

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут  
Кафедра Кафедра електричної інженерії та автоматизації  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Форма навчання денна  
(денна або заочна форма навчання)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
МАГІСТРА**

Гузек Руслан Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему Електромеханічне обладнання металургійного  
виробництва. Регульований електропривод конвеєра  
агломераційного виробництва

(повна назва теми)

за матеріалами

(повна назва бази дослідження)

науковий  
керівник

доцент, к.п.н.

(наук. ступінь, вчене звання)

Модло Є.О.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

**Робота допущена до захисту в ЕК**

Протокол засідання кафедри

від \_\_\_\_\_ 2026 р. № \_\_\_\_

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

к.п.н. Є.О. Модло

наук. ступінь, вчене звання

ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,  
прізвище ініціали)

«\_\_\_\_\_» 2025 року

**ЗАВДАННЯ**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА СТУДЕНТУ(КИ)**

Гузек Руслан Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи магістра Електромеханічне обладнання металургійного виробництва. Регульований електропривод конвеєра агломераційного виробництва

керівник кваліфікаційної роботи Модло Євгеній Олександрович, к.п.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «20»10.2025 р. № 726-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 08.01.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи магістра: статті, патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження – електропривод агломераційної машини

Характер навантаження – активно-реактивне з переважанням активної складової, навантаження змінне, з можливими: піковими перевантаженнями при пуску; коливаннями моменту через нерівномірний розподіл шихти; збільшенням моменту при залипанні або зволоженні матеріалу.

Тип системи електроприводу: регульований електропривод змінного струму. Тип двигуна: асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (у сучасних системах – з частотним перетворювачем), режим роботи електропривода - тривалий режим роботи S1, тиристорний перетворювач – нереверсивний, напруга змінного струму 10 кВт та 380 В, відхилення напруги мережі +10 %, - 15 %, частоти мережі 50 Гц±2 %,

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

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 Загальний вигляд механізму

2 Кінематична схема

3 Принципова схема

4 Функціональна схема

5 Структурна схема

6 Структурна схема нелінійної САР РЕП

7 Моделювання нелінійної САР РЕП

## 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Аналітична частина	<i>Модло Є.О., доцент</i>		
2 Основна частина	<i>Модло Є.О., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.11.2025	
2.	Основна частина	06.12.2025	
3.	Оформлення пояснювальної записки	13.12.2025	
4.	Виконання графічної частини	25.12.2025	
5.	Подання роботи до кафедри	08.01.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	21.01.2026	

Студент

\_\_\_\_\_ *Гузек Р.М.*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ *Модло Є.О.*  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## ВСТУП

Основним виробничим агрегатом агломераційної фабрики є агломераційна машина, яка призначена для отримання агломерату шляхом окусування (спекання) дрібних залізних руд з одночасним частковим очищенням їх від шкідливих домішок. Функціонування підприємств гірничо-металургійного комплексу значною мірою залежить від стабільності та ефективності транспортних механізмів, що забезпечують безперервність технологічних процесів. В агломераційному виробництві конвеєрні установки виконують ключову роль у переміщенні шихтових матеріалів та агломерату між окремими стадіями технологічного циклу. Від режимів їх роботи залежать продуктивність обладнання, енерговитрати та рівень технічної надійності агломераційних фабрик. У більшості діючих агломераційних цехів експлуатуються електроприводи з обмеженими можливостями регулювання, що не дозволяє повною мірою враховувати змінні навантаження та специфіку технологічного процесу. Робота конвеєрів у таких умовах супроводжується підвищеними пусковими струмами, механічними перевантаженнями та нераціональним використанням електричної енергії. Це зумовлює необхідність переходу до сучасних систем електропривода з розширеними функціями керування. Застосування регульованого електропривода на основі частотного керування асинхронними електродвигунами створює можливість гнучкого налаштування швидкісних режимів конвеєра відповідно до фактичних умов роботи. Такий підхід забезпечує зменшення динамічних навантажень у механічній частині привода, підвищення ресурсу обладнання та зниження питомих витрат електроенергії. Крім того, впровадження регульованих електроприводів сприяє підвищенню рівня автоматизації та керованості технологічних процесів агломераційного виробництва. В умовах зростання вартості енергоресурсів та необхідності модернізації промислового обладнання питання впровадження енергоефективних систем електропривода набуває особливої актуальності. Розробка технічних рішень, спрямованих на

оптимізацію роботи конвеєрів агломераційного виробництва, відповідає сучасним тенденціям розвитку електропривода та промислової автоматизації.

Метою магістерської роботи є розробка та дослідження регульованого електропривода конвеєра агломераційного виробництва з урахуванням технологічних вимог, умов експлуатації та показників енергоефективності. Досягнення поставленої мети передбачає аналіз існуючих схем електропривода, вибір оптимальної структури системи керування та оцінку ефективності запропонованого технічного рішення.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Основні відомості про технологічний процес, технологічний механізм, загальний вид, кінематика і режим роботи

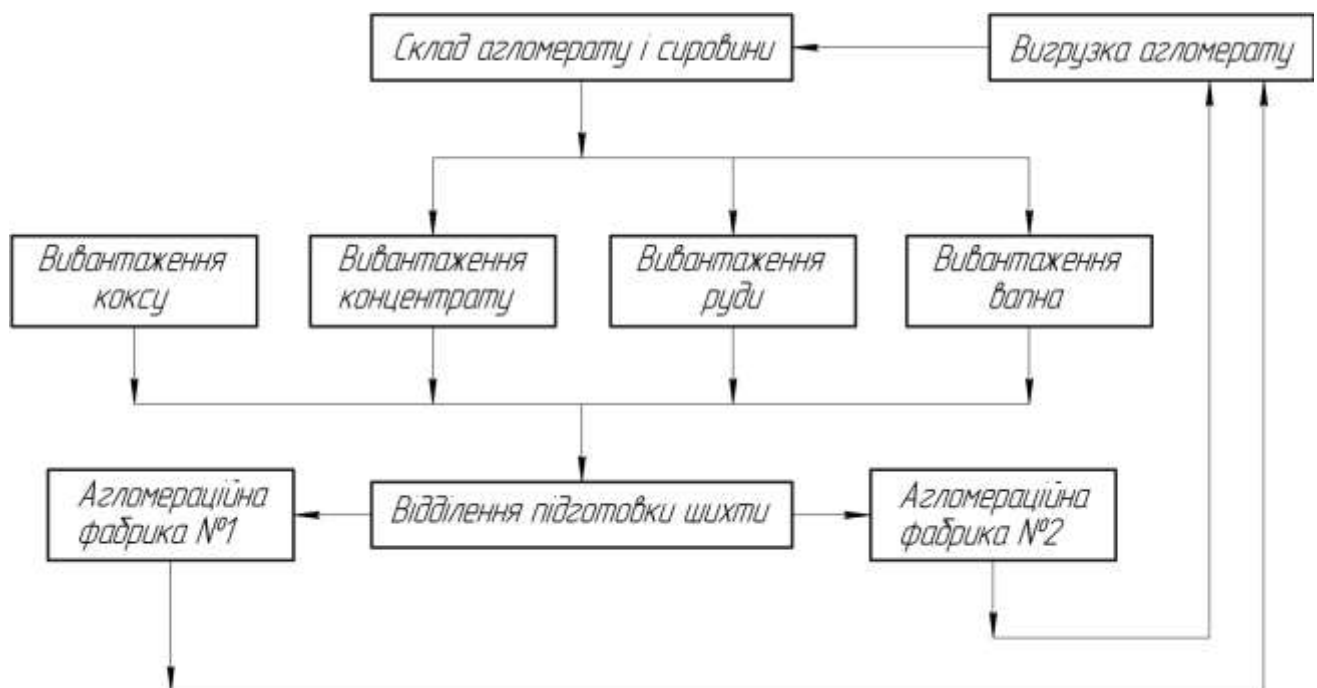
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним із найбільших підприємств гірничо-металургійного комплексу України, у складі якого функціонує агломераційне виробництво, призначене для підготовки залізорудної сировини до подальшої переробки в доменному цеху. Основним завданням агломераційного процесу є отримання агломерату з необхідними фізико-механічними та хімічними властивостями шляхом спікання дрібнодисперсної залізорудної сировини з додаванням флюсів і палива.

Ключовим агрегатом агломераційного цеху є агломераційна машина стрічкового типу, яка забезпечує безперервність процесу спікання та транспортування матеріалу вздовж технологічної лінії. Робота агломашини відбувається в складних умовах, що характеризуються високими температурами, запиленістю та значними механічними навантаженнями, що висуває підвищені вимоги до надійності її механізмів і систем електропривода.

Вихідною сировиною для виробництва агломерату служить концентрат ГЗК, агломераційна руда шахтоуправління та основна частина - утилізовані відходи виробництва: шлами, шлаки, відсів, колошниковий та вапняний пил та ін. Отриманий агломерат надходить у доменний цех № 1 комбінату.

Агломераційний цех [1] (рис. 1.1) складається з шихтового і двох спікних відділень, складів привізної сировини і готової продукції. Основне завдання, виробництво доменного агломерату. Виробнича потужність 5 млн.т. у рік. Шихтове відділення розраховане на переробку чотирьох компонентів шихти: залізорудний концентрат виробництва РЗФ-1, аглоруда, вапняк і тверде паливо. Кожне спікне відділення оснащено п'ятьма агломашинами моделі К-1. Для відсмоктування технологічних газів встановлені екстаустери Д-6500. Запалення шихти проводиться газовим горном, що працює на суміші газів з

теплотворною здатністю близько 3000 ккал/м<sup>3</sup>. Склади сировини і готової продукції траншейного типу, обладнані рудними перевантажувачами (РП), вантажопідйомністю 30 т. Сировина потрапляє в агломераційний залізничним транспортом. Потім проводиться вивантаження електромостовими кранами вантажопідйомністю 16 т. Передається конвеєрним транспортом в шихтове відділення фабрики № 3 (продуктивність конвеєра 870 т/г), де матеріали дозуються в певних пропорціях за допомогою стрічкових і тарільчастих дозаторів. Готова шихта поступає на 1 і 2 фабрику, де відбувається первинне і вторинне змішування в барабанах змішувачів. Шихта шляхом пересувної автостели завантажується в бункери агломераційних машин, звідки за допомогою барабанного живильника шихти і човникового розподільника завантажується на стрічку агломераційної машини К-1-75 (продуктивність 105 т/г). Після закінчення процесу спікання готовий агломерат розвантажується в хвостовій частині де агломашини в аглодробилку, де подрібнюється і розподіляється на стаціонарному грохоті.



**Рис.1.1. Структура агломераційного цеху**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Агломерат крупністю 25 мм і вище, шляхом перекидних жолобів, завантажується в хопери і вирушає на склад агломерату, вивантажується в траншею і перевантажується РП (продуктивністю 500 т/г) в залізничні вагони і відправляється споживачеві. Частина крупністю менше 25 мм, повертається і повторно використовується в технологічному процесі.

Асортимент продукції комбінату, що випускається: агломерат залізорудний неофлюсований; агломерат залізорудний офлюсований; агломерат залізорудний марганцовистий (високоосновний); агломерат залізорудний марганцовистий (офлюсований); концентрат залізорудний; пісок з відсіву дроблення скельних порід; сланцеві породи; щебінь.

Сутність процесу агломерації зводиться до спікання на агломераційних машинах вихідної сировини, змішаної з паливом і різними добавками (вапняком, доломітом тощо), що прискорюють процес спікання. У процесі агломерації з руди видаляються шкідливі для чавуну домішки (сірки, фосфору, миш'яку тощо). Застосування агломерату прискорює процес плавки чавуну в доменних печах, при цьому знижується витрата коксу, а продуктивність доменної печі підвищується на 15-20%.

### **Технологічна схема виробництва агломерату**

На сучасну агломераційну фабрику для приготування шихти поступають: рудні компоненти, колошниковий пил і паливо (рис. 1.2). При виробництві офлюсованого агломерату поступає додатково флюс у вигляді вапняку, доломіту або магнезиту. Часто рудні компоненти і шихта мають необхідну крупність. Паливо і флюс мають завищену крупність, а тому для їх підготовки до необхідної крупності застосовують операції дроблення, грохочення і подрібнення. Підготовлені компоненти до необхідної крупності поступають в спеціальні бункери - силоси, звідки дозуються в заданому співвідношенні для приготування шихти. Змішення відбувається залежно від крупності компонентів в одну або дві ступені. Після чого отримана шихта направляється на агломерацію. Готовий агломерат піддається дробленню і грохоченню. Гаряче повернення застосовують для інтенсифікації процесу (підігріву шихти) і

направляють в операцію змішення. Готовий же за крупністю агломерат охолоджують, повторно класифікують, де з нього виділяється постіль, що направляється на агломерацію, і новоутворений дріб'язок. Готовий за крупністю і охолоджений агломерат направляють на склад готової продукції, або безпосередньо в металургійний цех на плавку.

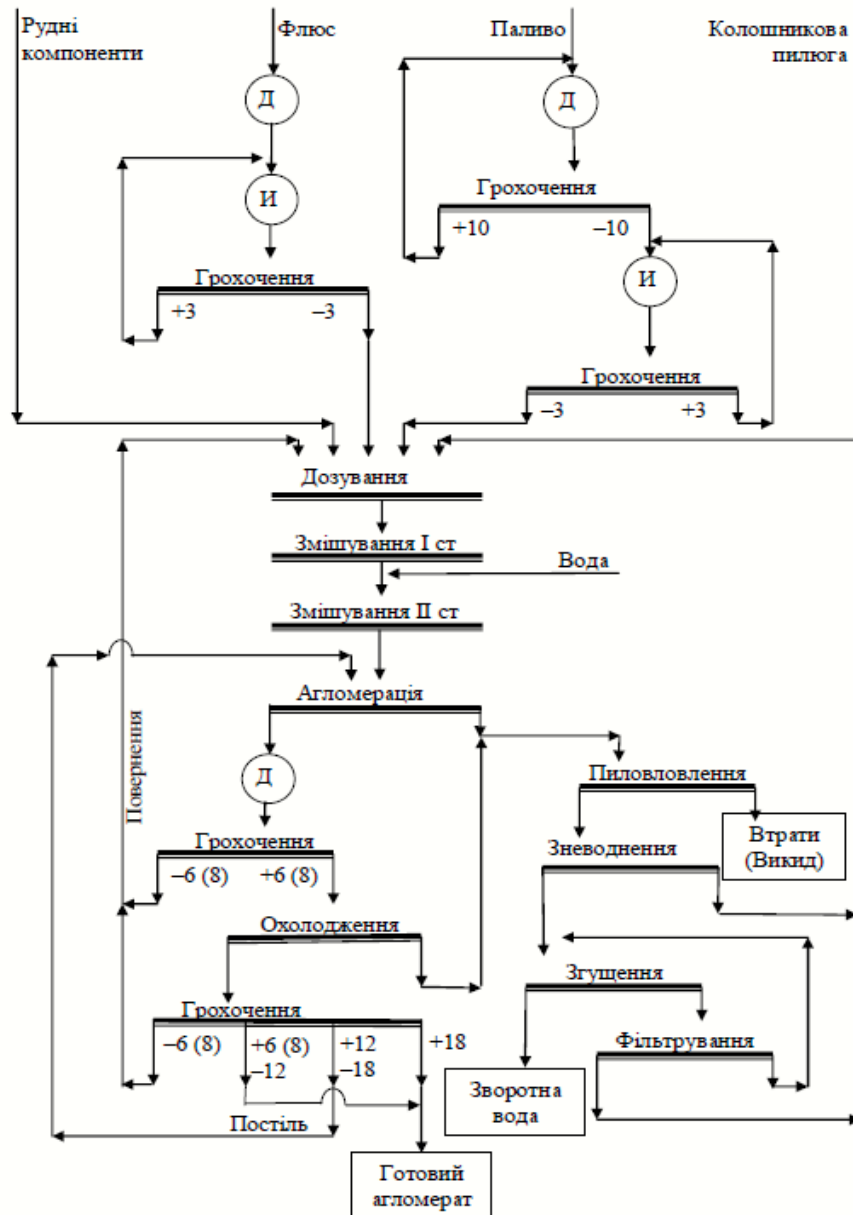


Рис. 1.2. Технологічна схема виробництва агломерату

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

## 1.2 Загальна характеристика об'єкта управління. Пристрій та принцип роботи агломашини

Агломераційна машина являє собою складний технологічний механізм безперервної дії, призначений для спікання агломераційної шихти на рухомій колосниковій стрічці. Вона складається з ряду послідовно з'єднаних візків (палет), які утворюють замкнену стрічку та переміщуються по напрямних уздовж робочої і зворотної гілок машини. У процесі роботи на робочій гілці агломашини відбувається завантаження шихти, її запалювання, спікання під дією розрідження, охолодження та подальше розвантаження агломерату. Переміщення палет забезпечується приводним механізмом, який передає крутний момент від електродвигуна до головного приводного вала.

Конструктивно агломераційна машина включає такі основні вузли:

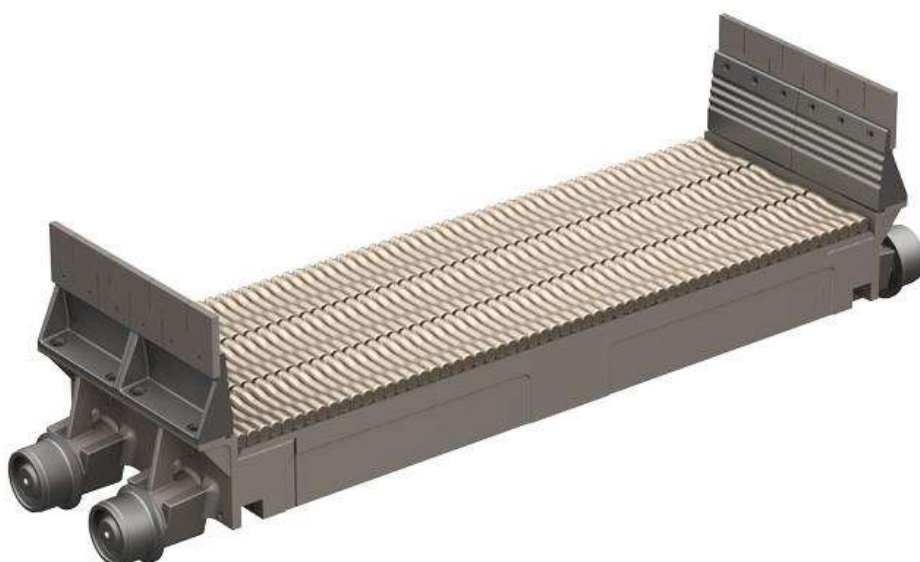
- станину та металоконструкції, що сприймають основні навантаження;
- колосникові візки з жаростійкими ґратами;
- приводну та натяжну станції;
- систему напрямних роликів;
- механізми завантаження і розвантаження матеріалу;
- системи аспірації та вакуумування.

Приводна станція розміщується, як правило, на головному кінці агломашини та включає електродвигун, редуктор, з'єднувальні муфти та приводні зірочки або барабани. Загальний вигляд механізму визначається значною довжиною машини та масивністю її конструктивних елементів, що зумовлено безперервним характером роботи і великими масами переміщуваного матеріалу. Агломераційна машина (рис.1.3) - це конвеєр, не пов'язаних між собою спікальних візків 1 з колосниками, що рухаються по замкнутих напрямних шляхах. На верхніх і нижніх шляхах візки рухаються щільно притиснутими один до одного, утворюючи робочу і холосту гілки. Рух на робочій гілці здійснюється за рахунок їх підйому з холостої гілки і проштовхування приводними зірочками 7. На початку робочої гілки конвеєра на рухомі візки укладається живильниками 2 підстилка (підстилковий матеріал), що складається з великих

кусків руди, а потім основна шихта живильником 3 (одним або двома) шаром 350 – 500 мм. При русі візків під горном 4 під впливом факела газових пальників тверде паливо (коксик) в поверхневому шарі запалюється. Температура в осередку горіння до 1450 °С забезпечує розплавлення флюсів. Під шаром шихти у вакуумних камерах 5 створюється розрідження, завдяки чому продукти згоряння проходять через шихту, запалюючи нижні частинки твердого палива. Гази через вакуумні камери, газові тракти та пиловловлювачі 6 відводять у димову трубу 9. Необхідне для цього розрідження 10-25 кПа створюється нагнітачем (екгаустером) 8. Охолодження розплавленої маси призводить до спікання «пирога» агломерату. Отриманий гарячий агломерат після розвантаження з машини з температурою до 800-900 °С піддається дробленню в одновалковій дробарці і сортуванню на грохоті за крупністю (грохотінні) з метою виділення з агломерату дрібниці з розмірами менше 5,0 мм. Охолодження агломерату до температури 100 °С здійснюють на лінійних, кільцевих або чашкових охолоджувачах за рахунок примусової подачі холодного повітря в шар агломерату. Після сортування кондиційний агломерат відправляють в доменний цех. На рисунках 1.4-1.5 представлено загальний вигляд агломераційної машини. Стрічка агломашини складається з комплекту із 135 спікальних візків (ТСГ-4). Кожний візок (рис. 1.6) представляє собою литий трьохсекційний корпус (4), снабжений бортами (1) і (2), чотирма ходовими (8) і чотирма вантажними (10) роликми, встановленими на осях (12), запресованих у відповідні приливи корпусу (4). Нижня частина бортів (1) виготовлена із сталі, верхня — із жаростійкого чугуна. З'єднання бортів і секцій корпусу — болтові. Ролики (8) і (10) встановлені на роликоті підшипниках (9) і (11), змазують наби-вкою, а також через спеціальні ковпачкові маслянки (7), вбудовані у кришки (6). Ходові ролики (8) служать для переміщення візків на прямих ділянках шляху. Вантажні ролики (10) служать для піднімання візків зубцями зірок привода на верхній горизонтальний шлях і для плавного спуску візків зубцями зірок розвантажувальної частини на нижній шлях. Рухаючись візок пластинами (3) контактує з пластинами прокольного ущільнення.



Сучасна агломераційна машина



Спикальний візок

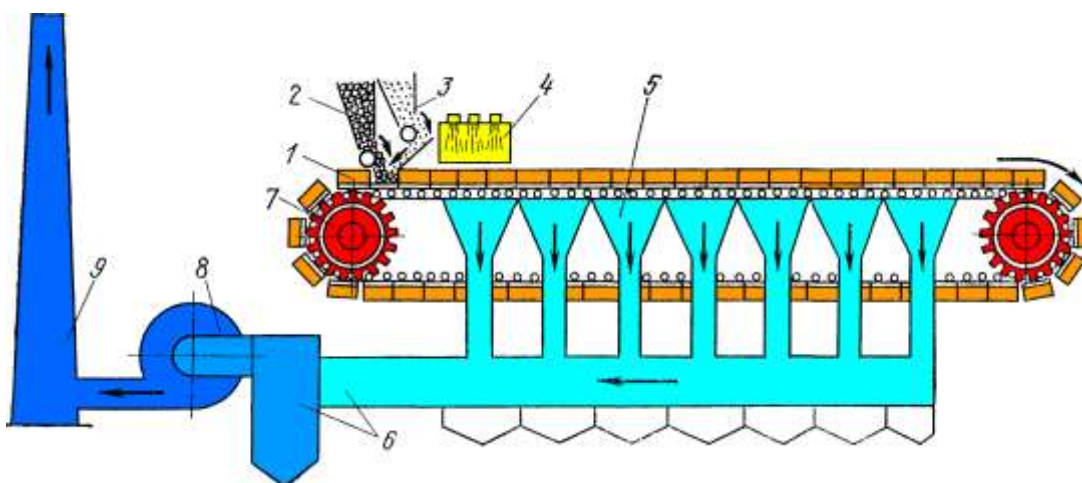
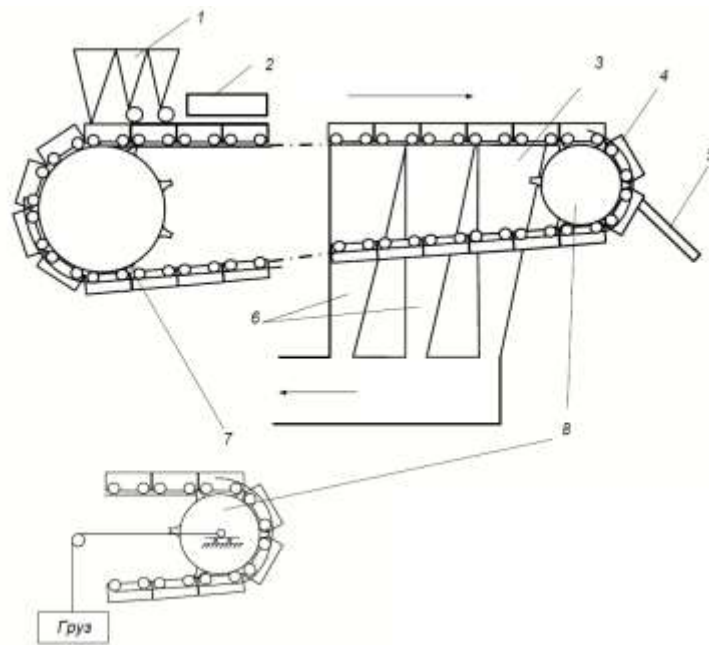


Рис.1.3. Принципова схема агломераційної конвєрної машини

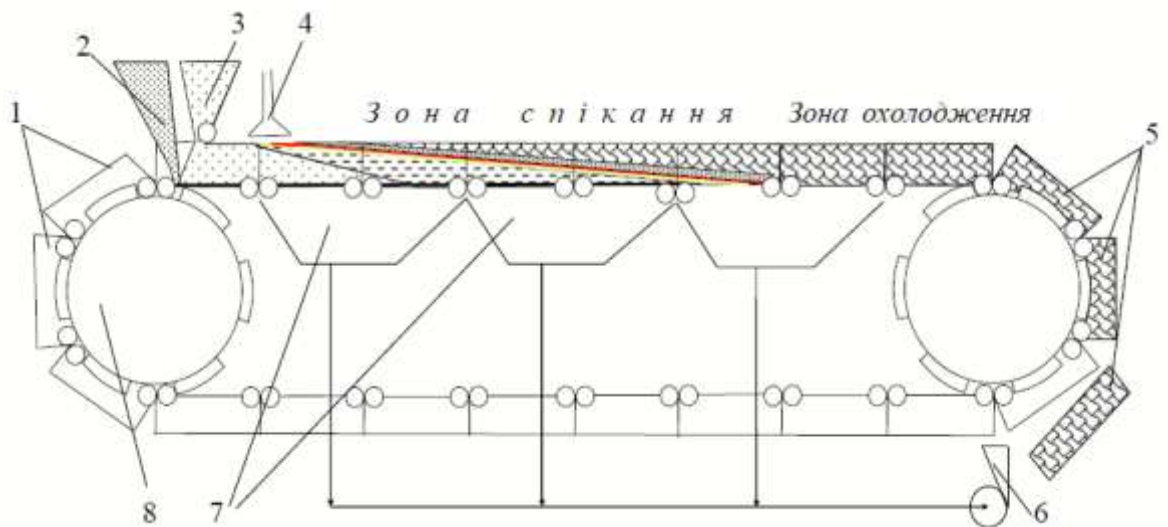
Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]



1 – бункера завантаження агломераційної машини; 2 - запальний горн;  
 3 – газовий колектор; 4 – спікальний візок (палета); 5 – приймальна плита дробарки; 6 – вакуум-камери; 7 – привідна зірочка; 8 – розвантажувальна зірочка

**Рис. 1.4. Загальний вигляд механізму агломашини**

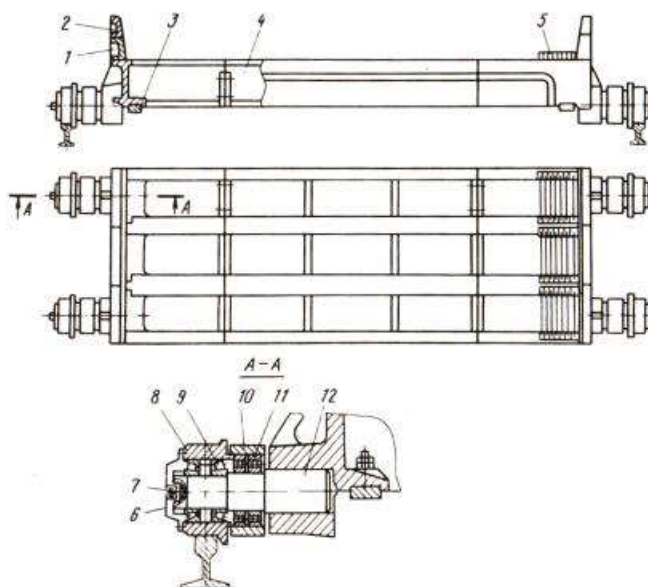
Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]



1 – візки (палети) для спікання шихти з колосниковими решітками; 2 – укладач постелі; 3 – укладач шихти; 4 – запальний горн; 5 – готовий агломерат; 6 – ексаустер (витяжний вентилятор-газовсмоктувач); 7 – вакуум-камери; 8 – провідна зірочка привода агломераційної стрічки

**Рис. 1.5. Схема стрічкової агломераційної машини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

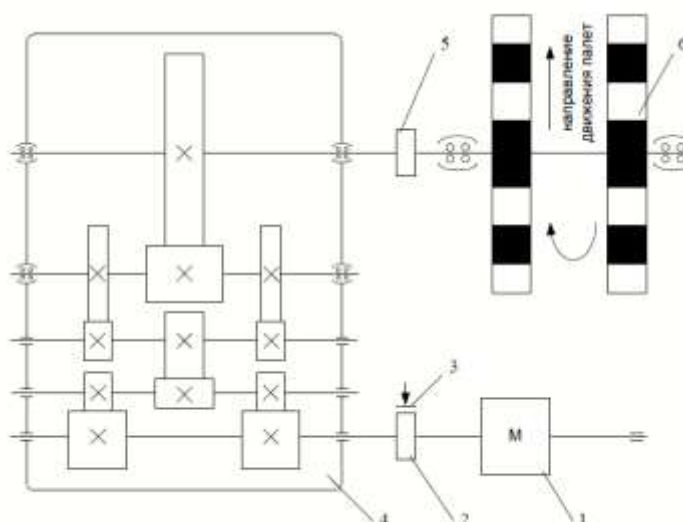


**Рис.1.6. Спікальний візок агломашини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

*Кінематична схема механізму*

Кінематична схема механізму агломашини представлена на рисунку 1.7



1 - двигун, 2 - електромагнітна муфта, 3 - електромагнітне гальмо, 4 - чотириступінчастий редуктор, 5 - муфта і 6 - палета

**Рис.1.7. Кінематична схема механізму агломашини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Кінематична схема агломераційної машини передбачає передачу обертального руху від електродвигуна через редуктор до приводного вала, який забезпечує поступальний рух колосникових візків. Рух палет є рівномірним та синхронізованим, що дозволяє підтримувати стабільну товщину шару шихти та однакові умови спікання по всій довжині робочої гілки. Швидкість руху агломераційної стрічки визначається технологічними вимогами та залежить від складу шихти, висоти шару, температурного режиму та продуктивності агрегату. Регулювання швидкості руху стрічки дозволяє впливати на тривалість процесу спікання та якість готового агломерату.

Привід агломераційної машини (рис. 1.8) складається з електродвигуна, редуктора, однієї або двох пар відкритих передач і двох зірочок. Одна з зірочок жорстко посаджена на головний вал машини, інша - жорстко закріплена на барабані, до якого також жорстко зафіксована провідна зірочка. Така конструкція забезпечує одночасне захоплення палети двома зірочками. Регулювання швидкості можливо завдяки застосуванню двигуна постійного струму або вентильних при установці двигунів змінного струму. Разом з двигунами змінного струму використовується індукційна муфта ковзання ІМТ-7. На приводному валу встановлено гальмо. Привід монтується на рамі агломераційної машини [3]



**Рис.1.8. Привід агломераційної машини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Технічні характеристики сучасних агломераційних машин [18] приведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

## Технічні характеристики сучасних агломераційних машин

Технічна характеристика	К-50	К-75	АКМ-192	АКМ-200	АКМ-250	АКМ-312	АКМ-50	АКМ-62	АКМ-75	К-5,2	АКМ-18	АКМ-85/160	АКМ-100	АКМ-105
Площа спікання, м <sup>2</sup>	50	75	192	204	252	312	50	62	75	5,2	18	85	100	105
Ширина шару, що спікається, м	2	2,5	3	4	4	4	2,02	2,5	2,5	0,75	1,5	2,5	2,5	2,5
Товщина шару, що спікається, м	0,3	0,3	0,6	0,3	0,45	0,35	0,35	0,3	0,3	0,35	0,5	0,3	0,3	0,3
Швидкість руху візку для спікання, м/хв.	4,36	4,5	4,5	6,0	6,0	8,0	4,36	4,0	4,0	0,45	0,5	4,0	4,0	4,0
Продуктивність, т/год.	40-90	65-135	220-260	200-240	250-350	400-500	40-90	82	60-90	5,0	25-30	81,3	130	140
Продукт	Fe-агломерат									Fe-окатиші		Mn-агломерат		

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

### 1.3 Обґрунтування вибору типу електропривода. Характеристики електропривода та способи регулювання координат. Коротка технічна характеристика електропривода

#### Вибір виду струму для електропривода агломераційного механізму

Електроприводи агломераційних машин та конвеєрів агломераційного виробництва працюють у важких умовах, що характеризуються тривалими режимами навантаження, високими пусковими моментами, запиленістю та підвищеною температурою навколишнього середовища. За таких умов вирішальне значення має надійність електропривода, простота його обслуговування та енергоефективність.

З урахуванням сучасного стану енергетичного обладнання промислових підприємств доцільним є використання **змінного струму**, оскільки більшість електроустановок металургійних підприємств орієнтовані саме на трифазну мережу змінного струму. Застосування електроприводів змінного струму

дозволяє зменшити кількість перетворювальних ланок, підвищити загальний коефіцієнт корисної дії системи та забезпечити високу експлуатаційну надійність.

### **Порівняльний аналіз електроприводів постійного та змінного струму**

Електроприводи постійного струму традиційно застосовувалися в промислових механізмах, що вимагали широкого та плавного регулювання швидкості. Вони забезпечують добрі динамічні характеристики та простоту реалізації регулювання, проте мають суттєві недоліки, пов'язані з наявністю колекторно-щіткового вузла, підвищеними експлуатаційними витратами та меншою надійністю в умовах запиленого середовища.

Електроприводи змінного струму з частотним керуванням практично усувають зазначені недоліки. Вони мають вищий ресурс роботи, менші вимоги до технічного обслуговування та кращу пристосованість до важких умов експлуатації. Крім того, сучасні частотні перетворювачі дозволяють реалізувати характеристики, близькі до приводів постійного струму, при значно нижчих експлуатаційних витратах.

З урахуванням умов роботи агломераційного виробництва, вимог до надійності та економічної доцільності, електропривод змінного струму з частотним регулюванням є найбільш обґрунтованим рішенням для приводу конвеєра агломашини ПАТ «АМКР».

### **Обґрунтування вибору типу електропривода**

Для приводу конвеєрних механізмів агломераційного виробництва можливе використання як електроприводів постійного струму, так і приводів змінного струму. Однак у сучасних умовах найбільш доцільним є застосування асинхронного електропривода з короткозамкненим ротором, що працює у складі частотно-керованої системи.

Асинхронний електродвигун відзначається простою конструкцією, відсутністю колекторно-щіткового вузла, високою механічною міцністю та стійкістю до перевантажень. У поєднанні з частотним перетворювачем такий

електропривод забезпечує необхідні пускові характеристики, плавне регулювання швидкості та можливість роботи в широкому діапазоні навантажень, що є важливим для агломераційного виробництва.

### **Характеристики електропривода та способи регулювання координат**

Основною регульованою координатою електропривода конвеєра агломашини є кутова швидкість обертання електродвигуна, яка безпосередньо визначає лінійну швидкість руху стрічки. Регулювання швидкості дозволяє змінювати тривалість перебування шихти в зоні спікання та адаптувати процес до змінних технологічних умов. У частотно-регульованому асинхронному електроприводі керування швидкістю здійснюється шляхом зміни частоти та напруги живлення електродвигуна. Найбільш поширеним і доцільним для даного застосування є скалярний закон керування  $U/f = \text{const}$ , який забезпечує стабільність електромагнітного моменту в робочому діапазоні швидкостей та відрізняється простотою реалізації. У разі підвищених вимог до точності підтримання швидкості та динамічних характеристик можливе застосування векторного керування, однак для конвеєрних механізмів агломераційного виробництва, які працюють у відносно сталих режимах, скалярне керування є технічно та економічно обґрунтованим.

### **Вибір виду автоматизації технологічного процесу**

З огляду на безперервний характер агломераційного виробництва та необхідність узгодженої роботи окремих агрегатів, доцільним є використання локальної автоматизованої системи керування електроприводом з інтеграцією у загальну систему автоматизації цеху.

Автоматизація електропривода конвеєра передбачає:

- автоматичний пуск і зупинку механізму;
- підтримання заданої швидкості руху стрічки;
- захист електродвигуна від перевантажень і аварійних режимів;
- контроль основних параметрів роботи.

Реалізація системи керування на базі програмованого логічного контролера та частотного перетворювача забезпечує достатній рівень надійності, гнучкості та можливість подальшої модернізації.

### **Коротка технічна характеристика електропривода**

Електропривод конвеєра агломераційного виробництва ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг» виконаний на базі асинхронного електродвигуна змінного струму з короткозамкненим ротором, що працює у складі частотно-керованої системи. Електропривод призначений для забезпечення безперервного та керованого руху конвеєрного механізму в умовах тривалих навантажень і важкого виробничого середовища.

Живлення електропривода здійснюється від трифазної промислової мережі змінного струму. Регулювання швидкості обертання електродвигуна реалізується шляхом зміни частоти та напруги живлення за допомогою частотного перетворювача зі скалярним законом керування. Такий спосіб регулювання забезпечує плавний пуск, зменшення пускових струмів та стабільну роботу в усталеному режимі. Система керування передбачає автоматичний захист від перевантажень, перегріву та аварійних режимів, а також можливість інтеграції в загальну систему автоматизації агломераційного цеху. Конструкція електропривода відповідає вимогам експлуатації в умовах підвищеної запиленості та температури, забезпечуючи необхідний рівень надійності, енергоефективності та довговічності обладнання.

### **1.4 Умови та режим роботи, вимоги до електроприводу**

Вибір виду струму та типу електроприводу здійснюється виходячи з цілого ряду умов, що пред'являються до режиму роботи виконавчого механізму.

Однією з умов отримання якісного агломерату є забезпечення відповідності між швидкістю руху аглострічки і швидкістю спікання шихти, яка залежить від висоти її шару, вологості, складу та ін. Крім того, швидкість руху

аглострічки повинна бути узгоджена з роботою живильника, що подає на неї шихту.

Електропривод працює в тривалому режимі з можливими короткочасними перевантаженнями, зумовленими змінами технологічного навантаження. Агломераційна машина працює в безперервному режимі з тривалими періодами навантаження.

Основними режимами роботи є пуск, усталений робочий режим та зупинка для технічного обслуговування або ремонту. Найбільш навантаженим є пусковий режим, оскільки в цей момент необхідно подолати значні сили інерції та опору руху колосникової стрічки. Робочий режим характеризується відносно сталою швидкістю руху стрічки та стабільним навантаженням на приводний механізм. У процесі експлуатації можливі короткочасні перевантаження, пов'язані зі зміною властивостей шихти або порушенням рівномірності її подачі. Це обумовлює доцільність застосування регульованого електропривода, який забезпечує адаптацію режимів роботи до реальних умов експлуатації агломашини.

Вимоги до системи електроприводу агломераційної машини:

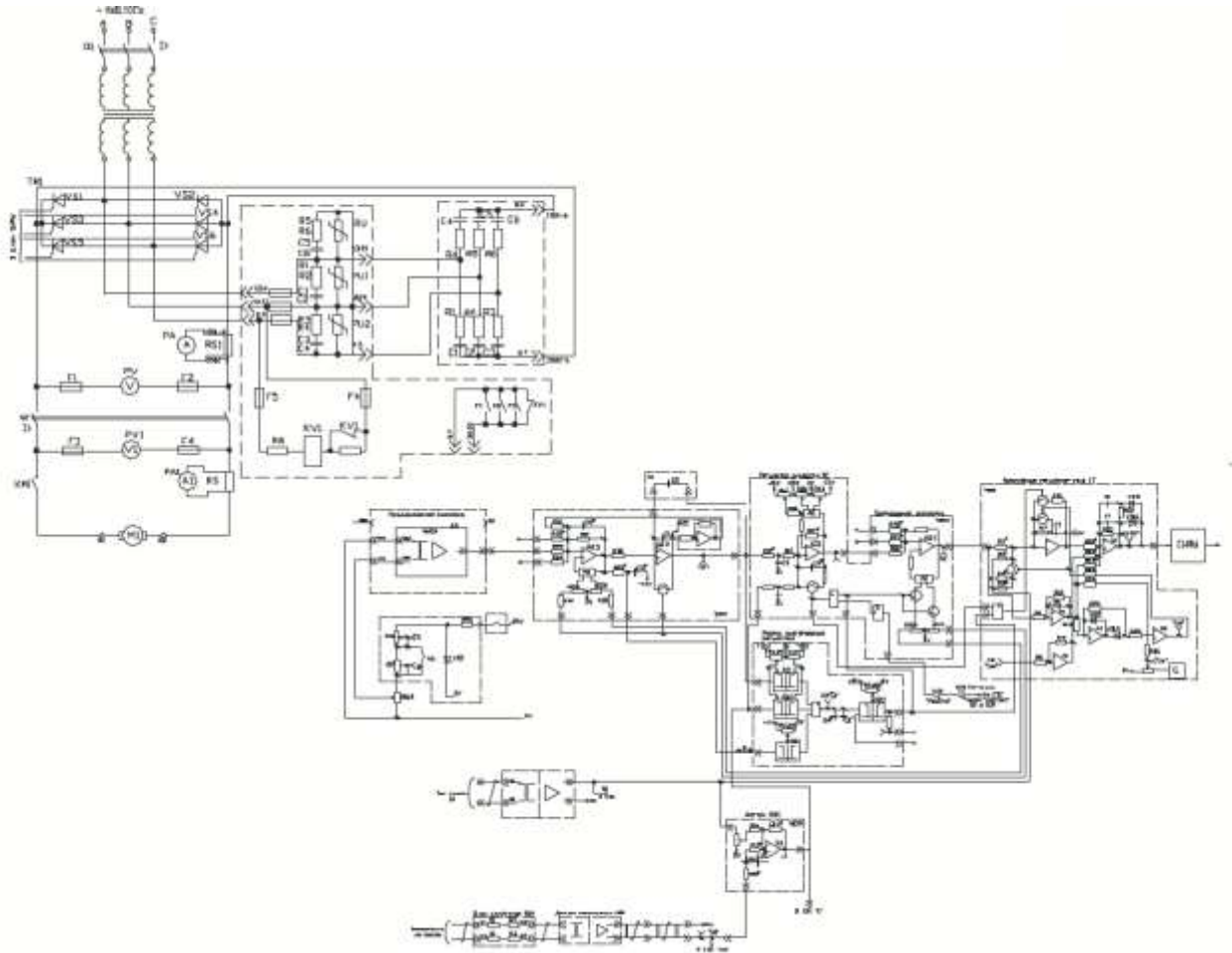
1. Тип струму – постійний;
2. Тиристорний перетворювач неререверсивний;
3. Напруга мережі змінного трифазного струму  $U_c = 6\text{кВ}$  з частотою  $f_c = 50\text{Гц}$ .
4. Відхилення напруги мережі від номінального значення  $+10\%, -15\%$  □
5. Навантаження – реактивне;
6. Робота в тривалому режимі;
7. Максимальна лінійна швидкість  $V_{\text{max}} = 6,9\text{ м/хв}$ .
8. Діапазон регулювання швидкості  $D = 1:10$  □
9. Статична похибка підтримання швидкості обертання не більше  $10\%$ ;
10. Час перехідних процесів не більше  $10\text{ с}$ ;
11. Перерегулювання не більше  $20\%$ ;
10. Сигнал управління - аналоговий  $\pm 10\text{ В}$ ;
11. Допустиме перевантаження двигуна в перехідних режимах:  $I_{\text{max}}/I_{\text{min}} \leq 3.5$ ;

12. Коефіцієнт корисної дії 0,92;
  13. Частота мережі живлення 50 Гц  $\pm 2$  %, якість поданої напруги повинна відповідати ГОСТ13109 – 87;
  14. За захищеністю від проникнення твердих тіл і води технічні засоби електроприводу повинні мати ступінь захисту IP55, згідно з ГОСТ14254 – 80;
  15. За стійкістю до зовнішніх вібраційних впливів апаратура електроприводу повинна відповідати виконанню L3 за ГОСТ12007–84;
  16. Система електроприводу повинна забезпечувати безвідмовну роботу в приміщеннях з наступними умовами: температура навколишнього середовища від 1 до 40°C; відносна вологість від 40 до 80% (при температурі +25°C); атмосферний тиск від 630 до 800 мм.рт.ст.; висота над рівнем моря до 1000 м;
  17. Безперебійна робота електроприводу повинна забезпечуватися за рахунок високої надійності апаратних засобів і правильної експлуатації.
- Гарантійний термін роботи 4000-6500 год.;
18. Термін служби не менше 20 років;
  19. Конструкція системи повинна забезпечувати легкий доступ до будь-якого її елемента, а також можливість швидкої заміни модуля, що вийшов з ладу.
  20. Вимоги щодо безпеки використання електроприводу повинні відповідати ГОСТ25.861 – 83;
  21. Всі елементи, що знаходяться під напругою, повинні мати захист від випадкового контакту, а також заземлення або занулення відповідно до ГОСТ12.1030-81;
  22. Рівень повітряного шуму під час роботи системи не повинен перевищувати 70 дБ.
  23. Система регулювання швидкості автоматична, у функції сигналів технологічних датчиків.
  24. Автоматичне підтримання величини гальмівного моменту;
  25. Попередній вибір зазору між палетами у верхній гілці стрічки, фіксація палет на зірочках під час зупинки машини тощо.

26. Схема повинна забезпечувати також підрегулювання швидкості барабанного і тарілчастого живильників.

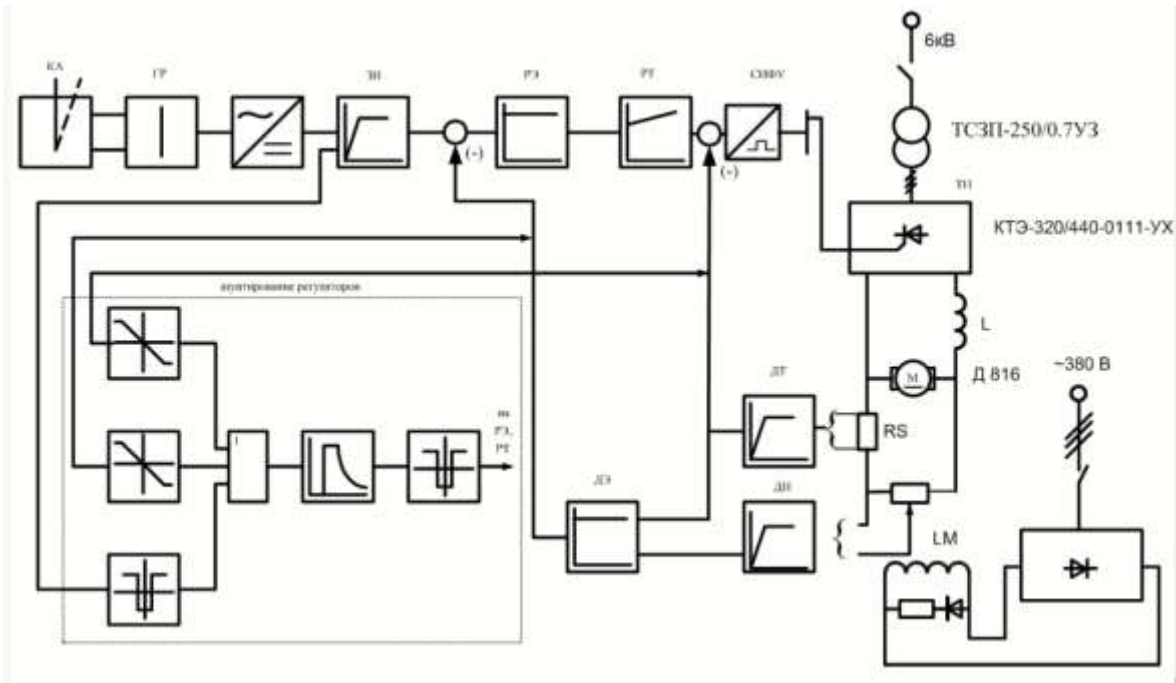
Зазначеним вимогам відповідає електропривод (ЕП) постійного струму, виконаний за системою тиристорний перетворювач – двигун (система ТП-Д).

Принципова схема ЕП агломашини преведена на рис.1.10.



**Рис.1.9. Принципова схема електроприводу агломашини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]



**Рис.1.10. Функціональна схема електроприводу агломашини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]



**Рис.1.11. Агломераційна машина, змішувач, віброворонка**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

За технологічними умовами для отримання безперервно якісного агломерату електропривод агломашини повинен діяти в тривалому режимі, що полегшує розрахунок потужності електроприводу та робить непотрібним перевірки електродвигунів.

## 1.5 Мета та призначення розробки

Метою даної розробки є проектування та обґрунтування регульованого електропривода конвеєра агломераційного виробництва, який забезпечує надійну, енергоефективну та безперебійну роботу транспортного механізму в умовах металургійного підприємства.

У ході розробки передбачається:

- вибір типу електродвигуна та системи керування;
- розрахунок основних електромеханічних параметрів привода;
- забезпечення необхідного пускового та номінального моментів;
- підвищення енергоефективності та зниження динамічних навантажень;
- забезпечення відповідності електропривода умовам важкої експлуатації агломераційного виробництва.

Розроблений регульований електропривод призначений для приводу стрічкового конвеєра агломераційного виробництва, який використовується для транспортування сипких матеріалів (шихти, агломерату) між технологічними ділянками.

Електропривод забезпечує:

- плавний пуск і зупинку конвеєра без ударних навантажень;
- регулювання швидкості руху стрічки відповідно до технологічних вимог;
- стабілізацію моменту та швидкості при змінному навантаженні;
- роботу в тривалому режимі з допустимими перевантаженнями;
- захист електродвигуна і механізмів від аварійних режимів.

Призначення розробки полягає у підвищенні надійності, продуктивності та економічної ефективності агломераційного виробництва шляхом впровадження сучасного частотно-регульованого електропривода.

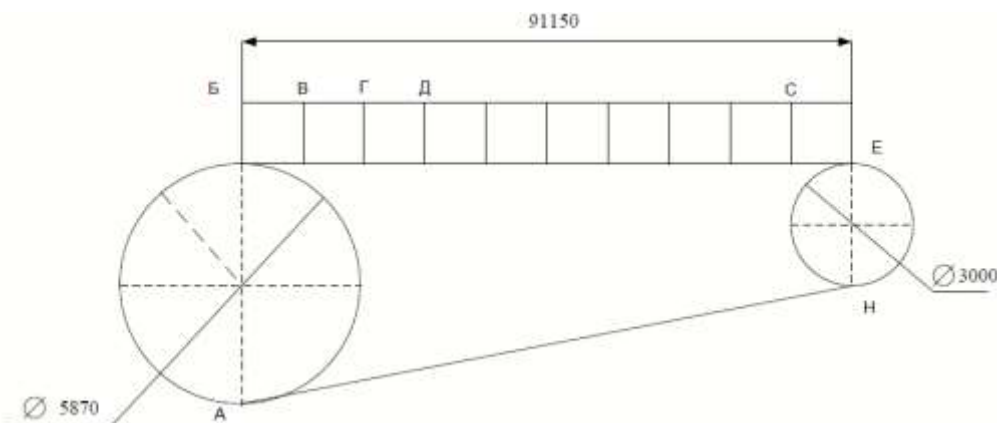
## 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Обґрунтування і вибір системи електроприводу

За технологічними умовами для отримання якісного агломерату електропривод агломашини повинен працювати в тривалому режимі, що полегшує розрахунок потужності електроприводу і робить непотрібними перевірки електродвигунів. Розрахунок потужності приводу агломашини складається з: 1. Розрахунок потужності двигуна приводу аглострічки.

Для полегшення розрахунків розподілимо навантаження по ділянках агломашини, тобто розділимо агломашину на ділянки різної довжини, що наведено на рис.2.1. Окружні зусилля на зірочці електроприводу складаються з наступних зусиль:

1. Зусилля на підйом візків на ділянці АБ;
2. Зусилля на просування візків на ділянці БД;
3. Зусилля на просування візків на ділянці ДС під горнами;
4. Зусилля на подолання тертя в торцевих ущільненнях;
5. Зусилля на просування візків на ділянці СЕ;
6. Зусилля від тиску візків на нижній похилій частині, направляючих середньої частини на ділянці НА.



**Рис.2.1. Розподіл навантаження по ділянках агломашини.**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Потужність головного приводу стрічки розраховується з урахуванням використання всієї робочої площі стрічки машини тільки для спікання. Спочатку розраховується розподіл спікальних візків по стрічці машини

1. Кількість незаповнених візків на ділянці БВ розраховується за виразом:

$$n_1 = \frac{L_{БВ}}{r} = \frac{2450}{1500} = 1.5 \text{ шт.} \quad (2.1)$$

де  $L_{БВ}$  - довжина ділянки БВ ( $L_{БВ}=2450$  мм.);

$r$  - радіус зірочки розвантажувальної частини ( $r = 1500$  мм.).

2. Кількість візків на ділянці ВГ і ГД, де насипаються перший і другий шар шихти, розраховується за виразом

$$n_2 = n_3 = L_{ВГ} / r = 2.5 \text{ шт.},$$

де  $L_{ВГ}$  - довжина ділянки ВГ ( $L_{ВГ}=3800$  мм.);

$L_{ГД}$  - довжина ділянки ГД ( $L_{ГД}=3800$  мм.).

3. Кількість візків на ділянці ДС, де відбувається спікання, розраховується за виразом

$$n_4 = \frac{L_{ДС}}{r} = \frac{78000}{1500} = 52 \text{ шт.}, \quad (2.2)$$

де  $L_{ДС}$  - довжина ділянки ДС ( $L_{ДС}=78000$  мм.).

4. Кількість візків на ділянці СЕ, де відбувається охолодження агломерату, розраховується за виразом

$$n_5 = \frac{L_{СЕ}}{r} = \frac{3150}{1500} = 2 \text{ шт.}, \quad (2.3)$$

де  $L_{СЕ}$  - довжина ділянки СЕ ( $L_{СЕ}=3150$  мм.).

5. Кількість візків на ділянці АБ розраховується за формулою

$$n_6 = \frac{3.14 \cdot D_{но}}{2 \cdot r} = \frac{3.14 \cdot 5870}{2 \cdot 1500} = 6 \text{ шт.}, \quad (2.4)$$

де  $D_{но}$  - діаметр зовнішнього кола приводної зірочки. ( $D_{но}=5870$  мм.).

6. Кількість візків на ділянці ЕН розраховується за формулою:

$$n_7 = \frac{3.14 \cdot D'_{\text{НО}}}{2 \cdot r} = \frac{3.14 \cdot 3000}{2 \cdot 1500} = 3 \text{ шт.}, \quad (2.5)$$

де  $D'_{\text{НО}}$  - діаметр зовнішнього кола зірочки ( $D'_{\text{НО}}=3000$  мм.).

7. Кількість візків на похилій частині агломашини на ділянці НА, розраховується за виразом:

$$n_8 = \frac{L_M}{r \cdot \cos \alpha} = \frac{91150}{1500 \cdot 0.996} = 61 \text{ шт.}, \quad (2.6)$$

де  $L_M$  - довжина агломашини по частинах зірочки ( $L_M=91150$  мм.);

$\alpha$  - кут нахилу холостої гілки агломашини ( $\alpha=1^\circ 5' 13''$ ).

8. Загальна кількість спекальних візків на агломашині визначається за виразом:

$$\begin{aligned} n &= n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6 + n_7 + n_8 \\ n &= 1.5 + 2.5 + 52 + 2 + 6 + 3 + 61 = 130 \text{ шт.} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Далі визначаємо зусилля на подолання тертя кочення ходових роликів по рейках і тертя в цапфах на горизонтальному шляху.

1) На ділянці БВ це зусилля визначається за виразом:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{Q_T \cdot n_1 \cdot (\mu \cdot d + 2 \cdot f)}{D} \cdot \beta = \\ &= \frac{688662.2 \cdot 0.01 \cdot 11 + 2 \cdot 0.05}{30} \cdot 1.3 = 1253 \text{ Н,} \end{aligned} \quad (2.8)$$

де  $Q_T$  - вага порожнього візка ( $Q_T=688662.2$  Н);

$n_1$  - кількість палет на ділянці БВ ( $n_1=2$  шт.);

$\mu$  - приведений коефіцієнт тертя в підшипниках кочення ( $\mu=0,01$ );

$f$  - коефіцієнт тертя кочення роликів по рейках колій направляючих ( $f=0,05$ );

$\beta$  - коефіцієнт, що враховує тертя ребер роликової рейки колій ( $\beta=1,3$ );

$D$  - діаметр ролика ( $D=30$  мм.);

$d$  - діаметр підшипника кочення ( $d=11$  мм.).

2) На ділянці ВГ візки заправляються одним шаром шихти і зусилля визначаються за виразом:

$$A_2 = \frac{\left(Q_T + \frac{Q_2}{2}\right) \cdot \mu d + 2 \cdot f \cdot n_2}{D} \cdot \beta =$$

$$= \frac{68866.2 + \frac{38112}{2} \cdot 0.01 \cdot 11 + 0.05 \cdot 2 \cdot 2.5}{30} \cdot 1.3 = 2000 \text{ Н}, \quad (2.9)$$

де  $Q_2$  - вага шихти на візку, визначаємо за виразом:

$$Q_2 = F \cdot H \cdot \gamma \cdot 9.81 = 6 \cdot 0.35 \cdot 1.85 \cdot 10^3 \cdot 9.81 = 38112 \text{ Н}, \quad (2.10)$$

де  $F$  - площа спекального візка ( $F=6$  м<sup>2</sup>);

$H$  - висота спекального шару ( $H=0,35$  м);

$\gamma$  - щільність шихти ( $\gamma=1,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

3) На ділянці ГД на візки насипається другий шар шихти, і зусилля визначається за виразом:

$$A_3 = \frac{Q_T + Q_2 \cdot \mu d + 2 \cdot f \cdot n_3}{D} \cdot \beta =$$

$$= \frac{68866.2 + 38112 \cdot 0.01 \cdot 11 + 0.05 \cdot 2 \cdot 2.5}{30} \cdot 1.3 = 2434 \text{ Н}. \quad (2.11)$$

4) На ділянці ДС відбувається спікання шихти, і зусилля визначається за виразом:

$$A_4 = \frac{Q_T + Q_2 + p \cdot \mu d + 2 \cdot f \cdot n_4}{D} \cdot \beta$$

$$A_4 = \frac{68866.2 + 38112 + 64746 \cdot 0.01 \cdot 11 + 0.05 \cdot 2 \cdot 5.2}{30} \cdot 1.3 = 81260 \text{ Н}, \quad (2.12)$$

де  $p$  - тиск на один спекальний візок від розрядження під ним, цей тиск визначається за виразом:

$$p = p' \cdot 9.81, \quad (2.13)$$

де  $p'$  - розрядження під спікальним синхронізованим візком ситовим ( $p'=0,66 \cdot 10^4$ ).

$$p = 0.66 \cdot 10^4 \cdot 9.81 = 64746 \text{ Н}$$

5) На ділянці СЕ зусилля визначається за виразом:

$$A_5 = \frac{Q_1 + Q_2 \cdot \mu d + 2 \cdot f \cdot n_5}{D} \cdot \beta \quad (2.14)$$

$$= \frac{68866.2 + 38112 \cdot 0.01 \cdot 11 + 0.05 \cdot 2 \cdot 2}{30} \cdot 1.3 = 1947 \text{ Н.}$$

Підйомне зусилля гідроущільнення, яке діє на один спекальний візок, визначається за виразом:

$$p'' = (2 \cdot b \cdot l \cdot p_y) - k = (2 \cdot 150 \cdot 1.9 \cdot 9.8) - 736 = 4856 \text{ Н,} \quad (2.15)$$

де  $l$  - довжина спекального візка ( $l=150$  см);

$b$  - ширина поверхні контакту ( $b=1,9$  см);

$k$  - вага пластин гідроущільнення, що припадають на один спекальний візок ( $k=736$  Н);

$p_y$  - зусилля гідроущільнення ( $p_y=9,8$  Н/см<sup>2</sup>).

Зусилля на подолання опору руху спекальних візків від гідроущільнення на ділянці ДС визначається за виразом:

$$p'' = (2 \cdot b \cdot l \cdot p_y) - k = (2 \cdot 150 \cdot 1.9 \cdot 9.8) - 736 = 4856 \text{ Н,} \quad (2.16)$$

Зусилля на подолання опору руху спекальних візків

від гідроущільнення на ділянці ДС визначається за виразом:

$$A_5 = \frac{Q_1 + Q_2 \cdot \mu d + 2 \cdot f \cdot n_5}{D} \cdot \beta$$

$$= \frac{68866.2 + 38112 \cdot 0.01 \cdot 11 + 0.05 \cdot 2 \cdot 2}{30} \cdot 1.3 = 1947 \text{ Н.} \quad (2.17)$$

Підйомне зусилля гідроущільнення, яке діє на один спекальний візок, визначається за виразом:

$$p'' = (2 \cdot b \cdot l \cdot p_y) - k = (2 \cdot 150 \cdot 1.9 \cdot 9.8) - 736 = 4856 \text{ Н,} \quad (2.18)$$

де  $l$  - довжина спекального візка ( $l = 150$  см);

$b$  - ширина поверхні контакту ( $b = 1,9$  см);

$k$  - вага пластин гідроущільнення, що припадають на один спекальний візок ( $k = 736$  Н);

$p_y$  - зусилля гідроущільнення ( $p_y = 9,8$  Н/см<sup>2</sup>).

Зусилля на подолання опору руху спекальних візків від гідроущільнення на ділянці ДС визначається за виразом:

$$A_6 = p'' \cdot n_4 \cdot \mu_1 = 4856 \cdot 52 \cdot 0.15 = 37876 \text{ Н,} \quad (2.19)$$

де  $\mu_1$  - коефіцієнт тертя ковзання сталі по чавуну при незначному змащенні поверхні ковзання ( $\mu_1 = 0.15$ ) □

Сумарне зусилля, необхідне для просування спікального візка по верхній горизонтальній колії, визначається за виразом:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$$

$$= 1253 + 2000 + 2434 + 81260 + 1947 + 37876 = 126770 \text{ Н.} \quad (2.20)$$

Крутний момент на приводній зірочці, для просування палет по горизонтальному шляху, визначається за виразом:

$$M_1 = A \cdot R_{НО} = 126770 \cdot 2935 \cdot 10^{-3} = 372.1 \text{ кНм.} \quad (2.21)$$

Тепер визначаємо всі зусилля на підйом візків на ділянці АБ, тобто

на приводній зірочці. Цей момент визначається за виразом:

$$M_2 = G \cdot R_{\text{ПЛ}} \cdot \sum_1^n \sin[\pi/n \cdot (b-1) + \alpha], \quad (2.22)$$

де  $G$  - вага порожнього візка ( $G = Q_T$ );

$R_{\text{ПЛ}}$  - радіус лінії підйому візка - це відстань від осі зірочки до центру ваги порожнього візка, цей радіус визначається за формулою:

$$R_{\text{ПЛ}} = R_{\text{ОР}} + h_{\text{ЦП}} = 2.88 + 0.27 = 3.15 \text{ м}, \quad (2.23)$$

де  $R_{\text{ОР}}$  - радіус осі роликів візка, визначається за виразом:

$$R_{\text{ОР}} = R_{\text{НО}} \cdot \cos 10^\circ 20' = 2.935 \cdot 0.984 = 2.88 \text{ м}, \quad (2.24)$$

де  $R_{\text{НО}}$  - радіус приводної зірочки ( $R_{\text{НО}} = 2,935 \text{ м}$ );

$h_{\text{ЦП}}$  - відстань від осі роликів до центру ваги порожнього візка ( $h_{\text{ЦП}} = 0,27 \text{ м}$ );

$n$  - кількість візків на зірочці ( $n=6$ );

$b$  - номер візка, який змінюється від 1 до 6;

$\alpha$  - кут повороту зірочки відносно заздалегідь прийнятого початкового положення.

З дослідження максимуму функції, максимальний момент, який необхідний для визначення потужності приводу, буде при  $\alpha=0$ , при початковому куті, рівному  $\pi/2 \cdot n$ , маємо наступний вираз:

$$\begin{aligned} M_2 &= G_T \cdot R_{\text{ПЛ}} \cdot \sum_1^n \sin\left(\frac{\pi}{n} \cdot (b-0.5)\right) = \\ &= 68.8662 \cdot 3.15 \cdot [\sin(\pi/6 \cdot 0.5) + \sin(\pi/6 \cdot 1.5) + \sin(\pi/6 \cdot 2.5) + \\ &\quad \sin(\pi/6 \cdot 3.5) + \sin(\pi/6 \cdot 4.5) + \sin(\pi/6 \cdot 5.5)] = \\ &= 217 \cdot (\sin 15 + \sin 45 + \sin 75 + \sin 75 + \sin 45 + \sin 15) = \\ &= 838.6 \text{ кНм}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

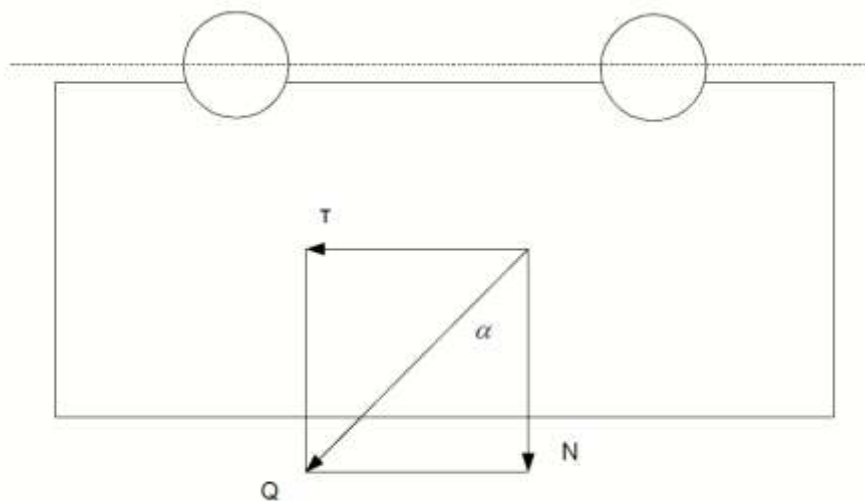
На рис. 2.2. представлені наступні сили, що діють на візок, який знаходиться на нижній гілці агломашини.

- 1)  $Q_T$  - вага спекального візка;  
 2)  $N$  - сила тяжіння, що діє на шляху направляючих, вона визначається за формулою:

$$N = Q \cdot \cos 1^\circ 5' 15'' = 68866.2 \cdot 0.9998 = 68853.8 \text{ Н} \quad (2.26)$$

$T$  - рушійна сила, що діє на один візок, визначається за виразом:

$$T = Q \cdot \sin 1^\circ 5' 13'' = 68866.2 \cdot 0.0189 = 1306 \text{ Н.} \quad (2.27)$$



**Рис.2.2. Розподіл сил, що діють на задній візок агломашини.**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Сила опору руху одного спекального візка визначається за виразом:

$$T_1 = \frac{N \cdot \mu \cdot d + 2 \cdot f}{D} \cdot \beta = \frac{68853.8 \cdot 0.01 \cdot 11 + 2 \cdot 0.05}{30} \cdot 1.3 = 626 \text{ Н.} \quad (2.27)$$

Скочуючись по похилому шляху спекальні візки створюють силу тиску на зуби зірочок, що сприяє приводному моменту, ця сила визначається за виразом:

$$P_{\text{взб}} = (T - T_1) \cdot n_8 = (1306 - 626) \cdot 61 = 41480 \text{ Н.} \quad (2.28)$$

Тепер визначимо сумарний крутний момент на приводній зірочці без урахування впливу зміни моменту на розвантажувальній зірочці за виразом:

$$M_{1\Sigma} = M_1 + M_2 - M_3, \quad (2.29)$$

де  $M_3$  - крутний момент від надлишкової сили тиску на приводній зірочці, який визначається за виразом:

$$M_3 = P_{\text{изб}} \cdot R_{\text{но}} = 41.48 \cdot 2.935 = 121.7 \text{ кНм} \quad (2.30)$$

$$M_{1\Sigma} = 372.1 + 838.6 - 121.7 = 1089 \text{ кНм}. \quad (2.30)$$

Максимальний крутний момент на розвантажувальній частині визначається за виразом:

$$M_{\text{MAX}} = G_T \cdot R_{\text{ПЛ}1,2} \cdot \sum_1^n \sin \left[ \frac{\pi}{n} \cdot (b - 0.5) \right] \quad (2.31)$$

Момент на розвантажувальній зірочці дорівнює сумі моментів, визначається за виразом:

$$M_p = M_{\text{MAX}1} + M_{\text{MAX}2}, \quad (2.32)$$

де  $M_{\text{MAX}1}$  - момент, створюваний завантаженими візками, які знаходяться на верхній гілці розвантажувальної зірочки;

$M_{\text{MAX}2}$  - момент, створюваний порожніми візками, що знаходяться на нижній гілці розвантажувальної зірочки після скидання агломерату.

Визначимо відстань від центру зірочки до центру ваги порожнього і завантаженого візка, відповідно за виразами:

$$\begin{aligned} R_{\text{ПЛ}1} &= R'_{\text{ор}} + k_{\text{ПТ}1} = 1.4 + 0.44 = 1.84 \text{ м}; \\ R_{\text{ПЛ}2} &= R'_{\text{ор}} + k_{\text{ПТ}2} = 1.4 + 0.27 = 1.67 \text{ м}, \end{aligned} \quad (2.33)$$

де  $R'_{\text{ор}}$  - радіус осі роликів, визначається за виразом

$$R'_{\text{ор}} = R'_{\text{но}} \cdot \cos 20^\circ 30' = 1.5 \cdot 0.9333 = 1.4 \text{ м} \quad (2.34)$$

де  $k_{\text{цт}}$  - відстань до центру ваги візка від осі роликів, ця відстань різна для порожнього і для завантаженого візка;

$k_{\text{цт1}}$  - відстань від осі роликів до центру ваги завантаженого візка

( $k_{\text{цт1}}=0,44$  м);

$k_{\text{цт2}}$  - відстань від осі роликів до центру ваги порожнього візка

( $k_{\text{цт2}}=0,27$  м).

Підставляючи отримані дані, в (2.1), отримаємо значення двох максимальних моментів за умови, що значення для кожного  $G$  різні:

$$\begin{aligned} M_{\text{max1}} &= 106,978805 \cdot 1,84 [\sin \frac{\pi}{3} (1 - 0,5) + \sin \frac{\pi}{3} (2 - 0,5)] = 295,3 \text{ кНм} \\ M_{\text{max2}} &= 68,8662 \cdot 1,67 [\sin \frac{\pi}{3} (1 - 0,5) + \sin \frac{\pi}{3} (2 - 0,5)] = 57,5 \text{ кНм} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Підставляючи отримані значення моментів, в (2.32), знаходимо значення моменту на розвантажувальній зірочці:

$$M_p = 295,3 + 57,5 = 352,8 \text{ кНм.} \quad (2.36)$$

Поряд з максимальним крутним моментом на зірочці створюється і мінімальний крутний момент, який складається так само від двох візків, він розраховується аналогічним чином:

$$\begin{aligned} M_{\text{min1}} &= 106,978805 \cdot 1,84 \cdot \sin 60^\circ = 170,5 \text{ кНм;} \\ M_{\text{min2}} &= 68,8662 \cdot 1,67 \cdot \sin 60^\circ = 99,6 \text{ кНм;} \\ M_{\text{pmin}} &= 170,5 + 99,6 = 270,1 \text{ кНм.} \end{aligned} \quad (2.37)$$

За умови створення гальмівною машиною постійного моменту, рівного максимальному крутному моменту на приводну зірочку, визначається гальмівний надлишковий момент, який дорівнює:

$$M_{\text{изб}} = M_p - M_{\text{pmin}} = 352,8 - 270,1 = 82,7 \text{ кНм.} \quad (2.38)$$

Надлишковий момент створює на приводній зірочці додаткове зусилля, яке визначається за виразом:

$$F_{\text{нзб}} = M_{\text{нзб}} / R'_{\text{но}} = 82.7 / 1.5 = 54.9 \text{ кН.} \quad (2.39)$$

Додатковий момент на приводній зірочці, що створюється додатковим зусиллям, дорівнює:

$$M_4 = F_{\text{нзб}} \cdot R_{\text{но}} = 54.9 \cdot 2.935 = 161 \text{ кНм.} \quad (2.40)$$

Сумарний момент, що діє на зірочці головного приводу, визначається за виразом:

$$M_{2\Sigma} = M_{1\Sigma} + M_4 = 1089 + 161 = 1250 \text{ кНм.} \quad (2.41)$$

Необхідна потужність приводу головної частини визначається за формулою:

$$P_{\text{гр}} = \frac{i_{2\Sigma} \cdot n_a}{9550 \cdot \eta} \cdot 1.2 = \frac{1250 \cdot 10^3 \cdot 0.406}{9550 \cdot 0.92} = 69 \text{ кВт} \quad (2.42)$$

де 1.2 - коефіцієнт, що враховує збільшення потужності в динамічному режимі;

$\eta$  - загальний коефіцієнт корисної дії ( $\eta = 0.92$ );

$n_B$  - швидкість обертання зірочки, визначається за виразом

$$n_B = \frac{V_T}{\pi \cdot D_{\text{но}}} = \frac{6.9}{3.14 \cdot 5.870} = 0.372 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.43)$$

де  $V_T$  - швидкість руху спекальних візків ( $V_T = 6,9 \text{ м/хв}$ ).

Максимальна швидкість електроприводу:

$$n_{\text{ел.макс.}} = n_B \cdot i_{\text{ред}} = 0,372 \cdot 1448 = 538,13 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.44)$$

$$\omega_{\text{ел.макс.}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{ел.макс.}}}{30} = 56,35 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (2.45)$$

Момент інерції механізму, приведений до валу двигуна, визначається за виразом:

$$J_{\text{МЕХ ПР}} = m \cdot (V_T / \omega)^2 = 1417650 \cdot (0.125 / 56.52)^2 = 6.8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2., \quad (2.46)$$

де  $m$  – маса механізму (спекальних візків);

$\omega$  – швидкість обертання двигуна;

$V_T$  – швидкість руху спекальних візків.

Еквівалентний момент інерції двигуна і механізму, приведений до валу двигуна, визначається за виразом:

$$J_e = J_{\text{ДВ}} + J_{\text{МЕХ ПР}} = 27.5 \cdot 6.8 = 34.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.47)$$

Виходячи з розрахованої потужності і швидкості двигуна вибираємо краново-металургійний двигун постійного струму серії Д, з запасом по потужності, тип Д818.[6]. Технічні дані і параметри обраного електродвигуна наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

### Паспортні та розрахункові параметри електродвигуна

Найменування величини	Позначення величини	Значення
Номінальна потужність, кВт	$P_n$	85
Номінальна напруга, В	$U_n$	440
Номінальний струм, А	$I_n$	210
Номінальна кутова швидкість, об/хв	$n_n$	540
Активний опір двигуна, Ом	$R_{\text{дв}}$	0,12
Індуктивність двигуна, Гн	$L_{\text{дв}}$	0,0016
Максимальний струм, А	$I_{\text{дв.мах.}}$	525
Номінальний момент двигуна, Н·м	$M_n$	1500
Момент інерції двигуна, кг·м <sup>2</sup>	$J_{\text{дв}}$	27,5
Допустиме перевантаження по струму	$\lambda$	2,5

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [5]

Проведемо розрахунок параметрів електродвигуна

Визначимо опір двигуна в гарячому стані за формулою:

$$R_{\text{ДВ. ГОР}} = 1.3 \cdot R_{\text{ДВ}} = 1.3 \cdot 0,12 = 0,156 \text{ Ом.} \quad (2.48)$$

Визначимо номінальну кутову швидкість за формулою:

$$W_H = \pi \cdot n_H / 30 = 3.14 \cdot 540 / 30 = 56,52 \text{ рад/с.} \quad (2.49)$$

Визначимо коефіцієнт ЕРС (В·с/рад) і електромагнітного моменту двигуна за формулою:

$$c = (U_H - I_H \cdot R_{\text{дв.гор}}) / W_H = (440 - 210 \cdot 0,156) / 56,52 = 7,2 \text{ В·с} \quad (2.50)$$

Визначимо максимально допустимий струм двигуна за формулою:

$$I_{\text{дв.макс.}} = 2,5 \cdot 210 = 525 \text{ А} \quad (2.51)$$

Визначимо електромагнітну постійну часу ланцюга двигуна за формулою:

$$T_{\text{дв}} = \frac{L_{\text{дв}}}{R_{\text{дв}}} = \frac{0,0016}{0,156} = 0,01026 \text{ с.} \quad (2.52)$$

## 2.2 Вибір тиристорного перетворювача

На підставі параметрів трансформатора і двигуна:  $U_{\text{н дв}}=440 \text{ В}$  і  $I_{\text{ндв}}=210 \text{ А}$ , вибираємо тиристорний перетворювач серії КТЕ 320/440 – 0111 – УХЛ4.

З параметрами:  $U_{\text{дн}}=440 \text{ В}$ ;  $I_{\text{дн}}=320 \text{ А}$

Перевантажувальна здатність ТП

$$I_{\text{ТП.макс}} = 2,25 \cdot I_H = 2,25 \cdot 320 = 720 \text{ А,} \quad (2.53)$$

що більше допустимого струму двигуна  $I_{\text{дв.макс}}=525 \text{ А}$ .

Тиристорний перетворювач відповідає заданим технічним вимогам.

## 2.3. Вибір трансформатора

До складу комплектного тиристорного перетворювача входить узгоджувальний силовий трансформатор для живлення вентиляного перетворювача, його вибір проводимо за [ 5 ]. Розрахункове значення фазової

ЕРС вентильної обмотки трансформатора вибираємо за умовою забезпечення заданої максимальної швидкості електроприводу при зниженій напрузі мережі і номінальному струмі двигуна.

$$E_{2\phi \text{ расч}} = k_{u2\phi} \cdot k_{\alpha} \cdot \frac{1}{k_{uc}} (1 + k_R) \cdot U_{\text{дв макс}} \text{ В} \quad (2.54)$$

де максимальна напруга на двигуні при максимальному струмі і максимальній швидкості приводу, В

$$U_{\text{дв макс}} = c \cdot w_{\text{эл макс}} + I_{\text{дв ном}} \cdot R_{\text{дв гор}} = 7,2 \cdot 56,52 + 210 \cdot 0,156 = 439,66 \text{ В} \quad (2.55)$$

$k_{u2\phi}$ -коefficient семи, [ 7 ].

$$k_{u2\phi} = 0,428$$

$k_{\alpha} = 1/\cos\alpha$  хв. - coefficient запасу, що враховує неповне відкриття тиристорів перетворювача;

$\alpha_{\text{мін}}$  - мінімальний кут керування перетворювача. Для не реверсивних перетворювачів з роздільним керуванням можна прийняти  $\alpha_{\text{мін}} = 10^{\circ}$ .

$k_{uc}$  - coefficient запасу по напрузі:  $k_{uc} = 0,85$  ;

$k_R$  - coefficient запасу, що враховує падіння напруги в тиристорах, обмотках трансформатора, а також за рахунок комутації,  $k_R = 0,05$

$$E_{2\phi \text{ расч}} = 0,428 \cdot 1,0188 \cdot \frac{1}{0,85} \cdot (1 + 0,05) \cdot 439,66 = 236,8 \text{ В.} \quad (2.56)$$

Розрахункове діюче значення фазного струму вентильної обмотки:

$$I_{2\phi \text{ расч}} = k_i \cdot k_{i2\phi} \cdot I_{\text{дв н}} = 1,05 \cdot 0,815 \cdot 210 = 179,7 \text{ А.} \quad (2.57)$$

де  $k_i$  - coefficient, що враховує відхилення форми струму від прямокутної,  $k_i = 0,815$  , [ 7 ].

$k_{i2\phi}$  - coefficient схеми випрямлення за струмом вторинної обмотки,  $k_{i2\phi} = 0,815$  (табл.5.1).

Розрахункова типова потужність трансформатора:

$$S_{\text{тр расч}} = k_s \cdot \frac{E_{2\phi \text{ расч}}}{k_{u2\phi}} \cdot k_i \cdot I_{\text{дв н}} = 1,045 \cdot \frac{236,8}{0,428} \cdot 1,05 \cdot 210 = 127519 \text{ В}\cdot\text{А} \quad (2.58)$$

де  $k_s$  - коефіцієнт схеми випрямлення за потужністю,  $k_s = 1,045$ , [ 7 ].

Максимальна потужність, що віддається трансформатором у режимі робочого перевантаження двигуна:

$$S_{\text{тр макс}} = k_s \cdot \left(1 + k_R \cdot \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{дв н}}}\right) \cdot k_i \cdot P_{\text{дв макс}} = 1,045 \left(1 + 0,05 \frac{525}{210}\right) \cdot 1,05 \cdot 256620 = 316774 \quad (2.59)$$

де  $P_{\text{дв макс}}$  - максимальна потужність, що споживається двигуном у режимі робочого перевантаження при швидкості  $w_{\text{эл макс}}$ :

$$P_{\text{дв макс}} = U_{\text{дв макс}} \cdot I_{\text{доп}} = 488,8 \cdot 525 = 256620 \text{ В}\cdot\text{А} \quad (2.60)$$

$$U_{\text{дв макс}} = c \cdot w_{\text{эл макс}} + I_{\text{доп}} \cdot R_{\text{дв гор}} = 7,2 \cdot 56,52 + 2,5 \cdot 210 \cdot 0,156 = 488,8 \text{ В}$$

Обираємо трансформатор типу ТСЗП-250/0,7У3 з наступними номінальними даними, наведеними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

### Характеристика трансформатора

Найменування величини	Позначення величини	Значення
Номінальна потужність трансформатора, кВт·А	$P_{\text{н.т.}}$	235
Фазна напруга вторинної обмотки трансформатора, В	$U_{2\phi}$	240,46
Лінійна напруга вторинної обмотки трансформатора, В	$U_{2л}$	416
Лінійна напруга первинної обмотки трансформатора, кВ	$U_{1л}$	6
Відносна напруга короткого замикання трансформатора	$U_{\text{кз.}\%}$	4,7
Фазний струм вторинної обмотки трансформатора, А	$I_{2\phi}$	326
Активна потужність втрат к. з. в обмотках трансформатора, Вт	$\Delta P_{\text{кз}}$	3700

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [7]

Проведемо перевірку:

$$S_{\text{тр}} > S_{\text{тр расч}}$$

$$235 \text{ кВ} \cdot \text{А} > 127519 \text{ В} \cdot \text{А}$$

$$S_{\text{тр}} > S_{\text{тр расч}} / \lambda_{\text{тр}}$$

$$235 \text{ кВ} \cdot \text{А} > 316774 / 2,5 = 126709 \text{ В} \cdot \text{А}$$

$$U_{2\text{н}} > \sqrt{3} E_{2\text{ф расч}} = \sqrt{3} \cdot 236,8 = 410 \text{ В}$$

$$440 \text{ В} > 410 \text{ В}$$

$$I_{2\text{ф}} > I_{2\text{ф расч}}$$

$$326 \text{ А} > 179,7 \text{ А}$$

Таким чином, трансформатор відповідає заданим технічним вимогам.

Розрахуємо параметри трансформатора

Розрахуємо опір трансформатора на фазу визначається за формулою:

$$\begin{aligned} Z_{\text{тр.ф}} &= \frac{U_{\text{к.з. \%}} \cdot U_{2\text{фф}}}{100 \cdot I_{2\text{фф}}} = \\ &= \frac{4,7 \cdot 240,46}{100 \cdot 326} = 0,0347 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.60)$$

Розрахуємо активну складову опору трансформатора за формулою:

$$\begin{aligned} R_{\text{тр.ф}} &= \frac{\Delta P_{\text{к.з.}}}{m_2 \cdot I_{2\text{фн}}^2} = \\ &= \frac{3700}{3 \cdot 326^2} = 0,0116 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.61)$$

Розрахуємо реактивна складову опору трансформатора за формулою:

$$\begin{aligned} X_{\text{тр.ф}} &= \sqrt{Z_{\text{тр.ф}}^2 - R_{\text{тр.ф}}^2} = \\ &= \sqrt{0,0347^2 - 0,0116^2} = 0,0327 \text{ Ом.} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Розрахуємо індуктивність фази трансформатора за формулою:

$$L_{\text{ф.тр.}} = \frac{X_{\text{тр.ф.}}}{\omega_n} = \frac{0.0327}{314} = 0.104 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (2.63)$$

Розрахуємо кутову частоту мережі живлення за формулою:

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1} \quad (2.64)$$

де  $f_c$  - частота мережі живлення, Гц.

## 2.4 Вибір згладжувального реактора

При живленні від тиристорного перетворювача по двигуну крім постійної складової струму протікають змінні складові, величина яких залежить від кута керування і параметрів навантаження. Це призводить до підвищення нагріву двигуна, погіршення умов комутації і зниження жорсткості механічних характеристик у зв'язку з розширенням зони переривчастих струмів.

Включення згладжувального дроселя в якірний ланцюг дозволяє обмежувати величину змінних складових і, тим самим поліпшити використання двигуна, його комутацію і електромеханічні характеристики, однак одночасно викликає збільшення габаритів і ваги приводу, його вартості і погіршення динамічних властивостей. Визначення необхідної величини індуктивності згладжувального дроселя з умови обмеження зони переривчастих струмів [ 5 ]:  $L_{\text{ст.др.}} = 0,0053143 \text{ Гн}$ .

$$\kappa_{\text{Грmax}} = 1 - \frac{\pi}{6} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{6} = 1 - \frac{3,14}{6} \cdot \text{ctg} \frac{3,14}{6} = 0.093$$

значення початково-безперервного агломерату струму напруга, А:

$$I_{\text{д гр}} = 0.15 \cdot I_{\text{н}} = 0.15 \cdot 210 = 31.5$$

Розрахуємо індуктивність додаткового коефіцієнта дроселя:

$$L_{др1} = L_{кн1} - 2L_{тр.ф} - L_{дв}$$

$$L_{др1} = 5,3143 \cdot 10^{-3} - 0,208 \cdot 10^{-3} - 1,6 \cdot 10^{-3} = 3,5063 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (2.65)$$

де  $2L_{тр.ф}$  - сумарна індуктивність кількості обмоток розраховується трансформатора в контурі бункера випрямленого струму.

Розрахуємо необхідну величину індуктивності згладжуючого дроселя з умови обмеження пульсацій випрямленого струму:

$$L_{зг.др} = \frac{136,2 \cdot 100}{6 \cdot 314 \cdot 7 \cdot 210} = 4,9178 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

де  $E_{d(1)\max}$  - діюче замкнуте значення фазове першої гармоніки перший пульсуючого випрямленого напруги при збільшенні кута регулювання управління  $\alpha = 90^\circ$  розраховується за формулою:

$$\begin{aligned} E_{d(1)\max} &= \frac{U_{2ф\phi} \cdot \sqrt{2} \cdot m_B}{\kappa_{u2} \cdot (m_B^2 - 1)} = \\ &= \frac{240,46 \cdot \sqrt{2} \cdot 6}{0,428 \cdot (6^2 - 1)} = 136,2 \text{ В,} \end{aligned} \quad (2.65)$$

де  $P_{(1)\%} = 7$  - допустиме діюче значення першої гармоніки випрямленого струму у відсотках.

Розрахуємо індуктивність згладжувального дроселя за формулою:

$$\begin{aligned} L_{др2} &= L_{кн2} - 2L_{тр.ф} - L_{дв} = \\ &= 4,9178 \cdot 10^{-3} - 0,208 \cdot 10^{-3} - 1,6 \cdot 10^{-3} = 3,11 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \end{aligned} \quad (2.66)$$

За отриманими величинами індуктивностей обираємо дросель типу ФРОС–65/05У3 з параметрами:

індуктивність  $L_{др} = 1,5 \text{ мГн}$ ;

активний опір,  $R_{др} = 6,8 \text{ МОм}$ ;

номінальний тривалий струм,  $I_{др н} = 250 \text{ А}$

## 2.5 Розрахунок параметрів силового ланцюга

Проведемо розрахунок параметрів силового ланцюга тиристорного перетворювача.

Розрахуємо опір силового ланцюга перетворювача за формулою:

$$R_{\text{ТП}} = 2R_{\text{Трф}} + R_{\text{к}} = 2 \cdot 0,0116 + 0,031 = 0,054 \text{ Ом}, \quad (2.67)$$

де  $R_{\text{к}}$  - опір, що вноситься за рахунок комутації анодних струмів, Ом.

Розрахуємо за наступною формулою:

$$R_{\text{к}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot X_{\text{Трф}}}{2\pi} = \frac{6 \cdot 0,0327}{2 \cdot 3,14} = 0,031 \text{ Ом} \quad (2.68)$$

Розрахуємо індуктивність силового контуру перетворювача за формулою:

$$L_{\text{ТП}} = 2L_{\text{Тр.ф}} = 2 \cdot 0,104 \cdot 10^{-3} = 0,000208 \text{ мГн}. \quad (2.69)$$

Проведемо розрахунок параметрів якірної ланцюга електроприводу

Розрахуємо опір ланцюга двигуна за формулою:

$$R_{\text{ЦДВ}} = R_{\text{дв.гор}} + R_{\text{др}} = 0,156 + 0,0068 = 0,1628 \text{ Ом} \quad (2.70)$$

Розрахуємо опір якірного ланцюга за формулою:

$$R_{\text{ЯЦ}} = R_{\text{ЦДВ}} + R_{\text{ТП}} = 0,1628 + 0,054 = 0,2168 \text{ Ом} \quad (2.71)$$

Розрахуємо індуктивність якірного контуру за формулою:

$$L_{я.л.} = L_{дв} + L_{др} + L_{тп} = 0,0016 + 0,0015 + 0,0002 = 0,0033 \text{ мГн} \quad (2.72)$$

Розрахуємо електромагнітну постійну якорного ланцюга за формулою:

$$T_{я.л.} = \frac{L_{я.л.} = 3,3 \cdot 10^{-3}}{R_{я.л.} = 0,2168} = 0,0152 \text{ с.} \quad (2.73)$$

Розрахуємо електромеханічну постійну часу електроприводу за формулою:

$$T_{м} = \frac{J \cdot R_{я.л.}}{c^2} = \frac{34,3 \cdot 0,2168}{7,2^2} = 0,143 \text{ с.} \quad (2.74)$$

Визначимо відношення постійних:

$$\frac{T_{м}}{T_{я.л.}} = \frac{0,143}{0,0152} = 9,4 \quad (2.75)$$

Отримане відношення більше 4, що свідчить про слабкий вплив ЕРС двигуна, тому при оптимізації не будемо враховувати ЕРС двигуна. Розрахункові параметри тиристорного перетворювача

Середня випрямлена напруга при куті керування  $\alpha = 0^\circ$ :

$$E_{d0} = \frac{U_{2л}}{k_{u2л}} = \frac{416}{0,74} = 561 \text{ В} \quad (2.76)$$

Розрахуємо коефіцієнт (максимальне значення) підсилення перетворювача за формулою:

$$K_{тп} = \frac{\pi \cdot k_{yo} \cdot E_{d0}}{2 \cdot U_{оп макс}} = \frac{3,14 \cdot 0,475 \cdot 561}{10} = 83,67 \text{ В} \quad (2.77)$$

де  $k_{yo} = 0,475$  коефіцієнт передачі керуючого органу на вході СІФУ;

$2 \cdot U_{\text{оп макс}} = 10$  В амплітуда опорної напруги СІФУ.

Розрахуємо постійну часу тиристорного перетворювача за формулою:

$$T_{\text{тп}} = \frac{0,5}{m_{\text{в}} \cdot f_{\text{с}}} = \frac{0,5}{6 \cdot 50} = 0,00167 \text{ с} \quad (2.78)$$

Максимальний допустимий струм електроприводу

$$I_{\text{сп макс}} = I_{\text{дв макс}} = 525 \text{ А.}$$

## 2.6 Перевірка забезпечення заданої області існування електромеханічних характеристик електроприводу

Задана область існування електромеханічних характеристик електроприводу (замкнутої системи), обмежена значенням  $\omega = \omega_{\text{мах}}$  і залежністю  $\pm I(\omega)$ , повинна повністю розташовуватися всередині області існування характеристик проектованої системи перетворювач двигун. Остання в свою чергу обмежена граничними характеристиками, що відповідають роботі провідної групи вентилів в режимі граничного інвертування, а в випрямному режимі при мінімальному куті керування. Оскільки проектований електропривод нереверсивний, то характеристика в режимі граничного інвертування не розраховується. Виконання вищезазначеної умови вимагає значного запасу по напрузі і потужності перетворювача і силового трансформатора. Такий підхід може бути рекомендований при проектуванні електроприводів, від яких вимагається реалізація граничних динамічних можливостей двигунів, що не є метою проектування даного приводу.

Повинна виконуватися наступна умова: при зниженій напрузі мережі і роботі перетворювача в випрямному режимі з мінімальним кутом керування  $\alpha_{\text{min}}$  електромеханічна характеристика розімкнутої системи повинна бути розташована вище точки з координатами  $\omega = \omega_{\text{мах}}$  і  $I = I_{\text{н}}$ .

Мінімальний кут керування перетворювачем  $\alpha_{\text{min}} = 15$  градусів.

Розрахунок електромеханічної тяжкості характеристики площі, при  $k_{\text{с}} = 1$ ,

зведений в таблиці 2.3., а при  $\kappa_c=0,85$  в таблиці 2.4, живлячі самі зв'язки характеристики представлені на враховує рис.2.3.

Таблиця 2.3

### Розрахункові параметри електромеханічної характеристики, при $\kappa_c=1$ .

$\omega, \text{с}^{-1}$	74	67	57
$I_{\text{дв}}$	0	210	525

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [7]

Таблиця 2.4

### Розрахункові параметри електромеханічної характеристики, при $\kappa_c=0,85$ .

$\omega, \text{с}^{-1}$	63	56	46
$I_{\text{дв}}$	0	210	525

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [7]

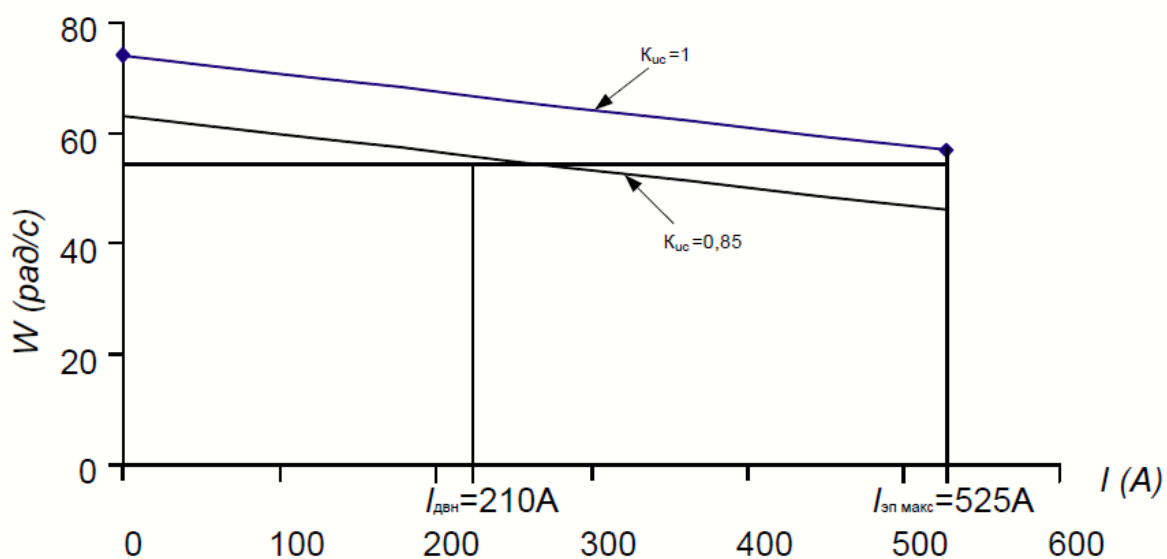


Рис.2.3. Електромеханічні характеристики розімкнутої системи

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

## 2.7 Розрахунок електромеханічних характеристик розімкнутої системи перетворювач-двигун

Розрахунок електромеханічних характеристик системи УВ-Д

Швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega = \frac{E_d - I_d \cdot R_{яц} - \Delta U_{\varepsilon}}{c}, \quad (2.79)$$

де: середнє значення випрямленої ЕРС в режимі безперервного струму

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos(\alpha)$$

$\alpha$  – кут включення тиристора, що відраховується від точки природної комутації;

$\Delta U_{\varepsilon}$  – пряме падіння напруги на тиристорі.

Для отримання відповідної швидкості обертання валу двигуна зробимо ряд перетворень і отримаємо вираз для знаходження кута керування у функції швидкості:

$$\alpha(\omega) = \arccos \left( \frac{\omega \cdot c + I_d \cdot R_{яц} + \Delta U_{\varepsilon}}{E_{d0}} \right) \quad (2.80)$$

Для побудови електромеханічних характеристик у зоні безперервного струму скористаємося підсумковим виразом:

$$\omega(I) = \frac{E_{d0} \cdot \cos(\alpha(\omega)) - I \cdot R_{яц} - \Delta U_{\varepsilon}}{c}. \quad (2.81)$$

Характеристики мають лінійний характер. Однак насправді в області малих навантажень з'являється зона переривчастих струмів, вона тим більша, чим більший кут  $\alpha$ . Поява зони переривчастих струмів обумовлена тим, що в певні проміжки часу миттєве значення випрямленої напруги перетворювача стає меншим за протидіючу ЕРС двигуна, і, як впливає з рівняння рівноваги ЕРС стає негативною. Струм повинен змінити напрямок на протилежний. Але оскільки вентилі мають односторонню провідність, струм стає рівним нулю. При великих навантаженнях незважаючи на те, що в певні проміжки часу

миттєве значення напруги стає менше ЕРС двигуна, струм не переривається, є безперервним. Пояснюється це тим, що при великих навантаженнях запас електромагнітної енергії в ланцюзі випрямленого струму значний. Переходу від режиму безперервного струму до переривчастого відповідає режим початково-безперервного струму, який є граничним. Величина граничного струму залежить від кута  $\alpha$  і параметрів схеми.

Проведемо розрахунок і побудову характеристик в зоні переривчастих струмів.

Для цього знайдемо кут відкривання, виміряний від початку позитивної напівхвилі синусоїди фазної ЕРС:

$$\theta_0(\alpha) = \frac{180}{\pi} \cdot \left( \alpha(\omega) + \left( \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m_s} \right) \right) \quad (2.82)$$

Значення ЕРС у відносних одиницях залежно від кута керування  $\alpha$  в зоні переривчастих струмів:

$$e(\alpha) = \cos\left(\theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot \frac{\sin\left(\left(\theta_0(\alpha) - \theta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right) - \sin\left(\left(\theta_0(\alpha) + \lambda - \theta\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right) \cdot e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\frac{\theta - \pi}{180}\right)}}{1 - e^{\frac{\lambda \cdot \pi}{180} \cot\left(\frac{\theta - \pi}{180}\right)}} \quad (2.83)$$

де кут

$$\lambda = \frac{2 \cdot 180}{m_s} = 60 \text{ град}$$

– кут провідності тиристорів;

кут  $\theta$  – кут відставання струму в якорі від напруги. Він обумовлений присутністю в ланцюзі якоря індуктивності  $L_{яц}$ . Кут  $\theta$  знайдемо за виразом:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega_0 \cdot L_{яц}}{R_{яц}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2.84)$$

Значення струму у відносних одиницях у зоні уривчастих струмів:

$$i(\alpha) = \frac{m_\epsilon}{2 \cdot \pi} \left( \cos \left( \theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \cos \left( (\lambda + \theta_0(\alpha)) \cdot \frac{\pi}{180} \right) - \lambda \cdot \frac{\pi}{180} \cdot e_{cp}(\alpha) \right), \quad (2.85)$$

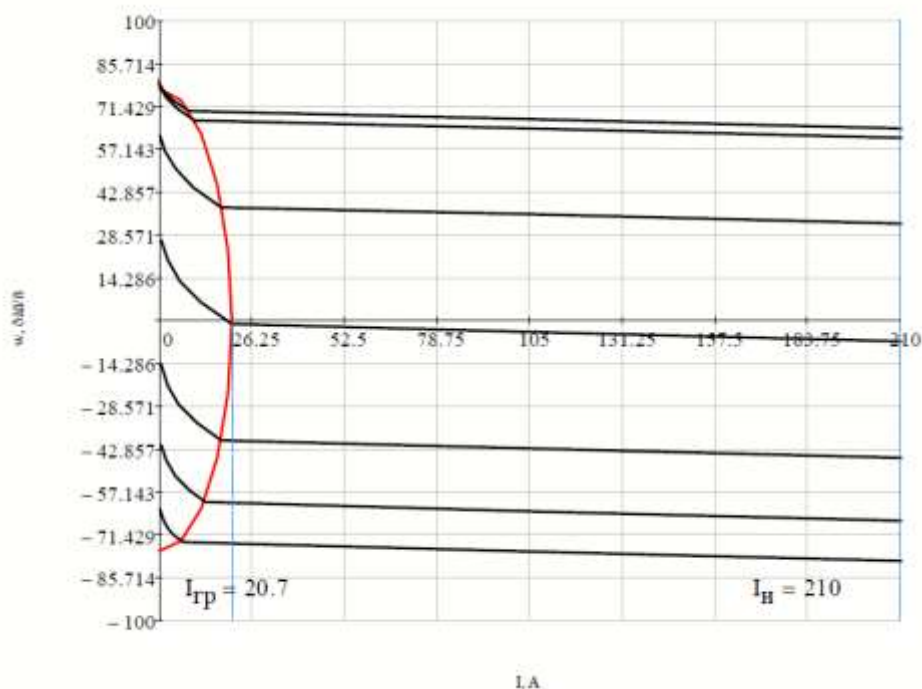
Характеристики режиму переривчастого струму можна побудувати в абсолютних одиницях  $\omega = f(I)$  за такими виразами:

$$\omega(\alpha) = e(\alpha) \frac{\sqrt{2} \cdot U_n \cdot \cos \left( \theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right) - \Delta U_\epsilon}{c},$$

$$I(\alpha) = i(\alpha) \frac{\sqrt{2} \cdot U_n \cdot \cos \left( \theta_0(\alpha) \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{\pi}{2} \right)}{R_{яц}}. \quad (2.86)$$

Якщо в наведених виразах задавати кут відкриття тиристорів  $\alpha$  (в діапазоні 0 ... 180) і кут провідності  $\lambda$  (0 ... 60), то отримаємо сімейство електромеханічних характеристик у зоні переривчастих струмів.

Електромеханічні характеристики системи УВ-Д побудовані у програмі MathCad і представлені на рис. 2.4:



**Рис.2.4. Електромеханічні характеристики системи УВ-Д з роздільним управлінням**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

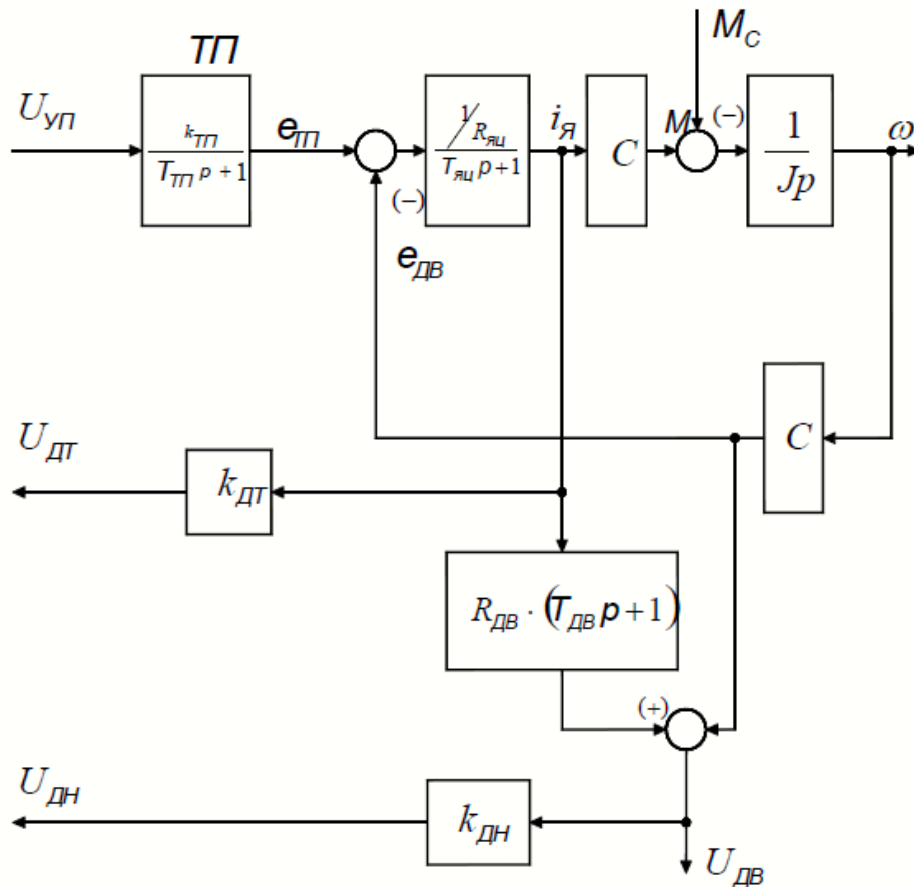
Для отримання граничної характеристики можна скористатися виразами для швидкості та струму в зоні уривчастого струму, задаючи кут  $\lambda = 60$  град та змінюючи кут управління  $\alpha$ .

$$\frac{I_{\text{двигуна}}}{I_{\text{дв}}} = \frac{28,4}{274} = 0,104$$

## 2.9 Структурна схема системи автоматичного регулювання електроприводу

Оскільки до електроприводу агломераційної машини не пред'являються високі вимоги до статичних та динамічних характеристик, то замість зворотного зв'язку за швидкістю в системі регулювання цього приводу використовується зворотний зв'язок з ЕРС двигуна. Застосування зворотного зв'язку ЕРС дозволяє уникнути труднощів, пов'язаних із застосуванням тахогенераторів для вимірювання швидкості. Електропривод агломераційної машини із зворотним зв'язком по ЕРС двигуна забезпечує високу жорсткість та механічні характеристики. Слід зазначити, що така система достатньо просто реалізується, має високі показники надійності в експлуатації, а також у них можливо обмежувати струм шляхом обмеження вихідного напруги регулятора ЕРС.

Структурну схему силового каналу приведено рисунку 2.5.



**Рис. 2.5. Структурна схема силового каналу**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [1]

Структурна схема системи автоматичного регулювання електроприводу агломераційної машини є двоконтурною системою підлеглого регулювання, представлена на рис.2.6.

На схемі прийнято такі позначення:

- передатна функція фільтра на вході РЕП:

$$W_{\Phi}(p) = 1/T_{\Phi}p + 1$$

- передатна функція П – регулятора ЕРС:

$$W_{p.ерс}(P) = K_{p.ерс}$$

- передатна функція ПІ – регулятора струму;

$$W_{p.т}(P) = K_{p.т} \cdot \frac{T_{p.т}p + 1}{T_{p.т}p}$$



Мала постійна часу в контурі струму

$$T_{\mu T} = T_{\mu П} = 0,00167 \text{ с}$$

Коефіцієнт оптимізації контуру струму  $a_m = 2$ .

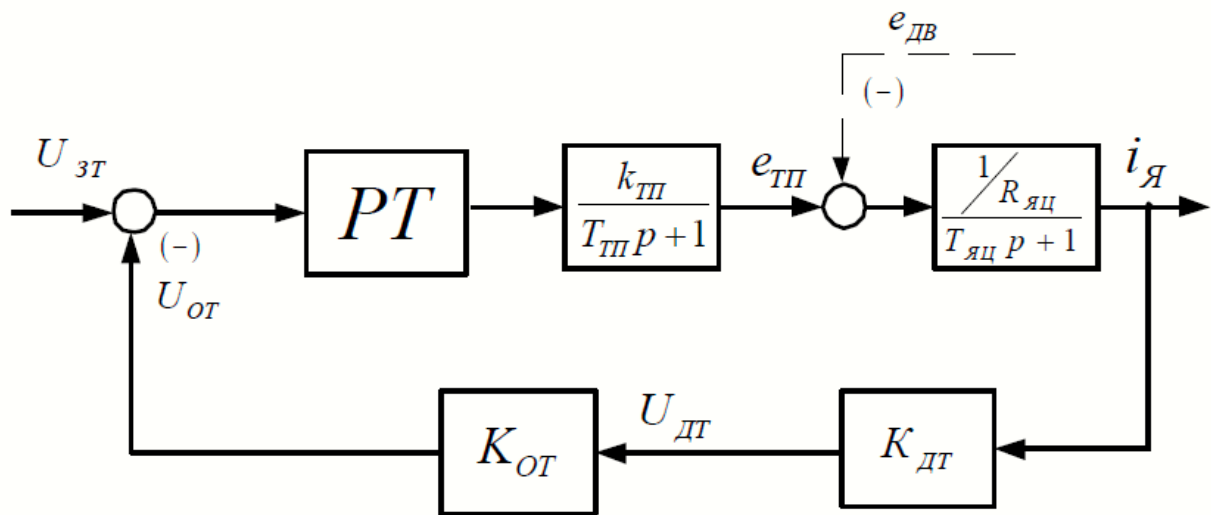


Рис. 2.7. Структурна схема контуру струму

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Насамперед налаштування контуру проводиться без урахування внутрішнього зворотного зв'язку з ЕРС двигуна. Тип регулятора та метод оптимізації контура вибираються залежно від співвідношення  $T_{яц}/4 \cdot T_{\mu}$  (табл.2.5).

Таблиця 2.5

#### Тип регулятора та метод оптимізації контуру

$T_{яц}/4 \cdot T_{\mu}$	Тип регулятора	Метод оптимізації
$\leq 1$	ПІ	МО [СО]
$\geq 1$	ПІ	СО [МО]
$\gg 1$	П [ПІ]	МО [СО]

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Контур струму налаштовується на технічний модульний оптимум при коефіцієнті оптимізації  $a_T = 2$  [4]. Встановлення додаткових фільтрів, що згладжують, в контурі струму дуже несприятливо позначається характері процесів у контурі (приводить до зниження швидкодії як контуру струму, так і

електроприводу), тому встановлення додаткових фільтрів у контурі струму може визначатися лише необхідністю зниження рівня перешкод, і має бути віднесено до етапу введення електроприводу в експлуатацію. Оскільки негативний зворотний зв'язок по ЕРС двигуна при певних співвідношеннях параметрів електроприводу може надавати істотний вплив на характер перебігу перехідних процесів у контурі струму [4], слід оцінити її вплив.

Відношення  $T_m:T_{яц}=0,1434:0,0152 = 9,437$  досить велике, що говорить про незначний вплив негативної зворотного зв'язку по ЕРС двигуна, тому при оптимізації контурів не будемо враховувати ЕРС двигуна (показано пунктиром на рис.2.6). Параметри регулятора струму визначаються з наступних виразів [4]:

Постійна часу регулятора струму:

$$T_{рт} = T_{яц} = 0,0152 \text{ с};$$

Допустиму вихідну напругу регулятора ЕРС, у режимі струмообмеження, приймаємо 10 Ст.

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом якоря:

$$k_m = k_{\partial m} \cdot k_{oc} = \frac{U_{рс доп}}{I_{доп max}} = \frac{10}{525} = 0,0190476 \text{ В/А}; \quad (2.87)$$

Коефіцієнт посилення регулятору струму:

$$K_{рт} = \frac{T_{яц} \cdot R_{яц}}{K_{тп} \cdot K_t \cdot 2 \cdot T_{\mu}} = \frac{0,0152 \cdot 0,2168}{83,67 \cdot 0,0190476 \cdot 2 \cdot 0,00167} = 0,281 \quad (2.88)$$

Коефіцієнт передачі датчика струму:  $K_{дт} = 0,01875$ .

Коефіцієнт передачі ланцюгу зворотного зв'язку за струмом:

$$K_{от} = K_t / K_{дт} = 0,0190476 / 0,01875 = 1,016. \quad (2.89)$$

Передатня функція замкнутого контура має вигляд:

$$W(p)_{т.зам} = \frac{1/K_m}{2T_{\mu m} \cdot p(T_{\mu m} \cdot p + 1) + 1} \quad (2.90)$$

При оптимізації зовнішнього контуру ЕРС передатна функція замкнутого контуру струму спрощується до першого порядку:

$$W(p)_{T.зам} = \frac{1/K_m}{2T_{\mu m} \cdot p + 1} = \frac{1/K_m}{T_m \cdot p + 1}, \quad (2.91)$$

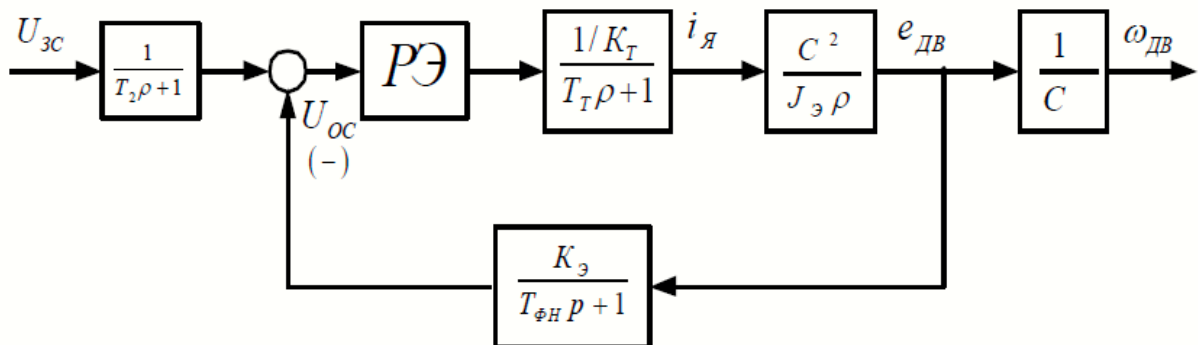
де  $T_m = 2T_{\mu m} = 2 \cdot 0,00167 = 0,0034$  с - еквівалентна стала часу оптимізованого контуру струму.

## 2.11 Оптимізація контуру ЕРС

Якщо в структурній схемі системи спрощено описати контур струму та виконати умову  $K_{от2} \cdot K_{дт} = R_{дв} \cdot K_{дн}$

то вони перетворюються на вид, показаний на рис .2.8, де відповідно до передатної функції датчика ЕРС має бути обрано  $T_{\phi н} = T_{дв}$ .

Наявність аперіодичної ланки в ланцюгу зворотного зв'язку викликає необхідність включення на вході системи такої ж ланки при  $T_2 = T_{дв}$  для виключення підвищеного перерегулювання струму.



**Рис. 2.8. Структурна схема лінеаризованої САУ РЕП зі зворотним зв'язком по ЕРС**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Контур регулювання налаштовується модульний оптимум. Регулятор ЕРС – пропорційний. Коефіцієнт оптимізації  $a_c = 2$

Розрахуємо параметри регулятора.

$$T_{\mu e} = T_T = 0,0034 \text{ с};$$

$$K_e = K_{oe} \cdot K_{де} \cdot K_{дн} = U_{3\text{МАКС}}/E_{дв\text{МАКС}} = 10:406.944 = 0,0245 \text{ В}\cdot\text{с}.$$

$$K_{де} = 1$$

$$K_{oe} = K_e / K_{де} \cdot K_{дн} = 0,0245:1 \cdot 0,02 = 1,225$$

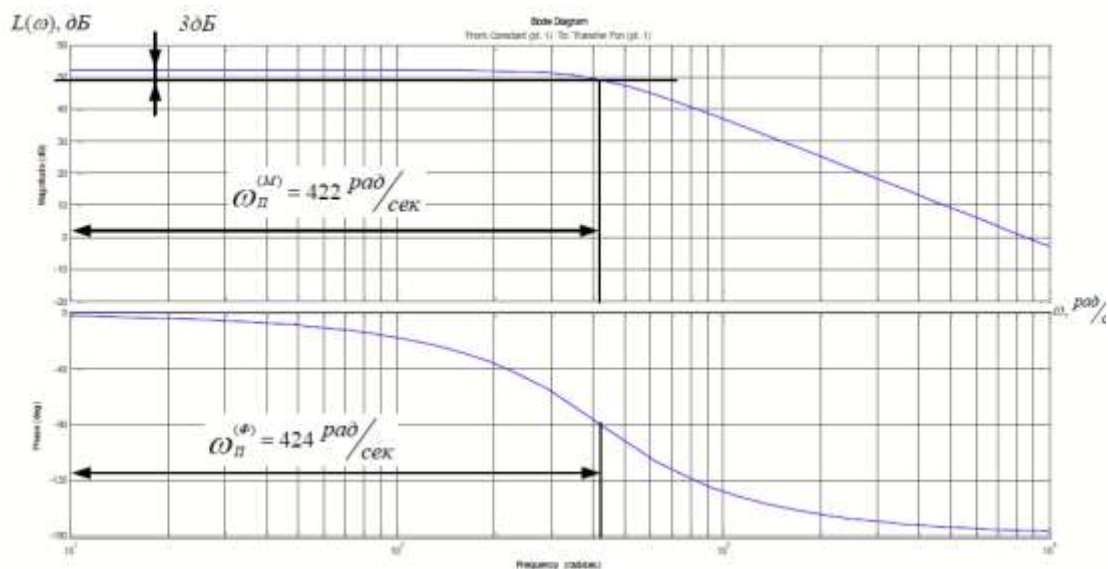
Тоді:

$$K_{\text{рег едс}} = \frac{J_e \cdot K_T}{K_e \cdot C^2 \cdot a_e \cdot (T_T + T_{дв}} = \frac{34.3 \cdot 0.0190476}{0.0245 \cdot 7.2^2 \cdot 2 \cdot (0.0034 + 0.01026)} = 18,82 \quad (2.90)$$

Передавальна функція замкнутого контуру ЕРС дорівнює:

$$W_{з\text{ зам}} = \frac{1/K_з}{a(T_M + T_{\partial e})P[(T_M + T_{\partial e})P + 1] + 1} = \frac{40,816}{0,00037P^2 + 0,0274P + 1} \quad (2.91)$$

Логарифмічні частотні характеристики замкнутого контуру ЕРС розраховуються та будуються на підставі наведеного виразу передавальної функції з використанням програми розрахунку LACH та наведено рис.2.9.

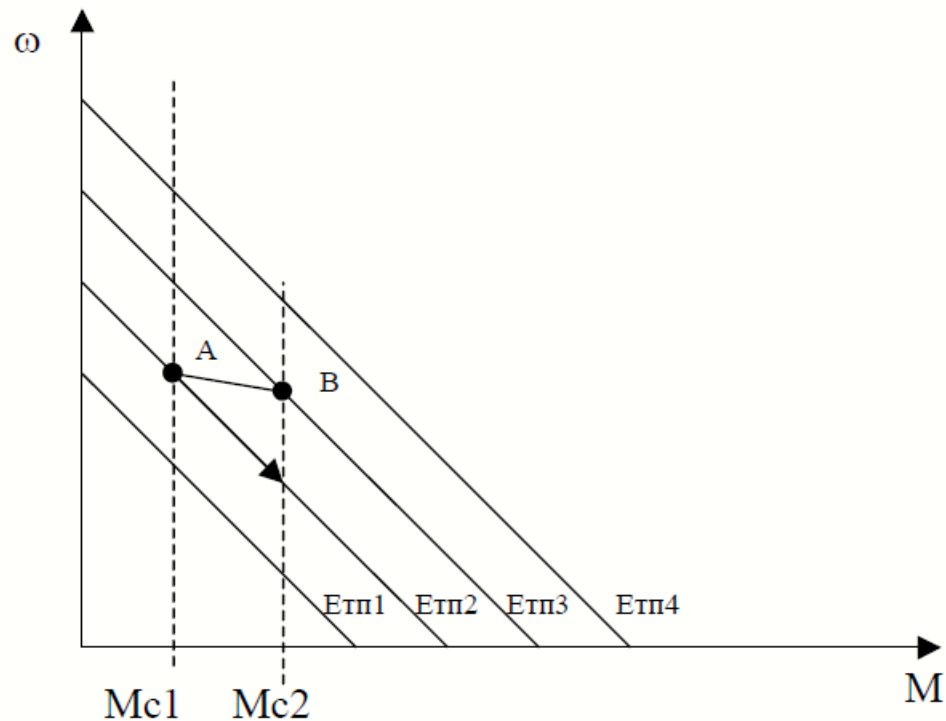


**Рис. 2.9.** ЛАЧХ замкнутого контуру ЕРС.

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

## 2.12 Розрахунок статичних електромеханічних характеристик

Даний двигун постійного струму керується ланцюгом обмотки якоря зменшенням напруги, отже, при постійному потоці механічні та електромеханічні характеристики збігаються. Механічні характеристики при різних напругах на якорі двигуна представлені рис.2.10.



**Рис. 2.10. Механічні характеристики електродвигуна при різному напрузі на якорі**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Припустимо, що двигун працює на характеристиці  $E_{тп2}$  і навантаженням  $M_{с1}$ , тобто у точці А. Припустимо, також, що навантаження зросло і стала рівною  $M_{с2}$ . У перший момент швидкість двигуна падає. Зменшується сигнал пропорційний ЕРС двигуна ( $E_{дв.}$ ), оскільки:

$$E_{дв.} = C \cdot \omega$$

де  $C$  – коефіцієнт ЕРС та електромагнітного моменту двигуна;

$\omega$  – кутова швидкість двигуна.

У реальному електроприводі сигнал пропорційний ЕРС двигуна формується складніше, за допомогою двох датчиків – напруги якоря двигуна та струму якоря двигуна. Однак у будь-якому випадку якщо система правильно налаштований сигнал по ЕРС двигуна, при постійному потоці, пропорційний швидкості двигуна.

Якщо в першому наближенні не враховувати сигнал зворотного зв'язку струму ( $U_{от}$ ), що діє на вхід регулятора струму, то ЕРС тиристорного перетворювача.

( $E_{тп}$ ) можна визначити:

$$E_{тп} = (U_{зс} - U_{оє}) \cdot K_{ре} \cdot K_{рт} \cdot K_{тп} \quad (2.92)$$

де  $K_{ре}$  - коефіцієнт передачі регулятора ЕРС;

$K_{рт}$  - коефіцієнт передачі регулятора струму (для ІІІ регулятора, у статиці, дорівнює власному коефіцієнту посилення операційного підсилювача);

$K_{тп}$  - коефіцієнт передачі тиристорного перетворювача;

$U_{зс}$  - напруга завдання швидкості;

$U_{оє}$  – напруга зворотний зв'язок по ЭРС.

Як впливає з (2.92) зменшення сигналу зворотного зв'язку ЕРС призводить до збільшення ЕРС тиристорного перетворювача. Привід переходить на характеристику  $E_{тп3}$  в точку, і т.д. В результаті формується характеристика замкнута система більш жорстка, ніж характеристики розімкненої системи. Для виведення рівняння електромеханічної характеристики електроприводу складемо систему рівнянь, які описують електропривод у статиці:

$$U_{уре} = U_{зс} - U_{оє} \quad (2.92)$$

$$U_{оє} = (U_{дв} \cdot K_{дн} - K_{дт} \cdot K_{от2} \cdot I_{дв}) \cdot K_{де} \cdot K_{оє} \quad (2.93)$$

$$U_{pe} = K_{pe} \cdot U_{уре} \quad (2.94)$$

$$U_{урт} = U_{pe} - U_{от} \quad (2.95)$$

$$U_{от} = K_{дт} \cdot K_{от} \cdot I_{дв} \quad (2.96)$$

$$U_{рт} = K_{рт} \cdot U_{урт} \quad (2.97)$$

$$E_{тп} = K_{тп} \cdot U_{рт} \quad (2.98)$$

$$U_{тп} = E_{тп} - I_{дв} \cdot R_{тп} \quad (2.99)$$

$$U_{тп} = U_{дв} \quad (2.100)$$

$$U_{дв} = E_{дв} + I_{дв} \cdot R_{дв} \quad (2.101)$$

де  $U_{уре}$  - напруга управління регулятора ЕРС;

$K_{дт}$  - коефіцієнт передачі датчика струму;

$K_{от2}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку по струму в контурі регулятора ЕРС;

$I_{дв}$  - Струм якоря двигуна;

$U_{дв}$  - напруга на якорі двигуна;

$K_{дн}$  - коефіцієнт передачі датчика напруги якоря двигуна;

$K_{де}$  - коефіцієнт передачі датчика ЕРС;

$K_{оe}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку з ЕРС;

$U_{pe}$  - вихідна напруга регулятора ЕРС;

$U_{от}$  - напруга зворотного зв'язку по струму двигуна;

$K_{от1}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку струму в контурі регулятора струму;

$U_{рт}$  - вихідна напруга регулятора струму;

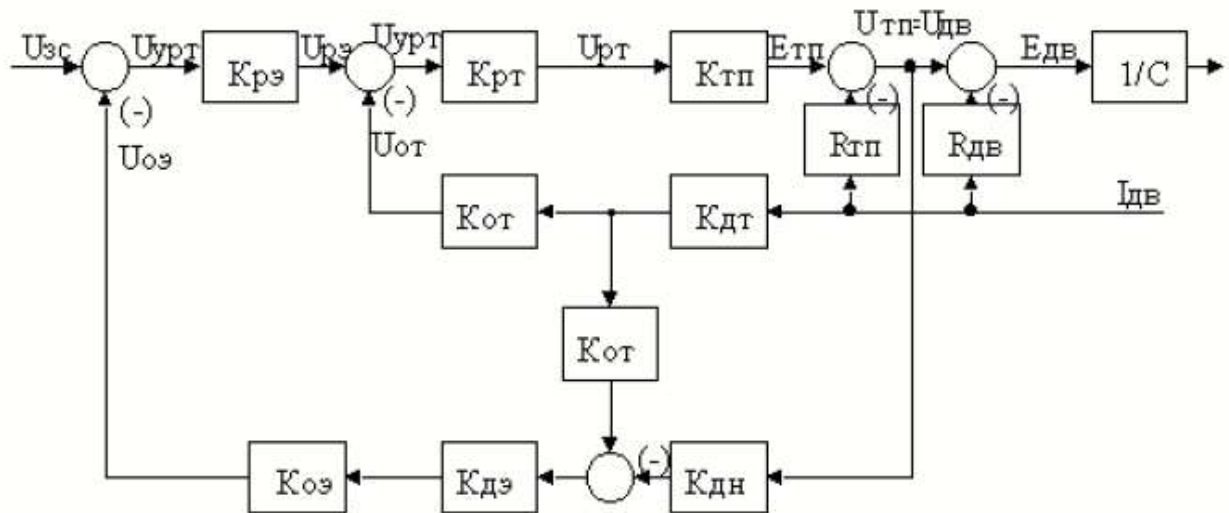
$U_{тп}$  - вихідна напруга тиристорного перетворювача;

$R_{тп}$  - еквівалентний опір тиристорного перетворювача;

$E_{дв}$  - проти ЕРС обмотки якоря двигуна;

$K_{дв} = 1/C = 0,139$  - коефіцієнт передачі двигуна.

Структурна схема силових ланцюгів для режиму стабілізації швидкості наведено рис. 2.11.



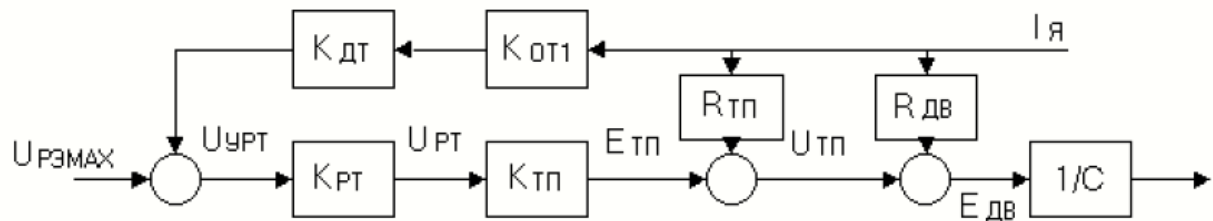
**Рис. 2.11. Структурна схема силових ланцюгів для режиму стабілізації швидкості**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Розв'яжемо систему рівнянь (2.92–2.101) щодо кутової швидкості двигуна:

$$\begin{aligned} \omega &= \\ &= \frac{K_{дв} \cdot K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot U_{зс}}{1 + K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot K_{де} \cdot K_{оэ} \cdot K_{дн}} \\ &- I_{дв} K_{дв} \left( \frac{R_{яц} + K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot K_{де} \cdot K_{оэ} \cdot K_{дн} \cdot R_{дв}}{1 + K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot K_{де} \cdot K_{оэ} \cdot K_{дн}} \right) - I \cdot K_{дв} \\ &\cdot \left( \frac{K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{дт} \cdot K_{от1} - K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot K_{де} \cdot K_{оэ} \cdot K_{дт} \cdot K_{от2}}{1 + K_{тп} \cdot K_{рт} \cdot K_{ре} \cdot K_{де} \cdot K_{оэ} \cdot K_{дн}} \right) \end{aligned} \quad (2.102)$$

При збільшенні навантаження швидкість двигуна падає і, як впливає з (2.92), напруга керування регулятора ЕРС зростає. Як тільки воно досягне значення  $10/K_{ре}$  регулятор ЕРС входить у насичення. Негативна зворотна зв'язок по ЕРС відключається, стабілізація швидкості в електроприводі припиняється. У схемі керування електроприводом залишається чинною негативний зворотний зв'язок струму двигуна. Його структурна схема для режиму стабілізації струму наведено рис.2.12.



**Рис. 2.12. Структурна схема силового каналу електроприводу для режим стабілізації струму**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Складемо систему рівнянь, які описують роботу електроприводу в режимі стабілізації струму двигуна в статиці:

$$\begin{aligned}
 U_{уре} &= U_3 - U_{ое} \\
 U_{ре} &= U_{уре} \cdot K_{ре} \\
 U_{урт} &= U_{ре} - U_{от1} \\
 U_{рт} &= U_{урт} \cdot K_{рт} \\
 E_{тП} &= U_{рт} \cdot K_{тП} \\
 U_{тП} &= E_{тП} + I_{дв} \cdot R_{тП} \\
 U_{тП} &= U_{дв} \\
 U_{дв} &= E_{дв} + I_{дв} \cdot R_{дв} \\
 E_{дв} &= C \cdot \omega_{дв}
 \end{aligned} \tag{2.102}$$

Далі розв'яжемо систему рівнянь (2.102) щодо кутової швидкості двигуна:

$$\omega = \frac{K_{тП} \cdot K_{рт} \cdot U_{рен}}{C} - I_{дв} \cdot \frac{(R_{яц} + K_{тП} \cdot K_{рт} \cdot K_{дТ} \cdot K_{от1})}{C} \tag{2.103}$$

Для визначення струму стопоріння двигуна вирішимо рівняння (2.103) щодо струму при  $\omega = 0$ . Отримаємо:

$$\begin{aligned}
 I_{ст} &= \frac{K_{тП} \cdot K_{рт} \cdot U_{рен}}{C} \cdot \frac{(R_{яц} + K_{тП} \cdot K_{рт} \cdot K_{дТ} \cdot K_{от1})}{C} = \\
 &= \frac{83,67 \cdot 40000 \cdot 10}{7,2} \cdot \frac{(0,2168 + 83,67 \cdot 40000 \cdot 0,01875 \cdot 1,016)}{7,2} = 525 \text{ А}
 \end{aligned} \tag{2.104}$$

Розрахуємо електромеханічні характеристики електроприводу для знайдених раніше чисельних значень параметрів та різних задаючих напруги. Результати розрахунків зведемо до таблиці 2.6.

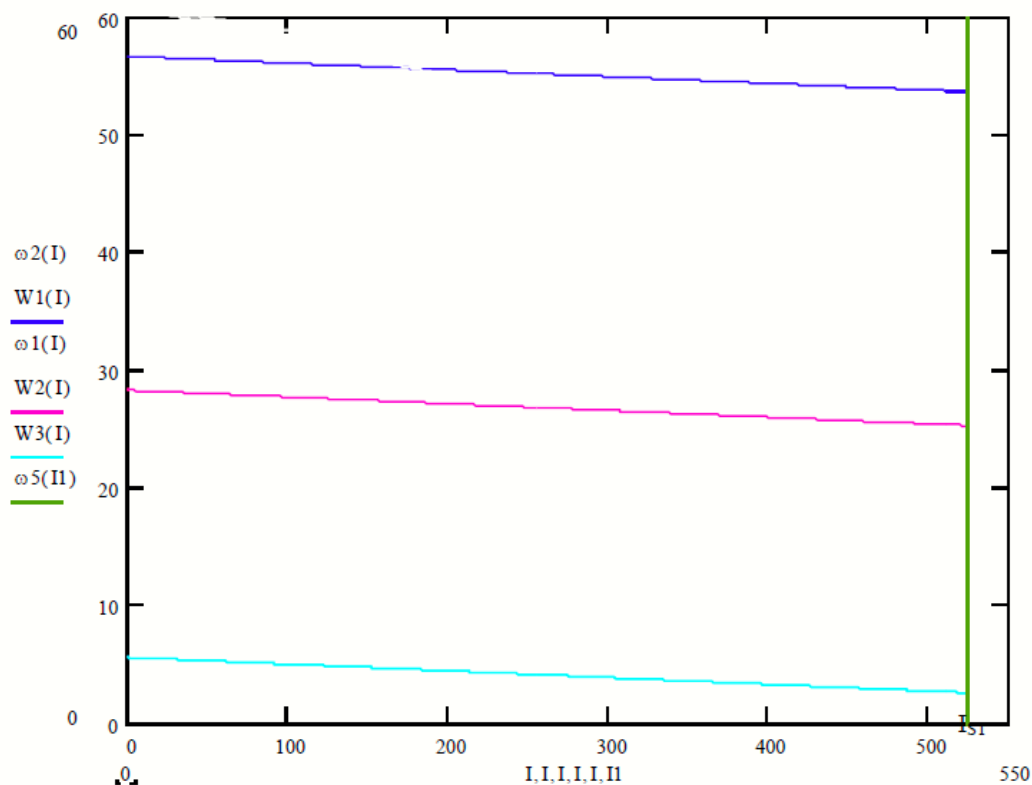
Таблиця 2.6

## Результати розрахунків

$U_{зс}, В$	$\omega_0, \text{рад/с}$	$\omega_H, \text{рад/с}$
1	5,6	5,128
5	28,3	27,828
10	56,6	55,128

Графіки електромеханічних характеристик наведено рис.2.13.

Графіки розраховані за допомогою програми Маhtсad 7.



**Рис. 2.13. Механічні характеристики при різному напрузі на якорі двигуна**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Знайдемо похибку підтримки швидкості двигуна для кожної з розрахованих характеристик за формулою:

$$\delta = \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_0} \quad (2.105)$$

Результати розрахунку зведемо до таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Результати розрахунку

Uз, В	δ%
1	8,4
5	1,66
10	0,83

З аналізу результатів розрахунків випливає, що досліджувальна система забезпечує підтримку швидкості в робочому діапазоні навантажень – не більше 10 %, що відповідає вимогам технічного завдання.

### **2.13 Аналіз нелінійних структур САУ РЕП. Моделювання нелінійних структур САУ РЕП**

Отримання достовірних якісних та особливо кількісних характеристик поведінки реальної системи автоматизованого електроприводу конкретного виробничого механізму вимагає максимального обліку особливостей роботи як в цілому електроприводу, так і його окремих елементів. Насамперед це облік особливостей тиристорного перетворювача (дискретний напівкерований пристрій з конкретним способом управління та законом погодження регульовальних характеристик груп гвинтів) та елементів систем електроприводу з нелінійними характеристиками (СІФУ, регулятори, зворотні



$$W(p)_{ТП} = \frac{K_{ТП}}{T_{mn}p + 1}$$

- функція передачі функція функція передачі електродвигуна:

$$W(p) = \frac{C}{R_{яц} \cdot (T_{яц}p + 1) \cdot Jp}$$

-передавальна функція фільтра при  $T_{ФН} = T_{дв}$ :  $W(P) \quad \Phi_e = \frac{1}{T_{ФН}P+1}$

$K_{oe}$  - коефіцієнт зворотного зв'язку з ЕРС;

$K_{де}$  -коефіцієнт датчика ЕРС;

$K_{дт}$  – коефіцієнт датчика струму;

$K_{от}$  -коефіцієнт зворотного зв'язку по струму;

$K_{дн}$  -коефіцієнт датчика напруги.

### **2.13.1 Розрахунок перехідних процесів та визначення динамічних показників якості нелінійної САУ РЕП, перетворювач безперервний**

Проведено розрахунок перехідних процесів у системах регульованого однозонного електроприводу постійного струму нелінійної САУ РЕП (перетворювач безперервний), виконаного за структурною багатоконтурною схемою з послідовною корекцією. Виконано на ЕОМ за програмою Matlab.

Програма відтворюється методом імітаційного чисельного моделювання перехідних процесів у аналогових нелінійних системах регульованого електроприводу. Вона дозволяє в широких межах варіювати структуру та значення параметрів елементів САУ, виводити результати розрахунків у вигляді графіків, якими визначаються динамічні якості. Перехідні процеси нелінійної САУ РЕП перетворювач безперервний представлені на рисунках 2.15-2.19.

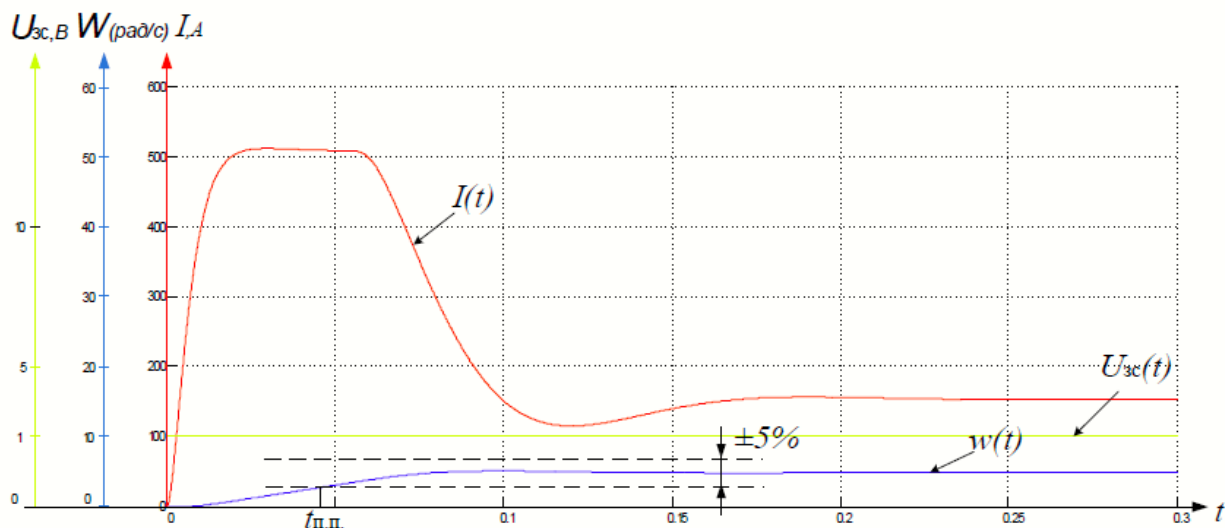


Рис. 2.15. Перехідні процеси при  $M_c = 1100$  Н·м,  $U_3 = 1$  В.  $t_{п.п.} = 0,04$  С

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

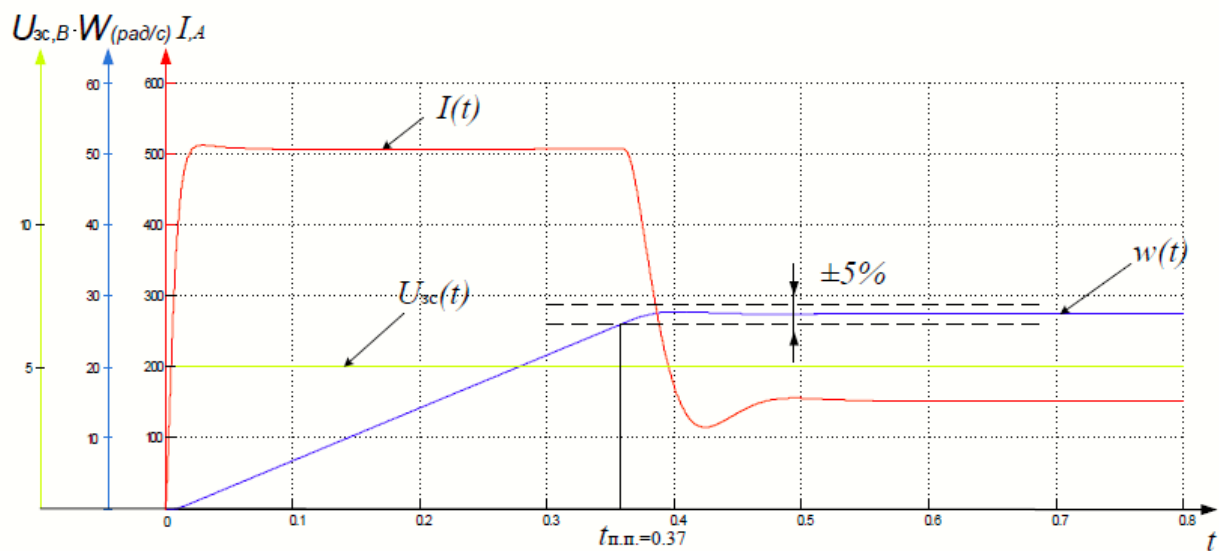


Рис. 2.16. Перехідні процеси при  $M_c = 1100$  Н·м,  $U_3 = 5$  В.  $t_{п.п.} = 0,37$  С

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

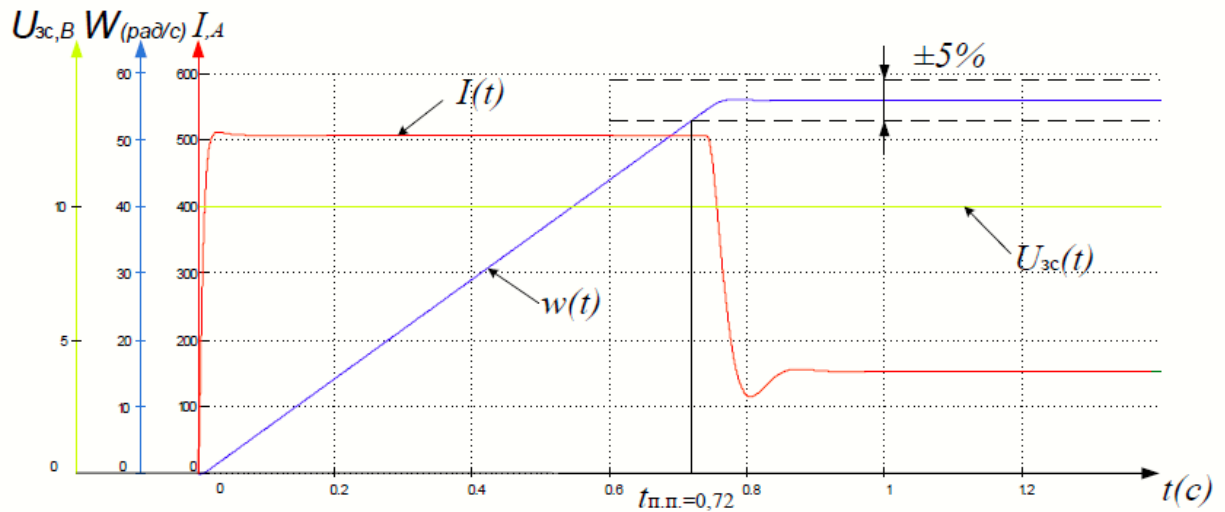


Рис. 2.17. Перехідні процеси при  $M_c = 1100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $U_3 = 10 \text{ В}$ .  $t_{п.п.} = 0,82 \text{ С}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

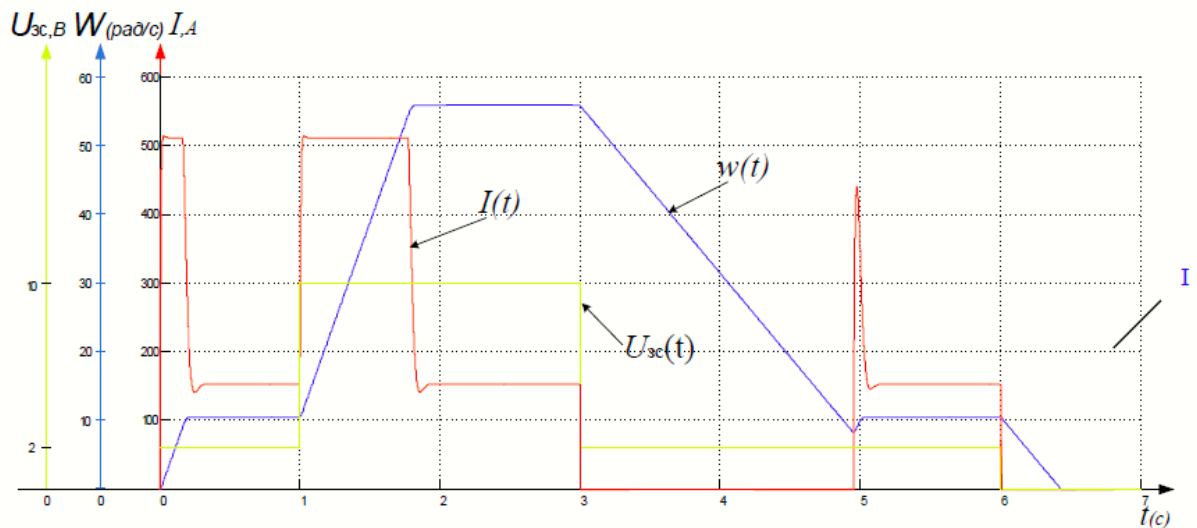
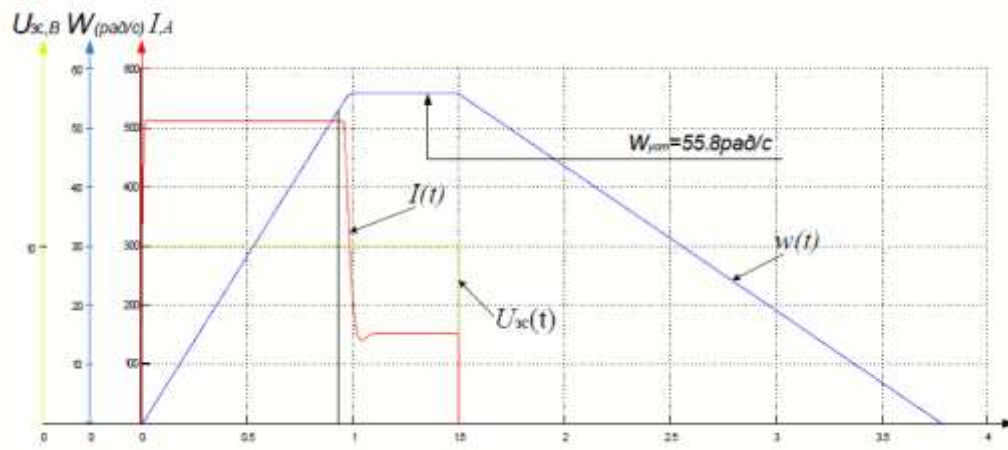


Рис. 2.18. Перехідні процеси при  $M_c = 1100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $U_3 = 2 \text{ В}$ , зростання  $U_3 = 10 \text{ В}$ , зменшення  $U_3 = 2 \text{ В}$ , та гальмуванні  $U_3 = 0 \text{ В}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

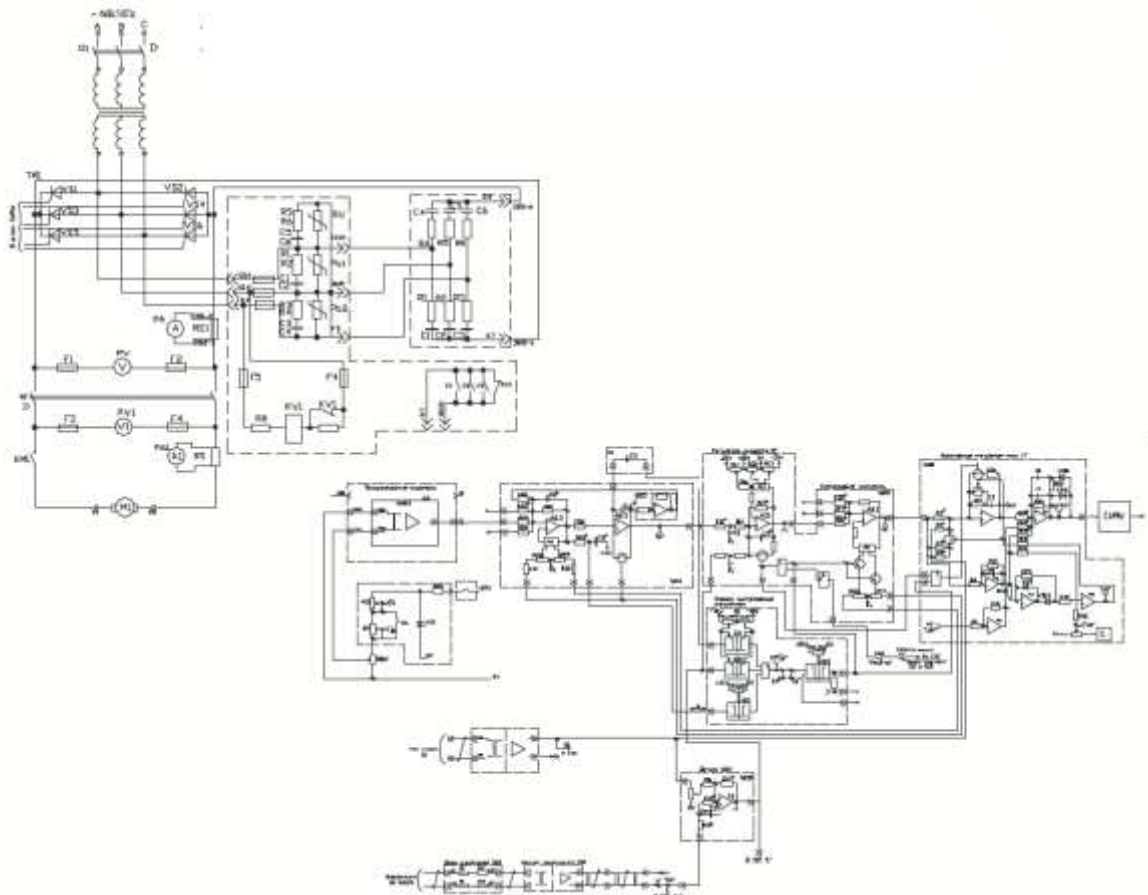


**Рис. 2.19.** Перехідні процеси при  $M_c = 1100 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ,  $U_3 = 10 \text{ В}$  та гальмуванні  $U_3 = 0 \text{ В}$

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

## 2.14 Принципова схема САР ЕП

На рис.2.20 представлена принципова схема САР швидкість двигуна.



**Рис. 2.20.** Принципова схема електроприводу агломашины

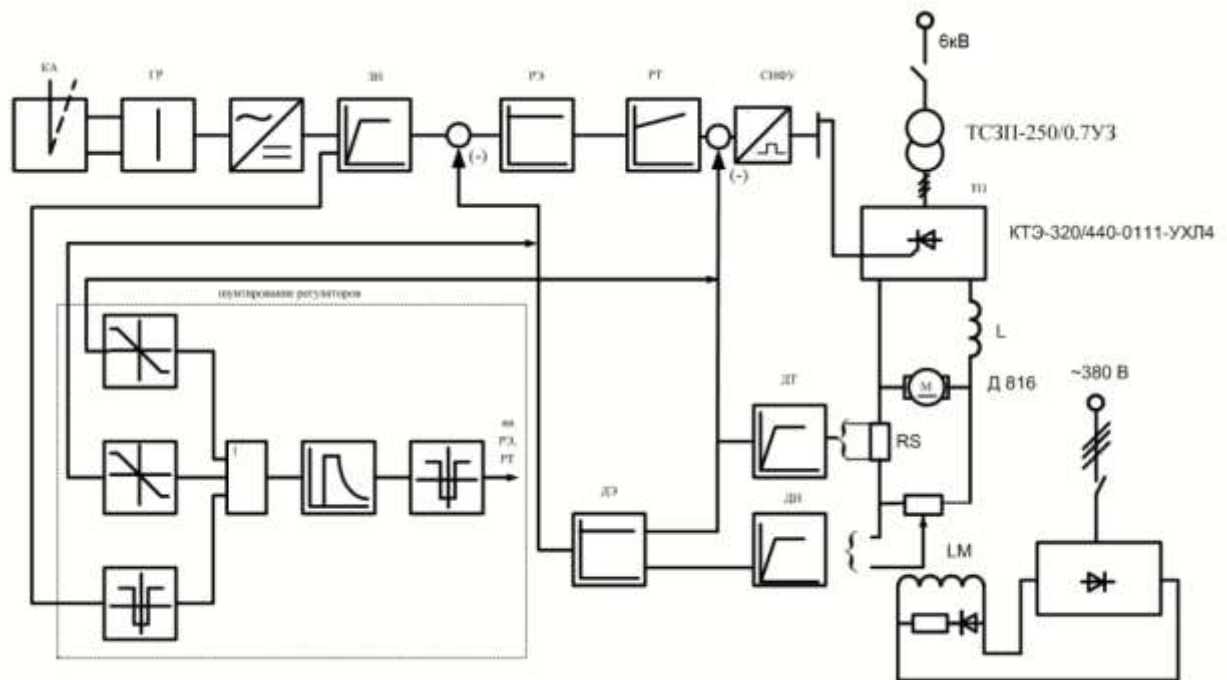
Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

САР є комплексним пристроєм на типових блоках УБСР – АІ (уніфікована блокова система регуляторів – аналогова гілка). Уніфікований сигнал у системі УБСР – АІ складає 10 В, напруга живлення постійним струмом 15В та 24 В, джерела живлення загальні. Для тиристорного електроприводу постійного струму, механізму агломації, системи підлеглого регулювання організовано два контури регулювання. Зовнішній контур служить для регулювання швидкості двигуна, побудований на П – регуляторі ЕРС, а внутрішній – для підлеглого регулювання струму якоря. Об'єктом управління внутрішнього контуру є тиристорний перетворювач і якірний ланцюг електродвигуна, а зовнішнього контуру – механічна частина ЕП. Напруга завдання подається від командоапарата на вхід САР, сигнал з регулятора ЕРС надходить на вхід регулятора струму. На вході регулятора струму формується сигнал керування для СІФУ, що визначає кут відкривання тиристорів  $\alpha$ .

Як контурні регулятори в системі підлеглого регулювання застосовуються операційні підсилювачі (ОУ). ОУ представляють собою сукупність підсилювача постійного струму (УПТ) та вирішальних ланцюгів, що надають йому необхідної характеристики. УПТ характеризується високим коефіцієнтом посилення, великим вхідним та малим вихідним опором, високою швидкістю.

## 2.15 Функціональна схема ЕП

На рис. 2.21 представлена функціональна схема автоматизованого неререверсивного тиристорного електроприводу постійного струму механізму агломації. Розглянемо схему та призначення її основних елементів. Електродвигун М отримує живлення від неререверсивного тиристорного перетворювача ТП, який живиться від трифазної мережі через автоматичний вимикач QF1 та розділовий трансформатор Т1. Вимикач захищає блоки від коротких замикань. Силовий тиристорний блок перетворювача виконаний за трифазною мостовою схемою.



**Рис. 2.21. Функціональна схема автоматизованого нереверсивного тиристорного електропривод постійного струму механізму агломашини**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [4]

Система автоматичного регулювання (САР) є двоконтурною схемою підпорядкованого регулювання швидкості з негативним зворотнім зв'язком за швидкістю. Внутрішній контур – контур струму.

Система імпульсно-фазового керування (СІФУ) генерує керуючі імпульси для тиристорів силового блоку і змінює їх фазу в залежності від величини керуючого сигналу на її вході з метою регулювання напруги перетворювача та швидкості електродвигуна.

Величина вхідного сигналу СІФУ є функцією величин керуючого сигналу та сигналів зворотних зв'язків, що надходять у схему управління ЕП.

Управління електродвигуном (пуск, регулювання швидкості, гальмування та ін.) здійснюється за допомогою безконтактного командоконтролера SA з посту управління.

Команда апарат дає звичайний ступінчастий сигнал управління, що викликає відповідне поступове збільшення швидкості приводу. Однак швидка зміна швидкості приводу може викликати надмірний кидок динамічного

струму, пропорційного похідній за швидкістю. Тому в схемі вживаються заходи щодо обмеження динамічного струму при розгоні.

З цією метою на вхід регулятора швидкості РС замість ступінчастого сигналу подається сигнал, який змінюється лінійно. Перетворення ступінчастого сигналу в сигнал, що лінійно змінюється в часі, здійснюється задатчиком інтенсивності ЗІ.

За допомогою датчика швидкості реалізовано зворотній зв'язок за швидкістю двигуна, а за допомогою датчика струму ДТ реалізовано зворотний зв'язок струму двигуна.

Існуючий сигнал з датчика швидкості та задатчика інтенсивності надходить на вхід П-регулятора швидкості. Вихідний сигнал з регулятора швидкості РС надходить на вхід регулятора струму РТ. Сигнали завдання швидкості, зворотного зв'язку по швидкості та заданого значення похідної за швидкістю ( $dn/dt$  – прискорення) надходять на вхід пристрою шунтування регуляторів. За наявності будь-якого з перерахованих сигналів з управління, що перевищують граничне значення, на вході пристрою з'являється позитивна напруга, яка через підсилювач надходить на управління ключами, встановленими в ланцюзі регулювання рівня обмеження РС та на вхід блокування РТ. Т. е. На РС встановлюється необхідний рівень обмеження. При зменшенні всіх сигналів на вході пристрою до рівнів менших за встановлене порогове значення, напруга на підсилювачі плавно зменшується до певного значення. При досягненні цієї напругою нульового рівня вихідний сигнал РС дорівнює нулю, тому що стає рівним нулю рівень обмеження РС, через відключення ключів у ланцюзі завдання рівня обмеження. При подачі сигналу завдання швидкості, розшунтування регуляторів відбувається після зменшення вхідних сигналів до граничного значення.

РТ отримує на вході сигнал завдання з П – регулятора швидкості та сигнал зворотний зв'язок по струму. На вході РТ формується напруга управління для СІФУ, яка визначає кут регулювання  $\alpha$ .

## 2.4 Економічне обґрунтування розроблених технологічних рішень

Метою економічного обґрунтування є оцінка доцільності впровадження модернізованого електроприводу конвеєра агломераційного виробництва на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та частотного перетворювача.

У базовому варіанті електропривод конвеєра працює в нерегульованому режимі, що призводить до:

- підвищених пускових струмів;
- перевитрат електроенергії;
- інтенсивного зносу механічних елементів;
- обмежених можливостей керування продуктивністю.

Запропоноване технічне рішення забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості руху стрічки, зниження енергоспоживання та підвищення надійності роботи обладнання.

У кваліфікаційній роботі проведено модернізацію електроприводу на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором та частотним перетворювачем.

Розроблений регульований електропривод призначений для приводу стрічкового конвеєра агломераційного виробництва, який використовується для транспортування сипких матеріалів (шихти, агломерату) між технологічними ділянками.

Електропривод забезпечує:

- плавний пуск і зупинку конвеєра без ударних навантажень;
- регулювання швидкості руху стрічки відповідно до технологічних вимог;
- стабілізацію моменту та швидкості при змінному навантаженні;
- роботу в тривалому режимі з допустимими перевантаженнями;
- захист електродвигуна і механізмів від аварійних режимів.

Економічна ефективність розробленого електроприводу конвеєра визначається не тільки прямими капітальними витратами, а й сукупністю

технічних і експлуатаційних переваг, що забезпечують підвищення надійності, довговічності та керованості обладнання в умовах важкого агломераційного виробництва.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було обґрунтовано вибір системи електроприводу постійного струму з тиристорним перетворювачем, що є традиційним і перевіреним рішенням для металургійних механізмів із великими пусковими моментами та тривалими режимами роботи.

Виходячи з розрахованих навантажень, обрано краново-металургійний двигун постійного струму серії Д, типу Д818, потужністю **85 кВт** та номінальною швидкістю **540 об/хв**, напруга – 440 В; струм – 210 А; кутова швидкість - 540 об/хв.

Економічні переваги такого вибору полягають у наступному:

- наявність **запасу по потужності** забезпечує роботу двигуна в полегшеному тепловому режимі, що зменшує швидкість старіння ізоляції та подовжує міжремонтний ресурс;
- двигуни серії Д спеціально призначені для роботи в **важких умовах металургійного виробництва**, що знижує ризик аварійних простоїв та витрати на позапланові ремонти;
- висока перевантажувальна здатність дозволяє уникнути необхідності встановлення додаткових механічних редукторів або резервних приводів.

Таким чином, дещо вищі первинні витрати на двигун компенсуються зменшенням експлуатаційних витрат та підвищенням надійності технологічного процесу.

#### **Економічне обґрунтування вибору тиристорного перетворювача**

Для живлення двигуна обрано тиристорний перетворювач **КТЕ 320/440–0111–УХЛ4**, який відповідає номінальним параметрам двигуна ( $U_{дн} = 440$  В,  $I_{дн} = 320$  А) і має запас по струму.

Основні економічні переваги застосування тиристорного перетворювача:

- можливість **плавного регулювання швидкості** в широкому діапазоні без додаткових втрат енергії на реостатах;
- зменшення пускових струмів порівняно з нерегульованими системами, що знижує навантаження на електричну мережу та силове обладнання;
- підвищення точності підтримання швидкісних режимів, що позитивно впливає на стабільність роботи конвеєра та якість технологічного процесу.

Застосування узгоджувального трансформатора **ТСЗП-250/0,7УЗ** у складі перетворювача дозволяє оптимально погодити параметри мережі та вентиляного перетворювача, що зменшує втрати та підвищує загальний ККД системи.

#### **Економічна доцільність застосування згладжувального дроселя**

При живленні двигуна від тиристорного перетворювача в якорному колі з'являються змінні складові струму, які призводять до:

- додаткового нагріву обмоток;
- погіршення умов комутації;
- зниження жорсткості механічних характеристик.

Включення згладжувального дроселя **ФРОС-65/05УЗ** ( $L = 1,5$  мГн,  $I_n = 250$  А) дозволяє істотно зменшити амплітуду пульсацій струму.

Хоча застосування дроселя призводить до:

- збільшення габаритів і маси приводу;
- деякого зростання вартості системи;
- певного погіршення динамічних властивостей,

економічний ефект від його використання є позитивним, оскільки:

- зменшуються теплові втрати та знос колекторно-щіткового вузла;
- подовжується строк служби двигуна;
- знижуються витрати на технічне обслуговування і ремонти;
- підвищується надійність роботи приводу в тривалих режимах.

Запропонована система електроприводу забезпечує:

- відповідність усім вимогам технічного завдання;

- високу надійність у важких умовах агломераційного виробництва;
- зменшення експлуатаційних витрат за рахунок підвищеного ресурсу обладнання;
- стабільну роботу конвеєра без перевантажень і аварійних зупинок.

Хоча початкові капітальні витрати на тиристорний перетворювач і згладжувальний дросель є більшими порівняно з простими нерегульованими схемами, вони компенсуються:

- скороченням витрат на ремонти;
- зменшенням витрат від простоїв обладнання;
- підвищенням довговічності електроприводу.

З економічної точки зору прийняті в роботі технічні рішення є **обґрунтованими та доцільними**. Спроектований електропривод поєднує достатній запас по потужності, високі регульовальні властивості та надійність, що забезпечує ефективну експлуатацію в умовах агломераційного виробництва та відповідає сучасним вимогам електромеханіки промислових приводів.

## **2.5 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації конвеєра агломераційного виробництва**

### **Загальна характеристика умов праці**

Конвеєр агломераційного виробництва є складним електромеханічним об'єктом, експлуатація якого здійснюється в умовах підвищеної запиленості, температурних впливів, наявності рухомих механізмів та електрообладнання значної потужності. У зв'язку з цим безпечна робота конвеєра можлива лише за умови впровадження комплексу технічних і організаційних заходів з охорони праці.

Обслуговування електроприводу та механічної частини конвеєра дозволяється лише кваліфікованому персоналу, який пройшов відповідну підготовку, інструктаж і має необхідну групу з електробезпеки.

Аналіз потенційно можливих шкідливих та небезпечних факторів проєктованого виробничого середовища.

Шкідливими факторами є:

1. Запиленість (металевим, струмопровідним пилом різних фракцій);
2. Загазованість;
3. Підвищений рівень шуму та вібрації.
4. Незадовільний мікроклімат.
5. Незадовільне освітлення.

Небезпечними факторами є:

1. Можливість отримання травм внаслідок:
  - а) рухи машин та механізмів;
  - б) рух виробничого матеріалу;
  - в) викиду гарячого шлаку з-під запального горна.
2. Поразка електричним струмом під час обслуговування електрообладнання.

Безпечна експлуатація механічної частини конвеєра

Основну небезпеку для обслуговуючого персоналу становлять рухомі елементи конвеєра, зокрема стрічка, приводні барабани та з'єднувальні муфти. З метою запобігання травматизму передбачено:

- встановлення суцільних або сітчастих огорожень на небезпечних ділянках;
- обладнання конвеєра системою аварійної зупинки, що дозволяє негайно вимкнути привід у разі виникнення небезпечної ситуації;
- заборону виконання регулювальних і ремонтних робіт без повного знеструмлення електроприводу;
- організацію безпечних зон обслуговування з достатнім освітленням і вільним доступом до органів керування.

Запиленість - пил агломераційного цеху в основному складається з коксового пилу та оксидів заліза. Для боротьби з пилом у цеху використовуються різноманітні фільтри, зрошувачі та пилососи. Пил за

ступенем її подрібнення (дисперсності) ділять на дві групи: видиму, з розміром частинок понад 10 мкм та мікроскопічну, менше 10 мкм.

Загазованість - присутність в атмосфері цеху шкідливих газів та аерозолів обумовлена порушеннями технологічного режиму, несправністю та недосконалістю технологічного обладнання.

Шум - технологічні операції при виготовленні та транспортуванні агломерату супроводжується утворенням шумів низької та високої частоти. Рівень шуму становить 75дБ, ПДУ згідно з [14] рівень шуму 80дБ. Зниження шуму досягається шляхом динамічного балансування механізмів, звукоізоляції постів та кабін управління, удосконаленням конструкції механізмів, а також використання індивідуальних засобів захисту берушів.

Вібрація - для боротьби з вібрацією передбачені віброгасні фундаменти, віброізоляційні матеріали з листів, сталевих пружин та гумових прокладок.

Мікроклімат - згідно з санітарними нормами площа на одну особу в приміщенні має бути не менше 4,5 м<sup>2</sup> та об'єм не менше 15 м<sup>2</sup>, повітрообмін повинен становити не менше 20м<sup>3</sup>/год.

Освітлення – джерела живлення аварійного освітлення відповідають вимогам ПУЕ та задовольняють основним вимогам до виробничого освітлення, а це:

- а) забезпечено досить рівномірний розподіл яскравості на робочій поверхні, а також у межах навколишнього простору;
- б) на робочій поверхні відсутні різкі тіні;
- в) у полі зору відсутня пряма та відображена блискітність;
- г) величина освітленості завжди постійна у часі.

#### **Захист від шкідливих та небезпечних виробничих факторів**

У процесі роботи агломераційного конвеєра персонал піддається впливу пилу, шуму та підвищених температур. Для зменшення негативного впливу цих факторів передбачено:

- застосування вентиляційних систем для зниження концентрації пилу в повітрі робочої зони;

- використання індивідуальних засобів захисту органів дихання, слуху та зору;
- теплоізоляцію окремих елементів обладнання, що мають підвищену температуру;
- раціональну організацію режимів праці та відпочинку обслуговуючого персоналу.

#### Пожежна безпека та запобігання аваріям

Пожежна небезпека на агломераційному виробництві обумовлена наявністю пилу, електрообладнання та високих температур. Для мінімізації ризику займання необхідно:

- застосовувати кабельну продукцію з підвищеною термостійкістю та негорючою ізоляцією;
- підтримувати електрообладнання в справному стані та не допускати його перегріву;
- забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння поблизу конвеєра;
- регулярно очищувати обладнання від пилових відкладень.

Запропоновані заходи з охорони праці забезпечують безпечну експлуатацію електроприводу та механічної частини конвеєра агломераційного виробництва. Їх реалізація дозволяє знизити ймовірність травматизму, аварійних ситуацій і забезпечити стабільну та надійну роботу обладнання в умовах важкого промислового середовища.

## ВИСНОВКИ

1. У магістерській роботі спроектовано електропривод постійного струму конвеєра, який повністю відповідає вимогам технічного завдання та умовам роботи агломераційного виробництва.
2. На основі розрахованих навантажень і швидкісних параметрів обґрунтовано вибір краново-металургійного двигуна постійного струму типу Д818 потужністю 85 кВт, що забезпечує необхідний запас по потужності та підвищену надійність у важких режимах експлуатації.
3. Для живлення двигуна обрано тиристорний перетворювач КТЕ 320/440–0111–УХЛ4 з узгоджувальним трансформатором ТСЗП-250/0,7УЗ, що забезпечує плавне регулювання швидкості, обмеження пускових струмів та стабільність механічних характеристик приводу.
4. Проаналізовано вплив пульсацій струму якоря при тиристорному живленні та обґрунтовано застосування згладжувального дроселя ФРОС–65/05УЗ, який покращує умови комутації, зменшує теплові навантаження і підвищує ресурс електродвигуна.
5. Прийняті технічні рішення забезпечують жорсткі механічні характеристики електроприводу, стабільну роботу конвеєра та зниження експлуатаційних витрат за рахунок підвищення довговічності електромеханічного обладнання.
6. Результати виконаної роботи підтверджують технічну та економічну доцільність застосування розробленого електроприводу в системах агломераційного виробництва.

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій  
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату  
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Гузек Руслан Миколайович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений(а). Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025

