

З економічної точки зору є окупними обидві системи електропроводу ротора вагоноперекидача, однак релейно-контакторна система є менш надійною і потребує більших витрат на ремонт та обслуговування. Тому вибираємо систему ПЧ-АД з терміном окупності 4,95 років.

5 РЕЗУЛЬТАТИВНА ЧАСТИНА

5.1 Висновки і рекомендації, засновані на рішеннях, прийнятих в ході даного дослідження

У вступі показало, що в даний час до 90 % виробленої електроенергії споживається системами електроприводу, електротехнічними пристроями та освітлювальними установками. Удосконалення систем електроприводу, на які припадає близько 60 % споживаної потужності, дозволяють значно економити енергію, до 80 % в деяких галузях промисловості. Відповідність частоти обертання двигуна частоті обертання робочого механізму може допомогти заощадити енергію і покращити управління технологічним процесом.

Описано технічний процес розвантаження сипучих матеріалів в металургійній промисловості, а також конструкція і технічні характеристики роторного вагоноперекидача типу ВРС-75 (ВРС-120).

Представлені вимоги до модернізації електроприводу ротора вагоноперекидача. Оптимізація режимів розвантаження вагонів досягається модернізацією електропривода ротора вагоноперекидача з використанням системи автоматичного керування з ПЧ для регулювання обертів ротора вагоноперекидача з точністю підтримання обертів $\Delta_{\text{пнас}} = 5 \%$.

Результати розрахунків з визначення потужності приводу дозволили обрати трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором серії 5AM315S10Y2 потужністю 55 кВт і частотою обертання 590 об/хв та перетворювач частоти SIEMENS S150 для керування приводів ротора вагоноперекидача.

В розділі моделювання електроприводу виконано постановку задачі моделювання електроприводу, розрахунок параметрів схеми заміщення і механічних характеристик двигунів ротора вагоноперекидача, а також схему моделювання та результати роботи електроприводу з ПЧ-АД зі скалярним та векторним законами регулювання.

При прямому пуску електроприводу з асинхронним двигуном з урахуванням моменту інерції ротора вагоноперекидача час встановлення

швидкості та моменту при прямому пуску електроприводу становить 1,4 с, електромагнітний момент при пуску досягає приблизно 1200 Н·м, що майже в п'ять разів перевищує номінальне значення, а струм статора при пуску досягає 2400 А, що майже в сім разів перевищує номінальне значення.

При пуску приводу ротора вагоноперекидача з ПЧ час набору швидкості та моменту електропривода становить 1,5 с, пусковий електромагнітний момент зменшився до 1700 Н·м, що майже втричі перевищує номінальне значення, а пусковий струм статора зменшився до 2100 А, що майже в чотири рази перевищує номінальне значення. Перехідні процеси підвищення і зниження частоти на 15 Гц мали плавний характер і тривали біля 0,5 с. Механічні удари електропривода при пуску ротора вагоноперекидача з ПЧ значно менші, ніж при прямому пуску.

Розімкнуті схеми керування електроприводом ротора вагоноперекидача з вибраним перетворювачем частоти та трифазним асинхронним двигуном забезпечують необхідну точність до 5 % в робочому діапазоні регулювання обертів ротора вагоноперекидача при керуванні двигуном за скалярним законом та 1...2 % за векторним законом.

Наведеної розрахунки економічної ефективності модернізації електроприводу ротора вагоноперекидача. Річний економічний ефект від модернізації електроприводу ротора вагоноперекидача становить 575898 грн./рік, що відповідає терміну окупності капітальних витрат $T_{OK} = 4,95$ років.

Таким чином, модернізація електроприводів ротора вагоноперекидача є технічно та економічно доцільною і може бути рекомендована для впровадження в металургійній промисловості України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра за спеціальністю 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа – Одеса: ОНАХТ, 2021. – 55 с.
2. Правила улаштування електроустановок: – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
3. Вагоноперекидачі ВРС-75 (ВРС-120). – URL: <https://metal-make.prom.ua/ua/p213654700-vagonooprokidyvatel-rotornyj-statsionarnyj.html>. Дата звертання 25.05.2024.
4. Електродвигуни 4AM315S10. – URL: <https://nasos-ukraine.com.ua/ua/p129420069-elektrodivigatel-4am315s10-315s10.html>. Дата звертання 25.05.2024.
5. Перетворювач частоти SIEMENS S150. – URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/tekhnohiiyi-pryvodiv/sinamics/peretvoryuvachi-nyzkoyi-napruihy-sinamics/peretvoryuvachi-chastoty-sinamics/sinamics-s150.html/> Дата звертання 25.05.2024.
6. Электротехнический справочник: В 3 т. – М.: Энергоатомиздат. 1986. – Т.2.: Электротехнические изделия и устройства / Под. общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) и др. 1986. – 712 с.
7. Кацман М.М. Электрические машины: Учебник. – М.: Изд. центр «Академия», 2017. – 496 с.
8. Герман-Галкин С.Г. Проектирование механотронных систем на ПК. – СПб.: Корона, 2008. – 346 с.
9. Дьяков В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 286 с.
10. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терехин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 320 с.
11. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

12. Автоматизация фабрик окускования железных руд и концентратов / Н. В. Федоровский, В. В. Даньшин, В. И. Губанов, Р. И. Сигуа. – М. : Металлургия, 1986. – 339 с.

13. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т.2. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов: Учеб. для вузов /А.И. Целиков, П.И. Нолухин, В.М. Гребеник и др. – М.: Металлургия, 1978. – 328 с.