

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____	<u>О. КОЛЛАРОВ</u>
(підпис)	(ініціали, прізвище)
«___» _____	2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
БАКАЛАВРА

на тему Розрахунок та вибір обладнання автоматичної конвеєрної лінії

Виконав студент 4 курсу, групи ЕЛК-20
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)
та електромеханіка»

_____ Кирило ШАБАЛІН

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник доц. каф., к.т.н. Ліана СЕРГІЄНКО

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

ЛУЦЬК – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: бакалавр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

(О. КОЛЛАРОВ)

« » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кирилу ШАБАЛІНУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Розрахунок та вибір обладнання автоматичної конвеєрної лінії

керівник роботи Ліана СЕРГІЄНКО, к. т. н.

(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 03 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Продуктивність 610 т/год, висота транспортування 19 м, протяжність конвеєру 275 м, кут нахилу 8°, транспортований матеріал – залізна руда, умови експлуатації – важкі, приводний двигун – асинхронний з короткозамкненим ротором, автоматична система керування – скалярна, привод – редукторний

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

1. Аналіз поточного стану електроприводів конвеєрних систем

2. Тяговий розрахунок конвеєру. Вибір обладнання електроприводу

3. Розробка системи керування

4. Моделювання розробленої системи та аналіз отриманих результатів

5. Розробка питань з охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень, якщо передбачається)
Вісім слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1–4	Л. В. Сергієнко, доц. каф.		
Розділ 5	О. Ю. Колларов, зав. каф.		
Нормоконтроль	Е. М. Немцев, ст. викл. каф.		

7. Дата видачі завдання 29 квітня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	29.04–06.05.24	
2.	Розділ 2	07.05–12.05.24	
3.	Розділ 3	13.05–20.05.24	
4.	Розділ 4	21.05–29.05.24	
5.	Розділ 5	30.05–06.06.24	
6.			
7.			
8.			
9.			

Студент _____
(підпис)

Кирило ШАБАЛІН _____
(ім’я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ліана СЕРГІЄНКО _____
(ім’я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кирило ШАБАЛІН. Розрахунок та вибір обладнання автоматичної конвеєрної лінії / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, переліку джерел посилання та двох додатків.

У першому розділі виконаний аналітичний огляд конструкції та застосування стрічкових конвеєрів, поняття механізмів безперервного транспорту та стрічкового конвеєру, розглянута схема стрічкового конвеєра, вивчені основні терміни стрічкових конвеєрів.

У другому розділі розглянуто особливості вибору системи керування, вивчені різні типи систем керування, їх переваги та недоліки, для подальших розрахунків остаточно обрана бажана система керування.

У третьому розділі за представленою схемою та параметрами конвеєра, проведений тяговий розрахунок стрічки, обраний двигун, редуктор та частотний перетворювач.

У четвертому розділі представлені теоретичні відомості про скалярне керування з математичним описом асинхронного двигуна, його функціональна схема, визначені параметри схеми заміщення, синтезовані регулятори струму та швидкості, промодельовано схему та проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, стрічка, перерегулювання, натяг, електропривод, електромеханічна система, регулятор струму, перетворювач частоти, регулятор швидкості, зворотний зв'язок, Simulink, Matlab

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ	8
1.1 Поняття механізмів безперервного транспорту та стрічкового конвеєру	8
1.2 Деякі терміни стрічкових конвеєрів	9
2 ВИБІР СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА	13
2.1 Особливості вибору системи керування	13
2.2 Огляд приводних систем конвеєра	14
2.2.1 Система прямого пуску асинхронного двигуна	15
2.2.2 Асинхронний двигун зі зменшеною пусковою напругою	16
2.2.3 Асинхронний двигун з фазним ротором і прямий привід	18
2.2.4 Двигун постійного струму	20
2.2.5 Асинхронний двигун з живленням від перетворювача частоти	21
2.2.6 Система керування стрічковим конвеєром	23
2.3 Контролери приводу	23
2.3.1 Вимоги до контролерів приводу	23
2.3.2 Алгоритми управління запуском, роботою та зупинкою	24
2.4 Висновок	25
3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА	26
3.1 Розрахункова схема та дані конвеєра	26
3.2 Тяговий розрахунок стрічки	27
3.3 Розрахунок і вибір приводного двигуна	37
3.4 Розрахунок і вибір частотного перетворювача	42
4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА	46
4.1 Теоретичні відомості. Математичний опис системи ПЧ-АД	46
4.2 Розрахунок параметрів приводного двигуна	51
4.3 Синтез регуляторів	58

4.4 Імітаційне моделювання системи керування приводом стрічкового конвеєра в Simulink	59
ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	64
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	68

ВСТУП

Автоматизація процесів у видобувній промисловості, зокрема у сфері видобування залізної руди, стає все більш актуальною завдяки стрімкому розвитку технологій. Одним із ключових елементів цього процесу є стрічкові конвеєри, які відіграють важливу роль у переміщенні великих обсягів матеріалу.

Стрічковий конвеєр – це механічна система, що складається з неперервної стрічки, яка рухається навколо приводного та натяжного барабанів. Він дозволяє ефективно переміщувати руду з місця видобутку до місця обробки. Його переваги включають велику продуктивність, надійність і ефективність використання простору.

Автоматизація конвеєрів включає в себе застосування різноманітних систем керування, які дозволяють оптимізувати процеси переміщення матеріалу. Ці системи забезпечують точне регулювання швидкості, моніторинг та діагностику стану конвеєрів, а також автоматичну корекцію робочих параметрів. Завдяки автоматизації можна значно зменшити кількість простоїв, підвищити ефективність використання енергії та забезпечити безперервну роботу навіть у важких умовах. До того ж, автоматизовані системи можуть передбачати можливі збої та здійснювати превентивне технічне обслуговування.

Системи керування конвеєрами відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності та безпеки виробничих процесів. Вони дозволяють підтримувати постійний потік матеріалу, уникати аварійних ситуацій та максимізувати продуктивність обладнання. Зокрема, ці системи можуть інтегруватися з іншими елементами виробничого процесу, що дозволяє створювати комплексні автоматизовані виробничі лінії. Крім того, завдяки системам керування можна забезпечити точний контроль витрат матеріалів і ресурсів, що сприяє зниженню операційних витрат і підвищенню загальної ефективності виробництва.

1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

1.1 Поняття механізмів безперервного транспорту та стрічкового конвеєру

Механізми безперервного транспорту бувають механічними, пневматичними і гідравлічними пристроями для переміщення, за допомогою яких матеріал, що підлягає обробці, може переміщатися безперервно по фіксованій конвеєрній трасі обмеженої довжини від точки подачі до точки розвантаження, можливо з різною швидкістю або в фіксованому циклі. Ці конвеєри доступні у стаціонарних або мобільних версіях і використовуються для транспортування сипучих матеріалів або штучних вантажів.[1]

Стрічкові конвеєри – механізми безперервного транспорту, стрічки яких мають натяжний елемент, що складається з синтетичних тканин або сталевих тросів з гумовим або синтетичним покриттям; стрічки підтримуються прямими або жолобоподібними роликами або мають ковзну опору на гладкій основі як натяжний і підтримуючий елемент. Фактичне транспортування здійснюється на верхньому прогоні, у деяких спеціальних випадках на верхньому та зворотному прогонах. Для крутих кутів транспортування використовуються стрічки з ребристим верхнім покриттям, стрічки спеціального призначення або сендвіч-стрічки.

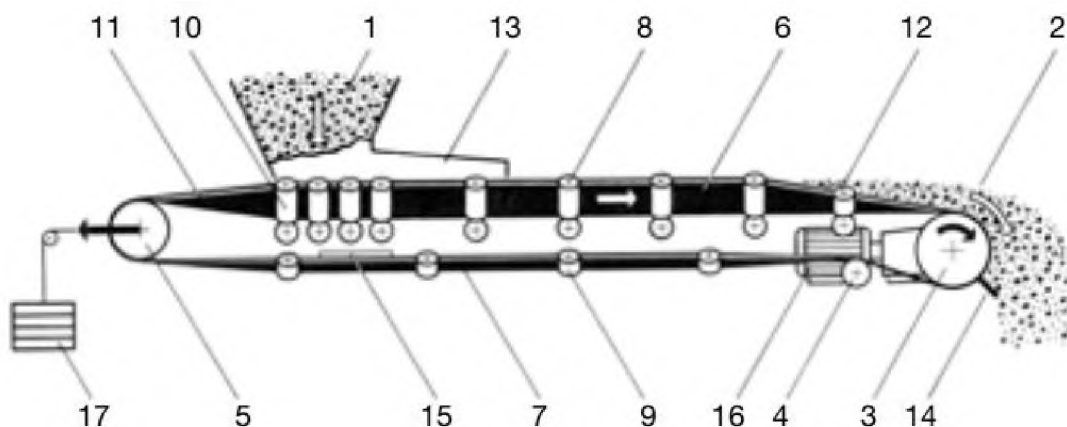


Рисунок 1.1 – Схема стрічкового конвеєра

На рисунку 1.1 приведені такі позначення:

1. Подача вантажу
2. Розвантаження
3. Приводний барабан
4. Натяжний або відхиляючий барабан
5. Натяжний барабан
6. Верхній прогін (робоча сторона)
7. Зворотний прогін (холоста сторона)
8. Ролики верхнього прогону
9. Ролики зворотного прогону
10. Ролики подачі
11. Перехід від плоского до жолобоподібного стану
12. Перехід від жолобоподібного до плоского стану
13. Жолоб для подачі
14. Очисник стрічки (поперечний скребок)
15. Очисник стрічки (скребок плужного типу)
16. Приводний пристрій
17. Противага

1.2 Деякі терміни стрічкових конвеєрів

Потік матеріалу – маса або об'єм транспортованого сипучого матеріалу або штучних вантажів за одиницю часу при безперервному транспортуванні. На відміну від цього, потужність не залежить від часу.

Транспортна потужність – об'ємна потужність або потужність транспортованого матеріалу, яка може бути досягнута при заданій швидкості транспортування і доступній площі поперечного перерізу та відстані між ними.

Швидкість транспортування – швидкість руху транспортованого матеріалу. Конвеєрна стрічка як опорний елемент визначає швидкість руху матеріалу на ній.

Відстань між осями – відстань між приводним і натяжним барабаном конвеєра. Довжина стрічки як внутрішня окружність нескінченної, слабо натягнутої стрічки визначається цією відстанню з урахуванням окружності барабанів і будь-яких поворотів стрічки (точки натягу, точки розвантаження тощо).

Довжина транспортування – відстань між центром точки подачі матеріалу і віссю розвантажувального барабана. Якщо транспортований матеріал знімається, то береться до уваги центр розвантаження матеріалу. Загалом, довжина транспортування приблизно дорівнює відстані між осями. Проте довжина транспортування може бути меншою за відстань між осями або змінюватися під час процесу транспортування.

Висота транспортування – різниця у висоті між подачею матеріалу і його розвантаженням. Стрічкові конвеєри з секціями під різними кутами нахилу визначають висоту секції, віднесену до довжини секції.

Роликоопори. Стрічка зазвичай підтримується нерухомими роликами або підвішеними роликами. Стрічка може бути плоскою або жолобоподібною завдяки багатороликовим роликоопорам. Жолоблення дозволяє збільшити потік матеріалу і сприяє кращому направленню стрічки. Відстань між роликами зазвичай більша на зворотному прогонах, ніж на верхньому прогонах, і може змінюватися в межах одного стрічкового конвеєра. Спеціальні конструкції або розташування роликів часто застосовуються в місцях подачі та для очищення стрічки.



Рисунок 1.2 – Форма стрічки в залежності від типу роликоопор (зліва направо): плоска стрічка, жолобоподібна стрічка з V-подібним жолобом, жолобоподібна стрічка з 3-роликів жолобом, жолобоподібна стрічка з 5-частинним жолобом, стрічка з квадратним жолобом

Конвеєрна стрічка. Завданням конвеєрної стрічки є транспортування матеріалу та одночасна передача тягових зусиль для подолання рухових опорів. Конвеєрна стрічка складається, як правило, з натяжного елемента та верхнього і нижнього покриттів, які формують захисне покриття для серцевини (рис. 1.3). Конвеєрні стрічки, які використовуються в стрічкових конвеєрах, слід розглядати як безперервні елементи транспортування, що складаються з одного або декількох відрізків стрічки, з'єднаних на кінцях. Короткі конвеєрні стрічки також можуть виготовлятися в безкінечних версіях.



Рисунок 1.3 – Будова конвеєрної стрічки:

а) стрічка зі сталевим тросом; б) стрічка з тканинним каркасом

На рисунку 1.3 зображені такі елементи конвеєрної стрічки:

1. Верхнє покриття;
2. Нижнє покриття;
3. Натяжний елемент;
4. Формований край;
5. Покриття;
6. Натяжний елемент з тканини.

Стрічки для крутих кутів транспортування. Відкат матеріалу можна запобігти за допомогою ребристих насічок, гребенів або поперечних перегородок на стороні носія, коли кут нахилу транспортування крутий. Конструкція може бути адаптована до матеріалу, що транспортується, і до необхідної поперечної стабільності (рис. 1.4). Поперечні перегородки та

гофровані бокові стінки можуть бути комбіновані для утворення гофрованої коробчастої стрічки.



Рисунок 1.4 – Приклади стрічок для крутих кутів транспортування

Натяжний елемент. Завданням натяжного елемента є передача сил, створюваних на приводах, для подолання опорів системи до точки, де вони необхідні. У тканинній стрічці натяжний елемент складається з одного або декількох шарів тканини. У випадку стрічки зі сталевими тросами натяжний елемент складається зі сталевих тросів, розташованих в одній площині та паралельно один одному; ці троси вбудовані в серцевинну гуму.

Серцевинна гума. Серцевинна гума охоплює сталеві троси натяжного елемента зі сталевими тросами, забезпечуючи добру адгезію до матеріалу покриття з високою динамічною несучою здатністю. Фізичні властивості зберігаються навіть після багаторазової вулканізації, наприклад, під час з'єднання.

Покриття стрічки. Покриття захищає натяжний елемент від пошкоджень та інших впливів навколишнього середовища. Верхнє і нижнє покриття можуть відрізнятися по товщині. Нижнє покриття може бути відсутнім у стрічках з оголеним нижнім шаром для ковзного режиму роботи. Додаткові елементи, призначені для підвищення ударостійкості або для моніторингових цілей, можуть бути розташовані в покриттях. Матеріали покриття можуть бути вибрані відповідно до будь-якої сфери застосування.

Поверхнєве структурування. Для покращення утримання матеріалів на схилах або для спеціальних застосувань верхнє покриття може бути виготовлене з рельєфним або ребристим.

2 ВИБІР СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

2.1 Особливості вибору системи керування

Стрічкові конвеєри є важливою системою для транспортування сипучих матеріалів у промисловості. Контроль прикладення пускового крутного моменту від приводної системи до стрічкового полотна впливає на продуктивність, вартість експлуатації та надійність конвеєра. Сила, необхідна для переміщення стрічкового конвеєра, повинна передаватися ведучим барабаном через тертя між ведучим барабаном і стрічковим полотном. Щоб передати потужність, має бути різниця в натягу стрічки при підході стрічкового полотна до ведучого барабана та його відходу від нього. Ці умови справедливі для роботи в усталеному режимі, пуску та зупинки.

Розробники стрічкового конвеєра повинні передбачити контроль прискорення під час пуску, щоб запобігти надмірному натягу стрічкового полотна і навантажень у привідній системі стрічки. Високі прискорювальні сили можуть негативно вплинути на стрічкове полотно, з'єднання стрічки, ведучі барабани, підтримуючі ролики, вали, підшипники, редуктори швидкості та муфти. Неконтрольовані прискорювальні сили можуть спричинити проблеми з продуктивністю системи стрічкового конвеєра, такі як вертикальні криві, надмірний рух натяжної станції, втрата тертя ведучого барабана, розсипання матеріалів і провисання стрічкового полотна. Привідна система стрічки повинна створювати пусковий крутний момент, достатній для запуску конвеєра, і контролювати прискорювальні сили в межах безпечних лімітів. Плавний пуск конвеєра можна здійснити за допомогою обладнання для контролю пускового крутного моменту приводу, як механічного, так і електричного, або їх комбінації. У деяких випадках також бажано контролювати сили під час роботи і зупинки системи стрічкового конвеєра.

Яка найкраща привідна система для стрічкового конвеєра? Це поширене питання постає при розрахунку конвеєра. Відповідь залежить від багатьох

змінних. Найкраща система – це та, що забезпечує прийнятний контроль для пуску, роботи і зупинки за розумною вартістю та з високою надійністю. Для цілей даної дипломної роботи припустимо, що стрічкові конвеєри майже завжди приводяться в дію електричними двигунами. Привідна система стрічки складається з кількох компонентів, включаючи електричний двигун, електричний стартер/контролер двигуна з системою управління/регулювання, муфту двигуна, редуктор швидкості, низькошвидкісну муфту, ведучий барабан, гальмо барабана і систему управління. Важливо при розробці стрічкового конвеєра розглянути можливість застосування кожного компонента в конкретному випадку.

Які вимоги до стрічкового конвеєра? Розробник системи повинен висунути вимоги до стрічкового конвеєра, щоб вибрати та узгодити особливості привідної системи.

Деякі привідні системи стрічкових конвеєрів підходять для контролю пускового крутного моменту та швидкості, але працюють тільки на постійній швидкості. Деякі застосування стрічки вимагають привідну систему, яка може працювати протягом тривалих періодів на менш ніж повній швидкості. Це корисно, коли навантаження приводу має розподілятися між іншими приводами також, коли стрічка використовується як подаючий пристрій для регулювання швидкості транспортування матеріалу, коли швидкість стрічки оптимізується для швидкості переміщення, коли стрічка використовується на повільніших швидкостях для транспортування матеріалів або коли стрічка працює на повільній ревізійній швидкості або для обслуговування. Привід стрічки зі змінною швидкістю вимагатиме системи управління на основі певного алгоритму для регулювання робочої швидкості.

2.2 Огляд приводних систем конвеєра

Далі ми розглянемо електричний привід і пусковий механізм для привідної системи конвеєра. З точки зору системного підходу розглянемо керований

електричний двигун, пусковий механізм, високошвидкісні та низькошвидкісні муфти, редуктор швидкості та привідний барабан. Стрічковий конвеєр потребуватиме прикладання сили для початку руху, що має назву «пусковий крутний момент». Під час руху конвеєр потребуватиме крутного моменту для підтримки як існуючого руху, так і для підтримки прискорення до робочої швидкості в межах часу та теплових обмежень, накладених системою. Результируюче прискорення пропорційне прикладеній силі, поділеній на масу в системі, згідно з другим законом Ньютона. Усі зовнішні інерції системи повинні бути приведені до загальної базової швидкості за функцією квадрата відношення швидкостей.

2.2.1 Система прямого пуску асинхронного двигуна

Найпоширенішим електродвигуном для приводу стрічкових конвеєрів є асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором змінного струму. Відношення крутного моменту двигуна до швидкості двигуна майже лінійне між точками роботи на холостому ході та під повним навантаженням. Оскільки ковзання при повному навантаженні часто має 1-2%, асинхронний двигун змінного струму під час роботи часто можна вважати пристроєм постійної швидкості. Однак під час пуску необхідно розглядати інші характеристики двигуна. У цій області роботи двигуна крутний момент асинхронного двигуна змінного струму є дуже нелінійним, як показано на рисунку 2.1.

Цей привід майже не потребує технічного обслуговування або підтримуючих систем. Вартість і складність цього типу приводу дуже низькі. У багатьох відношеннях цей метод представляє базовий випадок для простих невеликих конвеєрів. Цей тип приводу можна налаштувати для декількох стрічкових приводів в одному або кількох місцях. Приводи повинні запускатися разом або з невеликою затримкою від ведучого до веденого на стороні приводу стрічки. Приводи будуть розподіляти навантаження відповідно до кривих

крутного моменту при ковзанні для кожного двигуна. У разі заклинювання конвеєра ця система приводу буде прикладати повний розривний крутний момент до компонентів стрічки перед зупинкою. Цей крутний момент може бути більше 200 відсотків від номінального значення конвеєра. Заклинювання може бути виявлено шляхом вимірювання високих струмів двигуна, але важливо зазначити, що в цей момент вже було прикладено високий крутний момент. Система керування для цього типу приводу складається з базового набору захисних пристроїв конвеєра, які просто вказують конвеєрній стрічці рухатися або зупинятися.

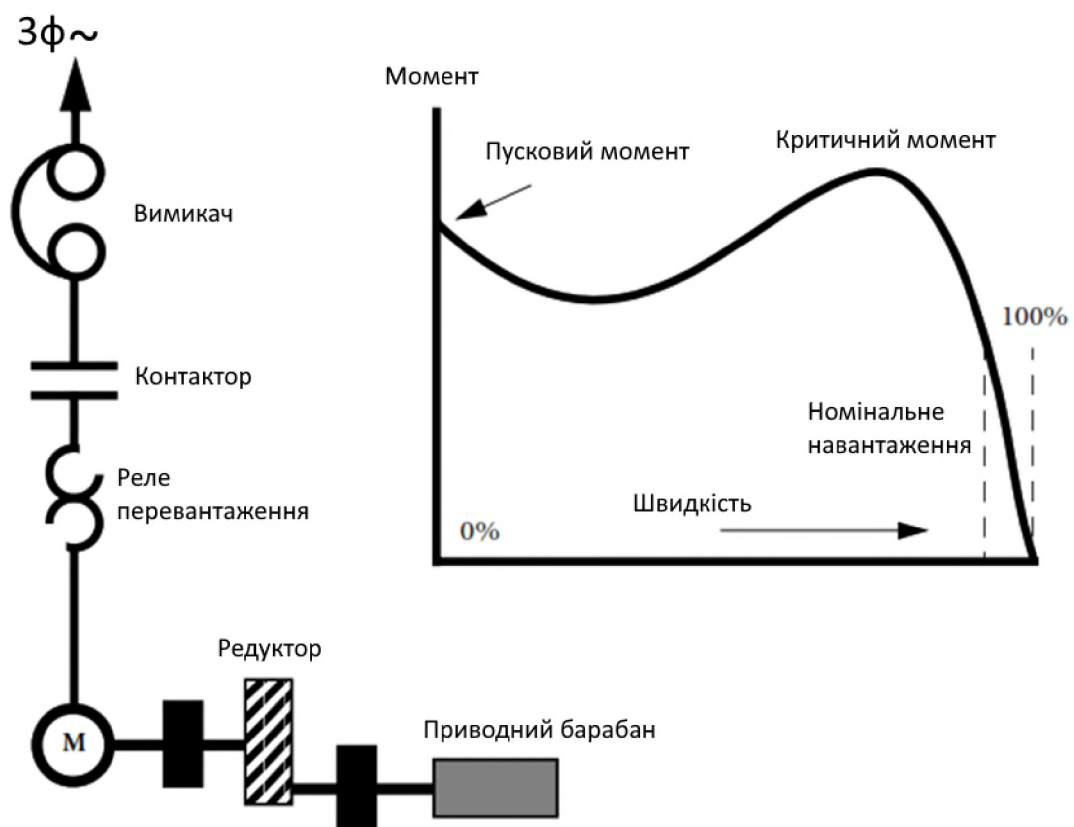


Рисунок 2.1 – Схема прямого включення двигуна в мережу

2.2.2 Асинхронний двигун зі зменшеною пусковою напругою

Використовуючи попередній базовий варіант асинхронного двигуна змінного струму з прямим з'єднанням і додаючи електричний стартер, який може

подавати знижену напругу на статор двигуна, ми отримуємо найпоширеніший тип привідної системи для стрічкових конвеєрів. Оскільки крутний момент асинхронного двигуна змінного струму на будь-якій швидкості є функцією квадрата прикладеної напруги, якщо ми контролюємо напругу, ми можемо контролювати крутний момент під час пуску. Існують різні типи стартерів зі зменшеною напругою, такі як автотрансформатор, конденсатор, реактор, резистор. Але найпоширеніший – тиристорний регулятор напруги (ТРН)(рис. 2.2). Стартери типів автотрансформатора, конденсатора, реактора і резистора використовують перемикання для створення ступеневих приростів прикладеного термінального напруги, тоді як стартери типу ТРН дозволяють безперервно контролювати прикладену середньоквадратичну напругу. Стартер типу ТРН, який став економічно доцільним у 1970-х роках, нині домінує в класифікації стартерів зі зменшеною напругою для конвеєрів. ТРН виготовлений з твердотільних матеріалів без рухомих або зношуваних частин. Завдяки консервативному підходу до розмірів компонентів стартер ТРН є дуже надійним.

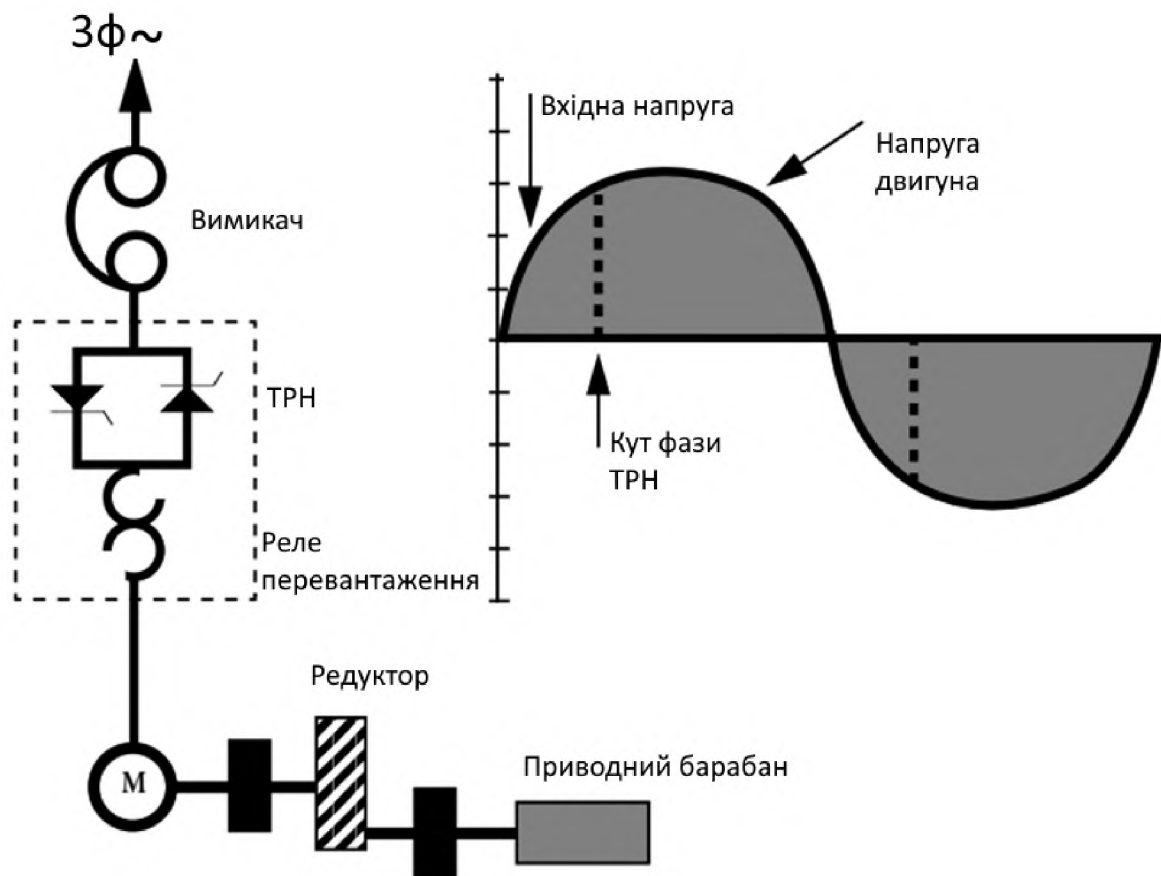


Рисунок 2.2 – Схема керування асинхронного електроприводу від ТРН

Система ТРН вимагає мало обслуговування або підтримуючих систем. Вартість низька, порівняно з повними керованими напівпровідниковими пристроями. Складність системи низька, з можливістю підключення твердотільних регуляторів з вбудованою діагностикою. Система може працювати з простими множинними приводами час пуску, проте не має можливості в повній мірі керувати розподілом навантаження двигуна під час роботи. Крутний момент при заклинюванні конвеєра, знову ж таки, обмежується тільки граничним крутним моментом двигуна до повної зупинки або спрацювання приводу.

2.2.3 Асинхронний двигун з фазним ротором і прямий привід

Асинхронний двигун з фазним ротором є традиційним приводом для середніх і великих конвеєрів(рис. 2.3). Він часто є вибором для запуску великих конвеєрів, важких профілів конвеєра або для частих пусків. Асинхронний двигун з фазним ротором є особливою конструкцією асинхронного двигуна змінного струму. У конструкції з фазним ротором обмотки ротора виведені назовні за допомогою колекторних кілець і щіток. Вставляючи опір і реактивний опір послідовно з обмотками ротора, контролер двигуна може маніпулювати характеристиками ротора, які відносяться до статора на швидкості ковзання. Асинхронний двигун з фазним ротором має ряд кривих крутного моменту відносно швидкості для різних додаткових опорів.

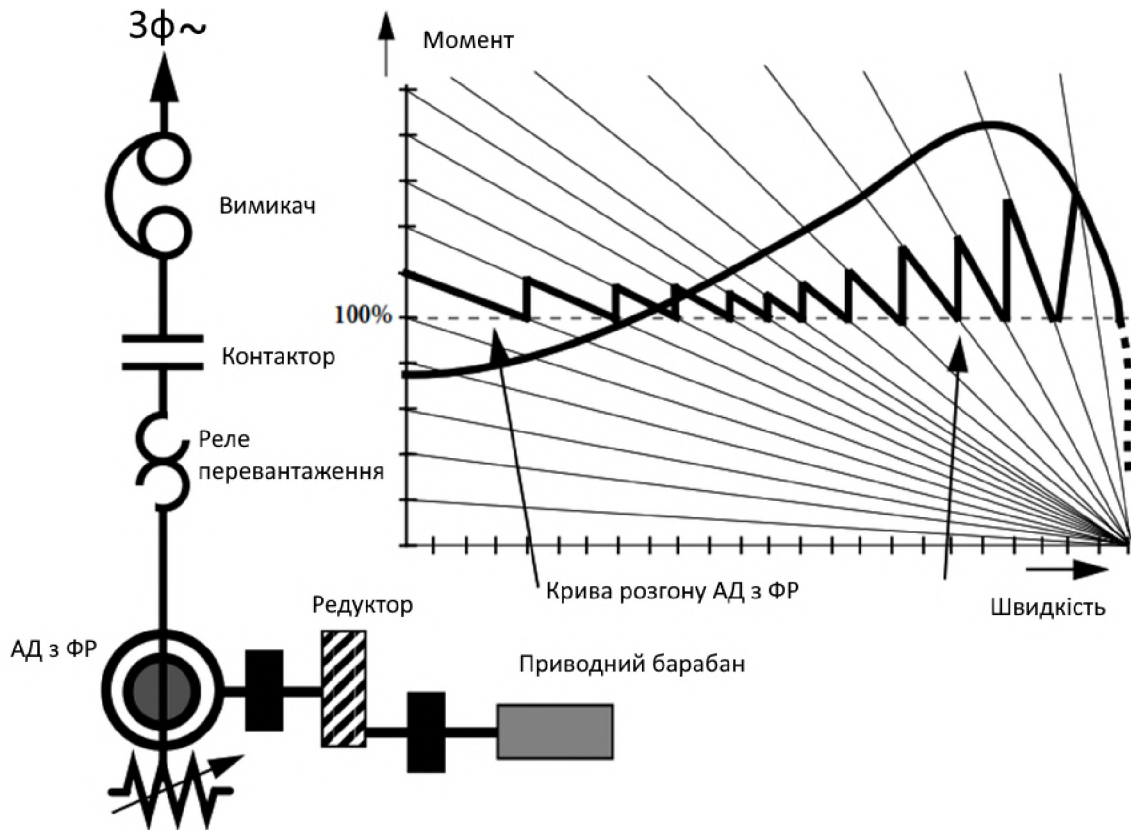


Рисунок 2.3 – Схема керування електроприводу на базі асинхронного двигуна з фазним ротором

При змінах швидкості виникають великі енергетичні втрати в додаткових опорах, тому ефективність низька. Існує тип вторинного керування АД з ФР, де енергія ковзання відновлюється та повертається у первинну електричну лінію, використовуючи напівпровідникового інвертора та трансформатора. Це забезпечує змінну швидкість із малими втратами.

Сьогодні система управління для приводу АД з ФР зазвичай базується на програмному контролі мережі вторинного опору на основі параметрів системи, таких як зворотний зв'язок по швидкості, зворотний зв'язок по струму, температура двигуна, температура опору, завантаженість стрічки та баланс навантаження між декількома двигунами приводу. Програмні контролери зробили такі методи, як бінарне перемикання, простими та ефективними. Більшість систем управління для приводів конвеєра АД з ФР розроблені індивідуально для конкретного застосування.

2.2.4 Двигун постійного струму

Двигуни постійного струму широко доступні з послідовними, паралельними та комбінованими обмотками. Рухома якірна обмотка двигуна виведена назовні через щітки. Для стрічкових конвеєрів зазвичай використовуються двигуни постійного струму з паралельною або комбінованою обмоткою(рис. 2.4). У двигуні постійного струму з паралельною обмоткою базова швидкість визначається постійним струмом збудження паралельного поля. Робоча швидкість двигуна є лінійною функцією напруги якоря, тоді як крутний момент двигуна залежить від струму якоря. Базова швидкість може бути знижена шляхом збільшення струму поля і підвищена шляхом зменшення струму поля в межах допустимого. Базова швидкість двигуна досягається при повній напрузі якоря.

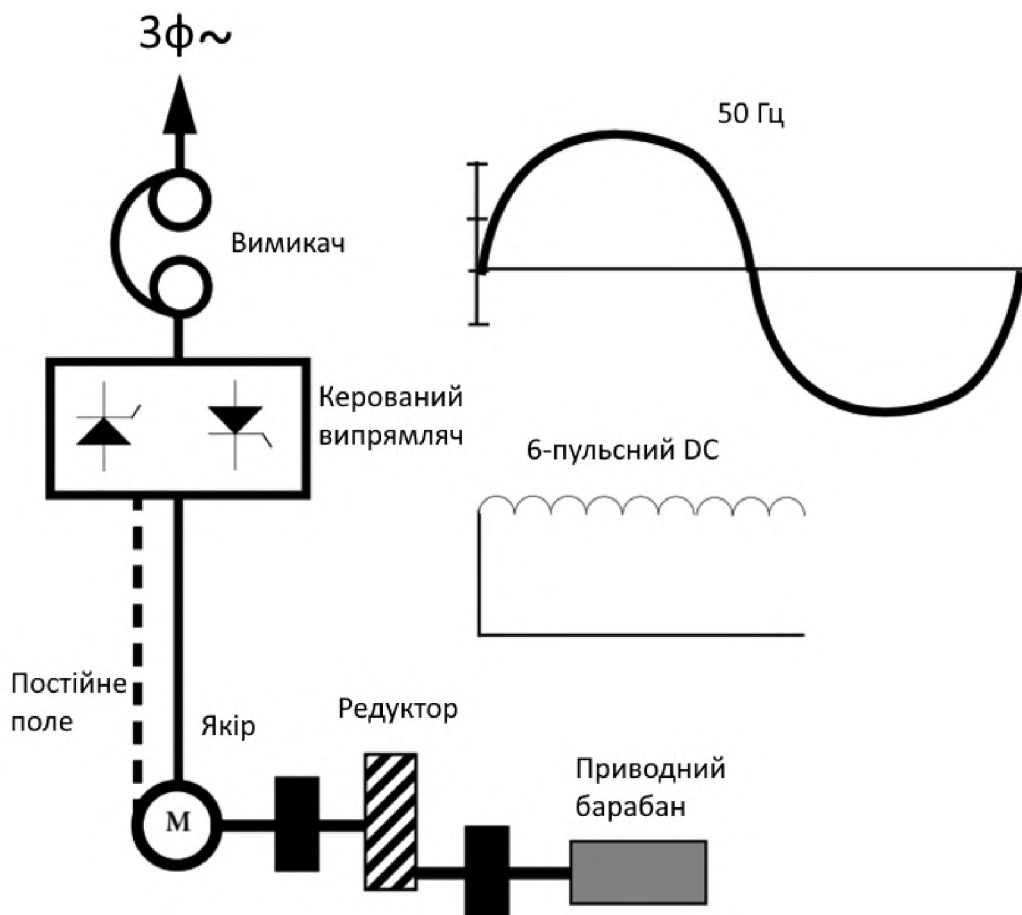


Рисунок 2.4 – Схема керування електроприводу постійного струму

Традиційна система керування двигуна постійного струму для стрічкового конвеєра складалася з системи керування контактами, яка керувала напругою якоря від низької до високої під час пуску та роботи з постійним збудженням паралельного поля. Система регулювання напруги якоря зазвичай складалася з ряду резисторних елементів, розташованих послідовно з якорем двигуна постійного струму. Система підвищувала напругу шляхом поступового видалення резисторних ступенів до тих пір, поки якір двигуна не працював на повній напрузі для роботи. З появою простих систем приводів стрічкових конвеєрів змінного струму, застосування двигунів постійного струму для стрічкових систем стало непопулярним. Це часто було пов'язано з втратами в резисторах, складністю системи керування та обслуговуванням резисторів і щіток двигуна.[2]

Система електроприводу двигуна постійного струму не вимоглива, щодо обслуговування. Двигуну постійного струму та системі охолодження необхідно проводити періодичну інспекцію та очищення. Вартість системи приводу постійного струму значно варіюється в залежності від розміру та типу корпусу двигуна та складності контролера.

2.2.5 Асинхронний двигун з живленням від перетворювача частоти

У цьому методі простий асинхронний двигун змінного струму з'єднується через редуктор швидкості з приводним барабаном, в той час як електронний контролер подає синтезовану змінну хвилю на статор двигуна. Робоча швидкість двигуна змінного струму залежить від кількості полюсів статора та прикладеної напруги.

Контролер, що формує сигнал, називається інвертором або перетворювачем частоти(ПЧ). Зазвичай ПЧ складається з випрямляючої секції, яка приймає напругу мережевої частоти та перетворює її на постійний струм, й

інверторної секції, яка з постійного струму і створює змінний струм з регульованими значеннями частоти та напруги.

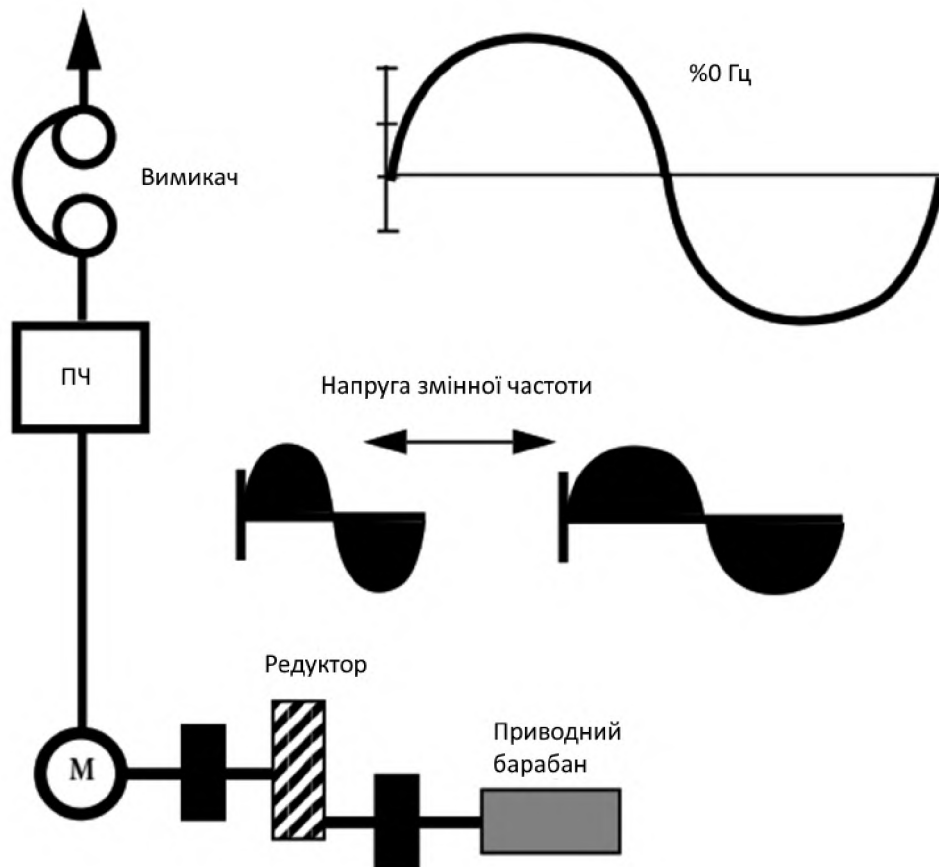


Рисунок 2.5 – Схема керування за схемою ПЧ-АД

Існують три поширені типи контролерів частотних перетворювачів. Найпоширеніший тип — це широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Цей тип складається зі статичної випрямляючої секції та інверторної секції з перемиканням. Частота та напруга контролюються шляхом модуляції часу включення та виключення з'єднання постійного струму за допомогою високошвидкісного перемикання (рис. 2.5).[3]

Привідні системи ПЧ-АД механічно прості, але електрично складні. Приводи ПЧ-АД можуть бути налаштовані для кількох приводів з активним керованим розподілом навантаження. У разі заклинювання конвеєра обмеження струму в перетворювачі визначає верхню межу вихідного крутного моменту двигуна. Система управління для приводу ПЧ-АД складається з елементів стрічкового конвеєра, мікропроцесорного електронного регулятора, силового

електронного перетворювача з захистом та іноді датчика швидкості стрічки. Існують великі синхронні двигуни змінного струму з частотними приводами типу циклоконвертора, які працюють на дуже низьких обертах.

2.2.6 Система керування стрічковим конвеєром

Електропривод стрічкового конвеєра потребує системи управління. Архітектура електромеханічної системи складається з контролера приводу та системи керування конвеєру. Контролер приводу забезпечує запуск, роботу та зупинку, а також контроль швидкості та крутного моменту для відповідного типу приводу. Система керування стрічкою видає команди запуску та зупинки контролеру приводу. Система керування стрічкою забезпечує захист стрічки, взаємозв'язок, телеметрію та інтерфейс "людина-машина".

2.3 Контролери приводу

2.3.1 Вимоги до контролерів приводу

Кожен електропривод потребує контролер для запуску, роботи та зупинки. Він може включати декілька електричних контакторів і пристроїв у випадку приводів асинхронних двигунів з фазним ротором. Або може мати у складі складні електронні контролери потужності у випадку приводів постійного струму або ж приводів змінної частоти. Деякі контролери беруть участь тільки у запуску. Інші повинні підтримувати функції приводу для роботи на змінній швидкості та уповільненій зупинці. Розробник стрічкового конвеєра повинен ідентифікувати та відокремити контролер типу приводу від загальної системи керування стрічкою.

2.3.2 Алгоритми управління запуском, роботою та зупинкою

Кожен контролер типу приводу виконує алгоритм управління для запуску конвеєра. Найпоширеніший тип управління, який використовується для малих і середніх приводів з простими профілями має назву «розімкнена скалярна система керування». У розімкненому контурі система управління попередньо налаштована на послідовне виконання механізму запуску у визначений спосіб, зазвичай на основі часу. У такому випадку керування параметри роботи приводу, такі як струм, крутний момент або швидкість, не впливають на заданий порядок роботи. Цей метод передбачає, що розробник системи управління належним чином змодельовав роботу приводу на конвеєрі.[4]

Для більших або більш складних стрічок може використовуватися «замкнена система керування зі зворотним зв'язком». У керуванні із закритим контуром під час запуску система управління контролює за допомогою датчиків такі параметри роботи приводу, як рівень струму двигуна, швидкість стрічки або натяг стрічки, і змінює порядок запуску, обмеження або оптимізації одного чи кількох параметрів. Системи керування із замкненим контуром змінюють прикладену силу в залежності від рівня заповненості конвеєру. Постійні величини у математичній моделі, пов'язані з вимірюваною змінною відносно відгуку системи приводу, називаються сталими налаштування. Ці сталі повинні бути правильно налаштовані для успішного застосування до кожного конвеєра. Найпоширенішими схемами для керування із замкненим контуром під час запуску конвеєра є зворотний зв'язок за швидкістю та зворотний зв'язок для контролю крутного моменту.

У деяких складних системах бажано, щоб система керування із закритим контуром самостійно налаштовувалася для різних умов конвеєра, що виникають. Це називається «адаптивним керуванням». Ці крайнощі можуть включати значні варіації в навантаженнях, температурі стрічки, місці завантаження на профілі або декілька варіантів приводу на конвеєрі.

2.4 Висновок

Найкраща система приводу стрічки – це та, яка забезпечує прийнятну продуктивність за всіх умов навантаження стрічки за розумної вартості та високої надійності. Жодна система приводу не відповідає всім потребам. Розробник стрічкового конвеєру повинен визначити атрибути системи електроприводу. Загалом, застосування асинхронного двигуна змінного струму з прямим пуском обмежений малими стрічками з простими профілями навантаження. Асинхронний двигун змінного струму з пуском через ТРН зі зниженою напругою є базовим варіантом для стрічок від малих до середніх розмірів. Привід асинхронного двигуна з фазним ротором є традиційним вибором для середніх і великих стрічок з повторюваним режимом запуску або складними профілями, що вимагають точного контролю крутного моменту. Привід двигуна постійного струму часто знаходив застосування на стрічках із складними профілями або вимогами до змінної швидкості під час роботи. Вибір залежить від умов навколишнього середовища, конкурентної ціни, експлуатаційних втрат енергії, відгуку швидкості та знайомства користувача. Застосування приводів змінної частоти змінного струму обмежується конвеєрами, які вимагають точного контролю швидкості через високі поточні витрати та складність. Однак із продовженням конкурентних і технічних покращень використання частотних приводів із ШІМ-контролерами буде розширюватися.

В дипломній роботі для розробки взята система керування на базі перетворювача частоти та асинхронного двигуна.

3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

3.1 Розрахункова схема та дані конвеєра

Стрічковий конвеєр, що розроблюється в цьому розділі призначений для транспортування залізної руди великого розміру. Конвеєр похило-горизонтальний (див. рис. 3.1), із фронтальним розвантаженням через двобарабанний скидний візок. Час роботи конвеєра протягом доби перебуває в межах 13 год. Конвеєр перебуває під відкритим небом, характеризується важкими умовами роботи.

Прогнозована продуктивність стрічкового конвеєра $Q = 610 \text{ т / год}$;

Розміри ділянок траси:

$L_1 = 130 \text{ м}$; $L_2 = 145 \text{ м}$; $L_3 = 15 \text{ м}$; $L_4 = 130 \text{ м}$; $L_5 = 110 \text{ м}$; $L_6 = 20 \text{ м}$; $H = 19 \text{ м}$;
 $H_1 = 0,8 \text{ м}$; $h_t = 1,6 \text{ м}$.

Розмір типового шматка вантажу $a' = 250 \text{ мм}$;

Насипна щільність вантажу $\rho = 3 \text{ т / м}^3$;

Кут природного нахилу в спокої $\varphi = 40^\circ$; кут природного нахилу вантажу на стрічці при русі $\varphi_p = 20^\circ$.

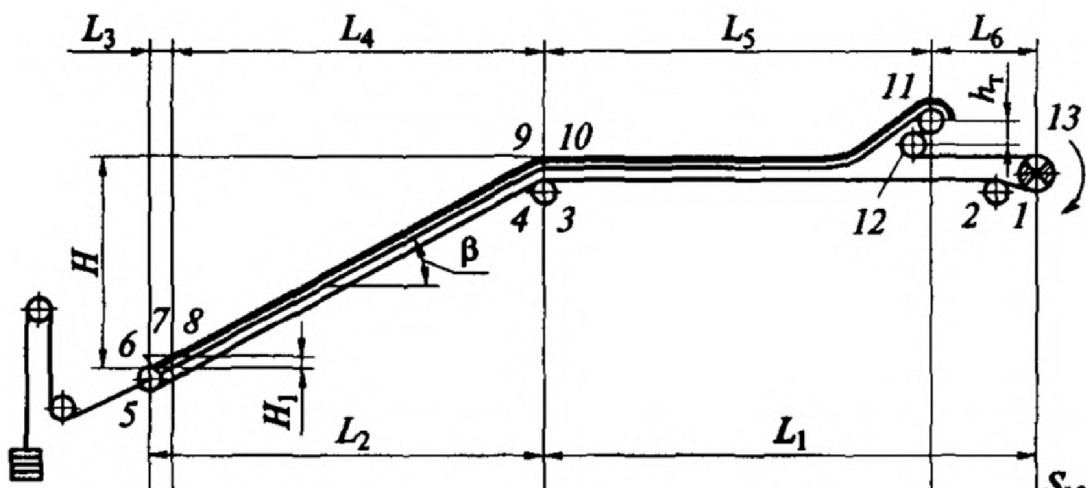


Рисунок 3.1- Конвеєр похило-горизонтальний

Тип приводу стрічкового конвеєра – однобарабанний із чугунним барабаном, кут його охоплення $\alpha = 210^\circ$

Розрахунки виконано по методиці наведених в [7].

Кут нахилу частини траси:

$$\beta = \arctg\left(\frac{H}{L_2}\right)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{19}{145}\right) = 7,465^\circ$$

Біля приводного барабану встановлено відхиляючий барабан, що призводить до збільшення кута обхвату стрічки, на перегині нижньої вітки стрічки - поворотний барабан, а в точці перегину верхньої вітки роликова батарея. На верхній вітці стрічки застосовані жолобчаста трироликова роликоопора з кутом нахилу бічних роликів $\alpha_{жс} = 30^\circ$.

3.2 Тяговий розрахунок стрічки

$$B = 1,1 \cdot \left(\sqrt{\frac{Q_p}{K_n \cdot v \cdot \rho \cdot K_\beta}} + 0,05 \right)$$

де Q_p – розрахункова продуктивність, т/год;

$$Q_p = \frac{Q \cdot K_n}{K_\theta \cdot K_\epsilon}$$

де Q – задана продуктивність конвеєра, т/год;

$K_n = 1,7$ – коефіцієнт нерівномірності завантаження;

$K_\theta = 0,85$ – коефіцієнт використання за часом;

$K_\epsilon = 0,96$ – коефіцієнт готовності.

$$Q_p = \frac{610 \cdot 1,7}{0,85 \cdot 0,96} = 1,271 \text{ т / год}$$

$K_n = 550$ – коефіцієнт продуктивності;

$v = 1,25$ – лінійна швидкість руху стрічки, м/с;

$K_\beta = 0,9$;

$$B = 1,1 \cdot \left(\sqrt{\frac{1271}{550 \cdot 1,25 \cdot 3 \cdot 0,9}} + 0,05 \right) = 0,965 \text{ м}$$

Ширину стрічки необхідно обрати зі стандартного ряду $B = 1000 \text{ мм}$.

Тягове зусилля в попередньому розрахунку

$$W_0 = \lambda_0 \cdot L \cdot g \left((q + q_0 + q_{pp}) \cdot \omega + (q_0 + q_{px}) \omega' \right) + q \cdot g \cdot H$$

де λ_0 – узагальнений коефіцієнт місцевих опорів;

q – розподілена маса насипного вантажу:

$$q = \frac{Q}{3,6 \cdot v}$$

$$q = \frac{610}{3,6 \cdot 1,25} = 135,56 \text{ кг / м}$$

q_0 – розподілена маса конвеєрної стрічки при $i_n = 8$, що розраховується так:

$$q_0 = 1,1 \cdot B \cdot (\delta_0 \cdot i + \delta_1 + \delta_2)$$

$$q_0 = 1,1 \cdot 1 \cdot (1,2 \cdot 8 + 3 + 2) = 16,06 \text{ кг / м}$$

$q_{pp} = 31,82 \text{ кг / м}$, $q_{px} = 11,36 \text{ кг / м}$ – розподілені маси обертових частин

роликів опор робочої вітки та холостої вітки, відповідно

$\omega = 0,04$; $\omega' = 0,03$ – коефіцієнти опору, відповідно, робочої і холостої віток

відповідно;

L – довжина конвеєру за схемою траси:

$$L = L_1 + L_2$$

$$L = 130 + 145 = 275 \text{ м}$$

$$W_0 = 1,4 \cdot 275 \cdot 9,81 \cdot ((135,6 + 16,06 + 31,82) \cdot 0,04 + (16,06 + 11,36) \cdot 0,035) + 135,56 \cdot 9,81 \cdot 19 = 56,6 \text{ кН}$$

Максимальне значення натягу стрічки в попередній формулі:

$$S_{\max} = k_s \cdot W_0 \cdot \frac{e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1}$$

де $k_s = 1,3$;

$$e^{\mu\alpha} = 4,332.$$

$$S_{\max} = 1,2 \cdot 56603 \cdot \frac{3,665}{3,665 - 1} = 88308 \text{ Н}$$

Число прокладок тягового каркасу в стрічці за виразом

$$i = \frac{S_{\max} \cdot C_m}{\sigma_p \cdot B}$$

де $C_m = 9$;

$$\sigma_p = 100, \text{ Н / мм.}$$

$$i = \frac{88308 \cdot 9}{100 \cdot 1000} = 7,948$$

Число прокладок тягового каркасу в стрічці приймаємо: $i = 8$

Діаметр барабана:

$$D_n \geq K_1 \cdot K_2 \cdot i$$

де K_1 – коефіцієнт, що враховує міцність прокладок;

K_2 – для однобарабанного приводу.

Для приводного барабана, $K_1 = 150$, $K_2 = 1$:

$$D_n \geq 150 \cdot 1 \cdot 8 = 1200 \text{ мм}$$

Для натяжного та відхиляючого поряд з приводним барабанів,
 $K_1 = 150$, $K_2 = 0,85$:

$$D_{н.п} = D_{в.п} \geq 150 \cdot 0,85 \cdot 8 = 1020 \text{ мм}$$

Для відхиляючого барабана на трасі, $K_1 = 150$, $K_2 = 0,5$:

$$D_{в.тр} \geq 150 \cdot 0,5 \cdot 8 = 600 \text{ мм}$$

Відповідно до нормального ряду обираємо діаметри барабанів:

– приводного:

$$D_n = 1250 \text{ мм}$$

– натяжного та відхиляючого поряд з приводним барабанів:

$$D_{н.п} = D_{в.п} = 1000 \text{ мм}$$

– відхиляючого на трасі:

$$D_{в.тр} = 630 \text{ мм}$$

Натяги стрічки у характерних точках траси.

Для визначення натягів потрібно визначити коефіцієнти опору барабанів і роликів батарей за табл. 5.1 [9]:

Натяг стрічки у точці 1

$$S_1 = S_{\text{зб}}$$

Натяг стрічки у точці 2

$$S_2 = \lambda_{1-2} \cdot S_1,$$

тоді після підстановки:

$$S_2 = 1,05 \cdot S_1$$

Натяг стрічки у точці 3

$$S_3 = S_2 + (q_0 + q_{\text{пк}}) \cdot g \cdot L_1 \cdot \omega',$$

після підстановки відомих величин:

$$S_3 = 1,05 \cdot S_1 + (16,06 + 11,36) \cdot 9,81 \cdot 130 \cdot 0,035 = 1,05 \cdot S_1 + 1224,07 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 4

$$S_4 = \lambda_{3-4} \cdot S_3,$$

після підстановки відомих величин:

$$S_4 = 1,05 \cdot (1,05 \cdot S_1 + 1224,07) = 1,1025 \cdot S_1 + 1285,27 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 5

$$S_5 = S_4 + (q_0 + q_{px}) \cdot g \cdot L_2 \cdot \omega - q_0 \cdot g \cdot H$$

після підстановки відомих величин:

$$S_5 = 1,1025 \cdot S_1 - 342,85 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 6

$$S_6 = \lambda_{5-6} \cdot S_5$$

після підстановки відомих величин:

$$S_6 = 1,05 \cdot (1,1025 \cdot S_1 - 342,85) = 1,16 \cdot S_1 - 360 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 7

$$S_7 = S_6 + (q_0 + q_{pp}) \cdot g \cdot L_3 \cdot \omega$$

після підстановки відомих величин:

$$S_7 = 1,16 \cdot S_1 - 360 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 8

$$S_8 = S_7 + W_3$$

де W_3 – опір в пункті завантаження

$$W_3 = \frac{Q \cdot f_c \cdot (v - v_1)}{3.6 \cdot (f_c - \operatorname{tg} \beta - k_n f_{\bar{\sigma}})}$$

де $v_1 = 0.8 \text{ м / с}$;

$$k_n = 0.3;$$

$$f_c = 0.63, f_{\bar{\sigma}} = 0.5.$$

$$W_3 = \frac{610 \cdot 0.5 \cdot (1.25 - 0.8)}{3.6 \cdot (0.5 - 0.131 - 0.3 \cdot 0.6)} = 201.76 \text{ Н},$$

після підстановки відомих величин:

$$S_8 = 1.16 \cdot S_1 + 123.6 \text{ Н}$$

Натяг стрічки у точці 9

$$S_9 = S_8 + (q_0 + q_{pp} + q) \cdot g \cdot L_4 \cdot \omega - (q_0 + q) \cdot g \cdot (H - H_1)$$

після підстановки відомих величин:

$$\begin{aligned} S_9 &= S_8 + (16.06 + 31.82 + 135.6) \cdot 9.81 \cdot 130 \cdot 0.04 - (16.06 + 135.6) \cdot 9.81 \cdot (19 - 0.8) = \\ &= 1.158 \cdot S_1 + 36550.6 \text{ Н} \end{aligned}$$

Натяг стрічки у точці 10

$$S_{10} = \lambda_{9-10} \cdot S_9$$

після підстановки відомих величин:

$$S_{10} = 1.05 \cdot (S_1 + 36550.6) = 1.22 \cdot S_1 + 38378.2 \text{ Н}$$

Натяг стрічки у точці 11

$$S_{11} = S_{10} + (q_0 + q_{pp} + q) \cdot g \cdot L_5 \cdot \omega$$

після підстановки відомих величин:

$$S_{11} = 1.216 \cdot S_1 + 46295.9 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 12

$$S_{12} = (S_{11} + qgh_t) \cdot \lambda_6^2$$

після підстановки відомих величин:

$$S_{12} = 1.34 \cdot S_1 + 53387 \text{ H}$$

Натяг стрічки у точці 13

$$S_{13} = S_{12} + (q_0 + q_{pp} + q) \cdot g \cdot L_6 \cdot \omega = 1.194 \cdot S_1 + 37421.6$$

після підстановки відомих величин:

$$S_{13} = 1.34 \cdot S_1 + 54826.6 \text{ H}$$

Позначимо $A_s = 1.34, B_s = 54826.6 \text{ H}$

З умови непрослизання стрічки на барабані

$$S_{36} = \frac{K_{34} \cdot B_s}{e^{\mu\alpha} - K_{34} \cdot A_s} = \frac{1,2 \cdot 54826,6}{4,332 - 1,2 \cdot 1,34} = 24,15 \text{ кН}$$

$$S_{наб} = S_{36} \cdot \frac{e^{\mu\alpha}}{K_{34}} = 24151,9 \cdot \frac{4,332}{1,2} = 87192,4 \text{ Н}$$

Вирахуємо натяг стрічки у всіх розглянутих точках:

$$S_{36} = 24151,9 \text{ Н}$$

$$S_2 = 25359,5 \text{ Н}$$

$$S_3 = 26758,4 \text{ Н}$$

$$S_4 = 28096,3 \text{ Н}$$

$$S_5 = 26663,3 \text{ Н}$$

$$S_6 = 27996,4 \text{ Н}$$

$$S_7 = 28157,8 \text{ Н}$$

$$S_8 = 28359,6 \text{ Н}$$

$$S_9 = 64786,7 \text{ Н}$$

$$S_{10} = 68026 \text{ Н}$$

$$S_{11} = 75943,7 \text{ Н}$$

$$S_{12} = 86073,7 \text{ Н}$$

$$S_{13} = 87513,3 \text{ Н}$$

Зобразимо отримані дані натягу конвеєрної стрічки у вигляді діаграми (рис. 3.2).

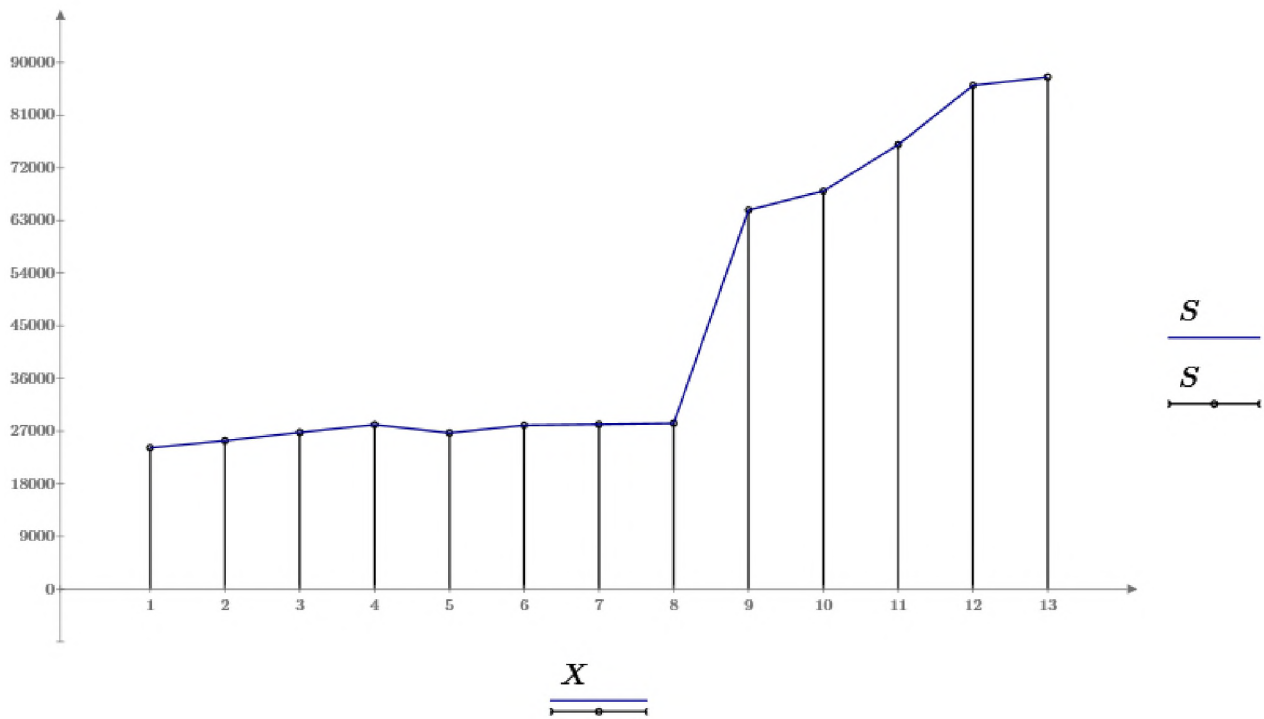


Рисунок 3.2 – Діаграма натягу конвеєрної стрічки в характерних точках траси

Мінімальне значення натягу стрічки:

$$S_{\min}^{sp} \geq K_1 \cdot (q_0 + q) \cdot g \cdot l_p \cdot \cos \beta$$

де $K_1 = 9$.

$$S_{\min}^{sp} \geq 9 \cdot (16.06 + 135.55) \cdot 9.81 \cdot 1.1 \cdot 0.992 = 14600 \text{ H}$$

Найменший натяг стрічки на всій довжині стрічки більше мінімально необхідної величини.

Фактичний запас міцності стрічки:

$$C_M = \frac{B \cdot i \cdot \sigma_p}{S_{\text{нзб}}}$$

$$C_M = \frac{1.8 \cdot 100}{87192.4} \cdot 10^3 = 9.175 > C_M = 9$$

Фактичне значення запасу міцності розрахованої стрічки більше, ніж значення мінімального запасу, тобто стрічка підібрана вірно.

3.3 Розрахунок і вибір приводного двигуна

Тягове зусилля на приводному барабані:

$$F_0 = S_{\text{ноб}} - S_{\text{зб}} = 87192.4 - 24151.9 = 63040.6 \text{ Н}$$

Знайдемо значення потужності двигуна для приводу конвеєра:

$$P_{\text{дв}} = \frac{K_3 \cdot F_0 \cdot v}{\eta_0} = \frac{1.1 \cdot 63040.6 \cdot 1.25}{0.8} = 108.4 \text{ кВт}$$

де $K_3 = 1.1$ – коефіцієнт запасу; $\eta_0 = 0.8$ – ККД приводу.

Виберемо двигун W22 IE3 110 kW 6P 315S/M 3Ph 380-400-415/660-690//460 V 50 Hz IC411 - TEFC - ВЗТ (рис. 3.3) з частотою обертання $n_{\text{дв}} = 985 \text{ об / хв}$, потужністю $P_{\text{дв}} = 110 \text{ кВт}$, моментом інерції $J_{\text{дв}} = 4.695 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

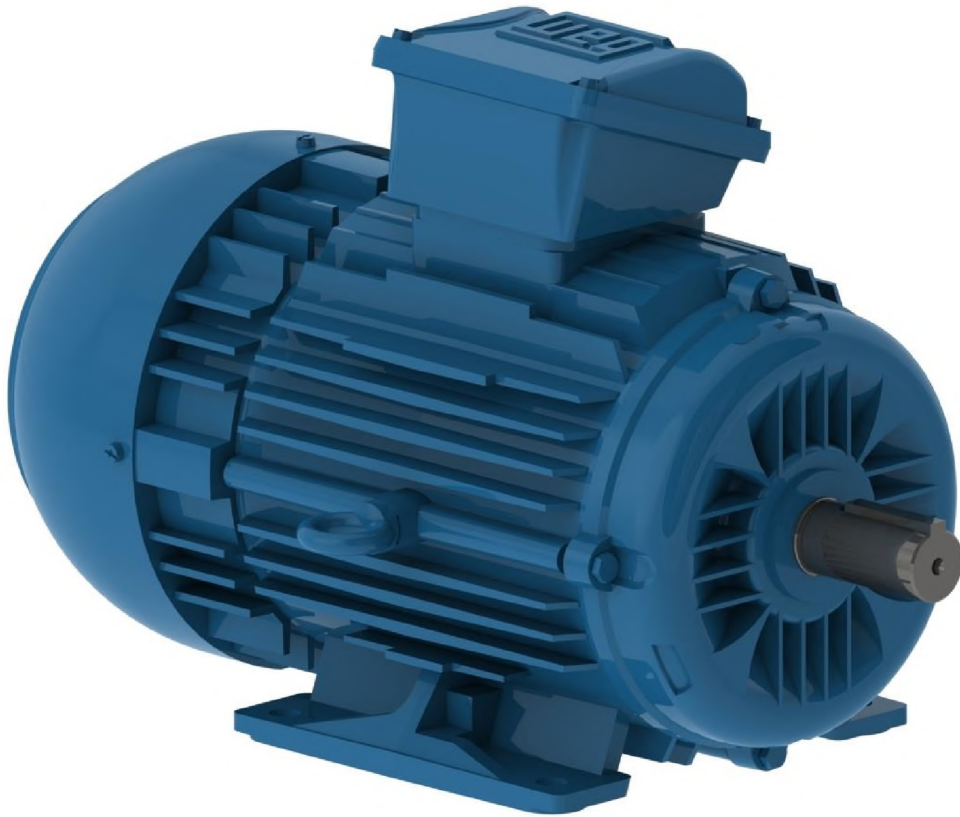


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд двигуна W22 IE3 110 kW 6P 315S/M 3Ph 380-400-415/660-690//460 V 50 Hz IC411 - TEFC - B3T

Кутова швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{\pi n_{\text{дв}}}{30} = \frac{3,14 \cdot 985}{30} = 103.15 \text{ рад / с}$$

Крутний момент двигуна:

$$M_{\text{дв}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{110000}{103.15} = 1066.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент двигуна

$$M_{\partial\phi, n} = 2.3 \cdot M_{\partial\phi} = 2.3 \cdot 1066.4 = 2452.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для з'єднання валів двигуна та редуктора між собою виберемо муфту МУВП-11, здатну передавати крутний момент в 4000 Н·м і має момент інерції $J_m = 6,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Частота обертання приводного барабана

$$n_{\phi} = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D_n} = \frac{60 \cdot 1,25}{3,14 \cdot 1,25} = 19,1 \text{ об / хв}$$

Потрібне передатне число відносно приводу:

$$u_0 = \frac{n_{\partial\phi}}{n_{\phi}} = \frac{985}{19,1} = 51,57$$

Відштовхуючись від необхідного передатного відношення та потужності приводу виберемо редуктор Ц2-500-50 з передатним відношенням $u = 50$

Фактична швидкість стрічки:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_n \cdot n_{\partial\phi}}{60 \cdot u_{\phi}} = \frac{3,14 \cdot 1,25 \cdot 985}{60 \cdot 50} = 1,289 \text{ м / с}$$

Визначимо фактичну продуктивність конвеєра:

$$Q_{\phi} = K_n \cdot K_{\beta} \cdot (0.9 \cdot B - 0.05)^2 \cdot v_{\phi} \cdot \rho$$

$$Q_{\phi} = 550 \cdot 0.9 \cdot (0.9 \cdot 1 - 0.05)^2 \cdot 1,289 \cdot 3 = 1383,4 \text{ т / год}$$

Статичний опір при пуску:

$$W_{cm.n} = k_{n.c.} \cdot (W_0 - q \cdot g \cdot H) + q \cdot g \cdot H = \\ = 1.4 \cdot (56603 - 135.6 \cdot 9.81 \cdot 19) + 135.6 \cdot 9.81 \cdot 19 = 69138.3 \text{ Н}$$

де $k_{n.c.} = 1.4$ – коефіцієнт збільшення сили опору при пуску.

Статичний момент при пуску:

$$M_{cm.n.} = \frac{W_{cm.n.} \cdot D_n}{2 \cdot u_\phi \cdot \eta_0} = \frac{69138.3 \cdot 1.25}{2 \cdot 50 \cdot 0.8} = 1080.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Час пуску за формулою

$$t_n = \frac{J_0 \cdot \omega_{дв}}{(M_{дв.n} - M_{cm.n}) \cdot k_{np}} = \frac{20.65 \cdot 103.15}{(2453 - 1080.3) \cdot 0.7} = 2.22 \text{ с}$$

де $k_{np} = 0.7$ – коефіцієнт, який враховує пружне подовження гумовотканинної стрічки при старті;

J_0 – приведені значення моменту інерції поступально й обертово-рухомих частин вантажу, конвеєра і приводу:

$$J_0 = \frac{(2 \cdot q_0 + q) \cdot (1 + K_i) \cdot D_n^2 \cdot L}{4 \cdot u_\phi^2 \cdot \eta_0} + (1 + \psi)(J_p + J_m) = \\ = \frac{(2 \cdot 16.06 + 135.6) \cdot (1 + 0.08) \cdot 1.25^2 \cdot 275}{4 \cdot 50^2 \cdot 0.8} = 20.65 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

де $K_i = 0.08$ – коефіцієнт, який враховує інерцію обертових мас роликів і барабанів конвеєра;

$\psi = 0.15$.

Мінімально допустимий час пуску конвеєра:

$$t_{n\min} = \frac{v}{a_{np}} = \frac{1.289}{0.2} = 6.45 \text{ c}$$

де $J = 0.2$ – допустиме прискорення пуску.

Гальмівний момент на валу двигуна, який є перешкодою для зворотного руху стрічки під вагою вантажу після виключення струму[5]:

$$\begin{aligned} M_{ст.з} &= (q \cdot g \cdot H - c_0 (F_0 - q \cdot g \cdot H)) \cdot \frac{D_n}{2 \cdot u_{\phi}} \cdot \eta_0 = \\ &= (135.6 \cdot 9.81 \cdot 19 - 0.5 (63040 - 135.6 \cdot 9.81 \cdot 19)) \cdot \frac{1.25}{2 \cdot 50} \cdot 0.8 = 63.8 \text{ H} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Час гальмування

$$t_z = \frac{2 \cdot l_{снб}}{v} = \frac{2 \cdot 3}{1.289} = 4.653 \text{ c}$$

Визначимо такий гальмівний момент на валу, що обмежить вибіг стрічки, коли вимикається двигун:

$$\begin{aligned} M_{ст.з} &= \frac{(2 \cdot q_0 + q)(1 + K_i) \cdot L \cdot D_n^2 \cdot \eta_0 \cdot \omega_{дв}}{4 \cdot u_{\phi}^2 \cdot t_z} - (q \cdot g \cdot H - c_0 (F_0 - q \cdot g \cdot H)) \cdot \frac{D_n}{2 \cdot u_{\phi}} \cdot \eta_0 \\ M_{ст.з} &= \frac{(16.06 + 135.6)(1 + 0.08) \cdot 275 \cdot 1.25^2 \cdot 0.8 \cdot 103.15}{4 \cdot 50^2 \cdot 4.653} - \\ &- (135.6 \cdot 9.81 \cdot 19 - 0.5 \cdot (63040 - 135.6 \cdot 9.81 \cdot 19)) \cdot \frac{1.25}{2 \cdot 50} \cdot 0.8 = 74.2 \text{ H} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Тобто вибігу стрічки після відключення електродвигуна не буде. Тормоз потрібен лише для запобігання зворотного руху стрічки з вантажем.

$$M_{\varepsilon} = K_{\varepsilon} \cdot M_{\text{ст.}\varepsilon}$$

$$M_{\varepsilon} = 1,25 \cdot 74,2 = 92,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3.4 Розрахунок і вибір частотного перетворювача

Параметри двигуна для вибору перетворювача частоти занесені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри двигуна W22 IE3 110 kW 6P 315S/M 3Ph 380-400-415/660-690//460 V 50 Hz IC411 - TEFC - ВЗТ для вибору перетворювача частоти

Номінальна потужність	$P_{2n} = 110 \text{ кВт}$
Номінальна напруга статора	$U_n = 660 \text{ В}$
Номінальний струм	$I_n = 122.13 \text{ А}$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 93.8\%$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi = 0.84$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.4$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Число пар полюсів	3

Амплітудний номінальний струм двигуна:

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 122.13 = 172.7 \text{ А}$$

Вважатимемо, що привод має перевантажувальну здатність за струмом на рівні $K_{пер} = 1.5$, отже на виході перетворювача максимальний струм знайдемо за виразом:

$$I_{max.a} = K_{пер} \cdot I_{на} = 1,5 \cdot 172.7 = 256.07 \text{ A}$$

За отриманим значеннями обираємо ПЧ Schneider Electric Altivar 71 132 кВт 3-фаз. - ATV71HC13N4(рис .3.4). Паспортні дані приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри перетворювача Altivar 71 132 кВт 3-фаз.

Параметр	Значення
Струм, А	259
Потужність, кВт	132
Панель управління	В комплекті
Захист, клас	IP20
Тип управління	скаляр, вектор
Вхідна фазність	3-ф/380
Вихідна фазність	3-ф/380
Вихідна частота, Гц	1000
Робоча температура, °C	від 0 до 50
Серія	ATV71
Гарантія, міс	12

Загальна характеристика перетворювача

Дуже потужна за продуктивністю модель - частотний перетворювач Schneider Electric Altivar 71 потужністю 132 кВт 3-фазний - здійснює контроль та налаштування номінальної продуктивності трифазних двигунів складного промислового обладнання, спрямованого на високі виробничі стандарти.

Модель забезпечує плавний запуск двигуна з постійною підтримкою безперебійної роботи, контролюючи продуктивність всієї системи. Частотний преобразувач Schneider Electric Altivar 71 відповідає найкращим європейським

нормам з багаторічною гарантією якості. Це поєднання компактної форми, надійної роботи, легкості управління та високої ефективності.

Це варіант для найскладніших технічних операцій, навіть для точної роботи при найповільніших швидкостях обертання двигуна.

Сфера застосування

Модель використовується для складного промислового обладнання важкого класу:

- Промислове станційне обладнання;
- Конвеєрні агрегати високих стандартів продуктивності;
- Механізми для подачі та підйому;
- Важкі верстати для обробки металу, деревини, каменю і т.д.

Для виконання більш складних завдань потрібно додатково налаштувати двигуни. Проте, навіть за невеликих стандартів потужності, модель має якісне обладнання механізму, яке здатне працювати важких умовах.

Основні особливості

- Повний захист від коротких замикань і компресії стрибків напруги;
- Робота при відключеній мережі живлення і точна робота при повільному обертанні двигуна;
- Можливість регулювання швидкостей за допомогою зручного ручного контролера передбаченого на корпусі моделі;
- Підключення двигунів за допомогою скалярного стандарту паралельного з'єднання;
- Захист від перевантажень і перегріву з аварійним зупиненням і подальшим перезапуском;
- Контроль використання електричного струму - спеціально вбудований лічильник;
- Звукове попередження про можливі або вже виниклі несправності;
- Модель самостійно проводить профілактичні роботи з очищення ОС та зниження витрат енергії;
- Скалярне, векторне та квадратичне регулювання двигуном;
- Можливість підтримки 8 мов у інтерфейсі системи;

- Плавне регулювання запуску та гальмування двигуна;
- Підтримка таких функцій як CANopen Daisy Chain, DeviceNet, Profibus DP;
- Використання спеціального інтерфейсу та мережі Modbus-Bluetooth;
- Можливість програмування системи під задані норми вашого промислового обладнання;
- Підтримка додаткових ЗМС фільтрів;
- Виготовлено відповідно до європейських стандартів UL, CSA, C-Tick, NOM.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд перетворювача

4 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

4.1 Теоретичні відомості. Математичний опис системи ПЧ-АД

Рівняння балансу напруг статора і ротора еквівалентної двофазної асинхронної машини в системі координат, що обертається відносно стаціонарної системи координат статора з довільною кутовою швидкістю ω_k :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_s &= R_s \tilde{I}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s; \\ \tilde{U}_r &= R_r \tilde{I}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де $j\omega_k \tilde{\Psi}_s$ і $j\omega_k \tilde{\Psi}_r$ – ЕРС обертання в рівняннях для відповідних обмоток, які пропорційні швидкості обертання ω_k ;

$-j\omega_r \tilde{\Psi}_r$ – ЕРС обертання ротора, яка пропорційна приведеній кутовій швидкості ротора відносно електромагнітного поля статора ω_r .

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\Psi}_s &= L_s \tilde{I}_s + L_m \tilde{I}_r; \\ \tilde{\Psi}_r &= L_m \tilde{I}_s + L_r \tilde{I}_r, \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності відповідно фаз статора і ротора еквівалентної двофазної машини

Для отримання рівнянь АД, які зв'язують координати в усталених режимах, слід у рівняннях (4.1) покласти $\omega_k = \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ та $d/dt = 0$:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{U}_s &= \tilde{I}_s R_s + j\omega_s \tilde{\Psi}_s; \\ \tilde{U}_r &= \tilde{I}_r R_r + j(\omega_s - \omega_r) \tilde{\Psi}_r. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Підставивши (4.2) у рівняння (4.3), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= (R_s + jX_s)I_s + jX_m I_r; \\ \frac{\tilde{U}_r}{s} &= \left(\frac{R_r}{s} + j\tilde{X}_r \right) \tilde{I}_r + j\tilde{X}_m \tilde{I}_s, \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

де $X_s = X_m + X_{s\sigma}$, $X_r = X_m + X_{r\sigma}$;

s – ковзання двигуна:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}.$$

Системі рівнянь (4.4) відповідає схема заміщення АД, зображена на рис.4.1.

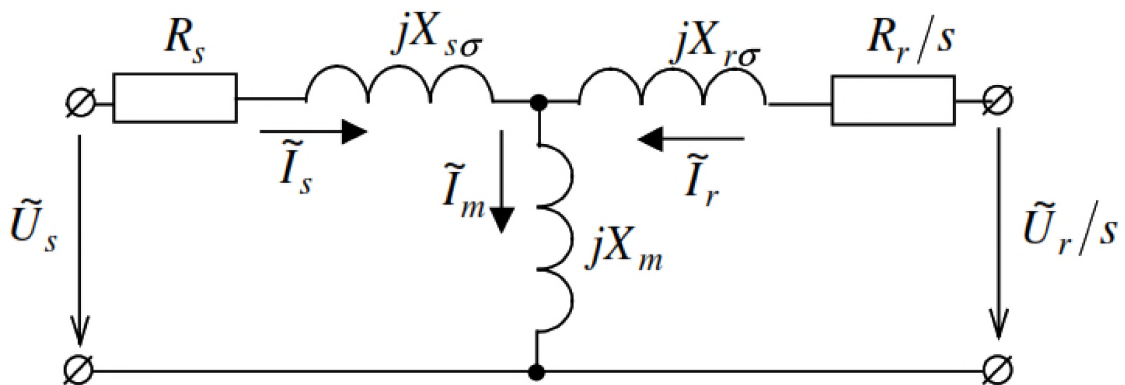


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема заміщення АД

Частотне керування полягає у забезпеченні потрібних статичних характеристик системи ЕП шляхом виконання певного співвідношення між амплітудою та частотою напруги, яка прикладається до статора АД. Це співвідношення повинне виконуватися у будь-який момент знаходження ЕП у роботі, і має назву закону частотного управління. При частотному керуванні з боку статора використовуються АД з короткозамкненим ротором, тому

$$\tilde{U}_r = 0 \quad (4.5)$$

Скалярні способи керування забезпечують досягнення потрібних статичних характеристик і зазвичай використовуються в ЕП, навантаження в яких є спокійним. Структура системи керування повинна забезпечувати повільне зростання сигналів завдання для наближення динамічних властивостей електропривода до статичних.

Рівняння (4.4) електромагнітних контурів АД в усталеному режимі з урахуванням (4.5) перетворимо до вигляду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tilde{U}_s}{\omega_s} &= \tilde{I}_s \frac{R_s}{\omega_s} + j\tilde{\Psi}_s = \tilde{I}_s \frac{R_s}{\omega_s} + jL_{s\sigma}\tilde{I}_s + j\tilde{\Psi}_m; \\ 0 &= \tilde{I}_r \frac{R_r}{\beta} + j\tilde{\Psi}_r = \tilde{I}_r \frac{R_r}{\beta} + jL_{r\sigma}\tilde{I}_r + j\tilde{\Psi}_m, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

де $\beta = \omega_s - \omega_r = s\omega_s$ – абсолютне ковзання АД;

$\tilde{\Psi}_m = L_m \tilde{I}_m = L_m (\tilde{I}_s + \tilde{I}_r)$ – головне потокозчеплення АД (потокозчеплення у повітряному зазорі).

Системі (4.6) відповідає еквівалентна схема заміщення, яка представлена на рис.4.2. Із схеми заміщення витікають можливі закони частотного управління (табл.4.1), причому два останніх є досить складними в реалізації у системах скалярного управління, і тому майже не використовуються.

Таблиця 4.1 – Закони частотного управління

$\tilde{U}_s / \omega_s = const$	$\tilde{\Psi}_s = const$	$\tilde{\Psi}_m = const$	$\tilde{\Psi}_r = const$
----------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

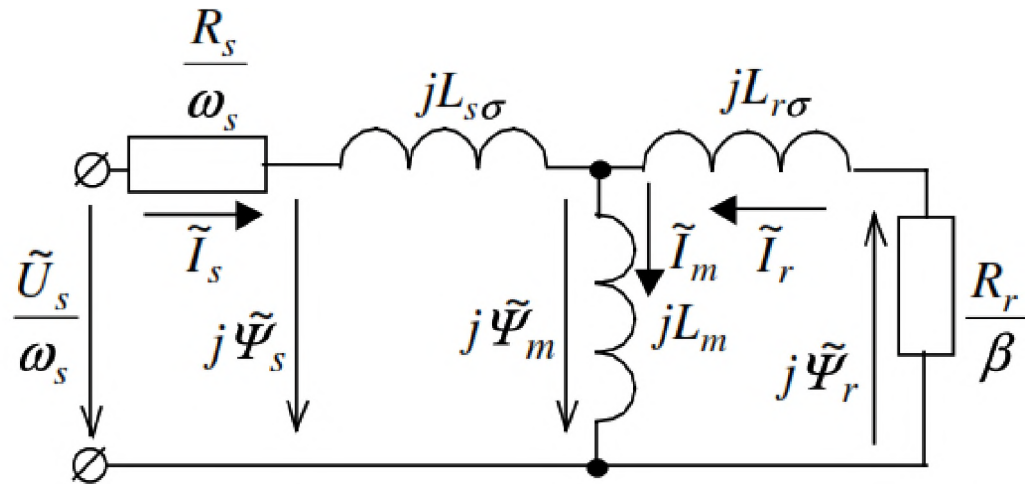


Рисунок 4.2 – Еквівалентна схема заміщення АД

Асинхронний ЕП з частотно-струмовим управлінням використовується в електроприводах механізмів середньої та великої потужності, які не потребують глибокого регулювання швидкості. Насамперед це потужні турбомеханізми, ЕП екскаваторів та ін.

При частотно-струмовому управлінні здійснюється взаємопов'язане змінювання амплітуди та частоти струму статора двигуна. Частіше усього при такому регулюванні швидкості задаються вимогою постійності потоку на необхідному рівні, після чого розраховують відповідну залежність струму статора від абсолютного ковзання.

Силова частина асинхронного ЕП має ПЧ з ланкою постійного струму, який конструктивно має керований випростувач (КВ), фільтр у ланці постійного струму та автономний інвертор струму (АІС). У системах частотно-струмового керування КВ виконує функцію спрямлення струму. На виході АІС маємо струм регульованої амплітуди та частоти.

Функціональна схема системи частотно-струмового керування наведена на рис.4.3.

Напруга від задавача інтенсивності (ЗІ) подається на блок порівняння, на виході якого формується сигнал, пропорційний різниці заданої та дійсної швидкості (абсолютному ковзанню), котрий, у свою чергу подається на вхід пропорційного регулятора швидкості (РШ). Сигнал з виходу РШ подається через

функціональний перетворювач ФП на вхід контуру регулювання струму та для завдання частоти до блоку порівняння.

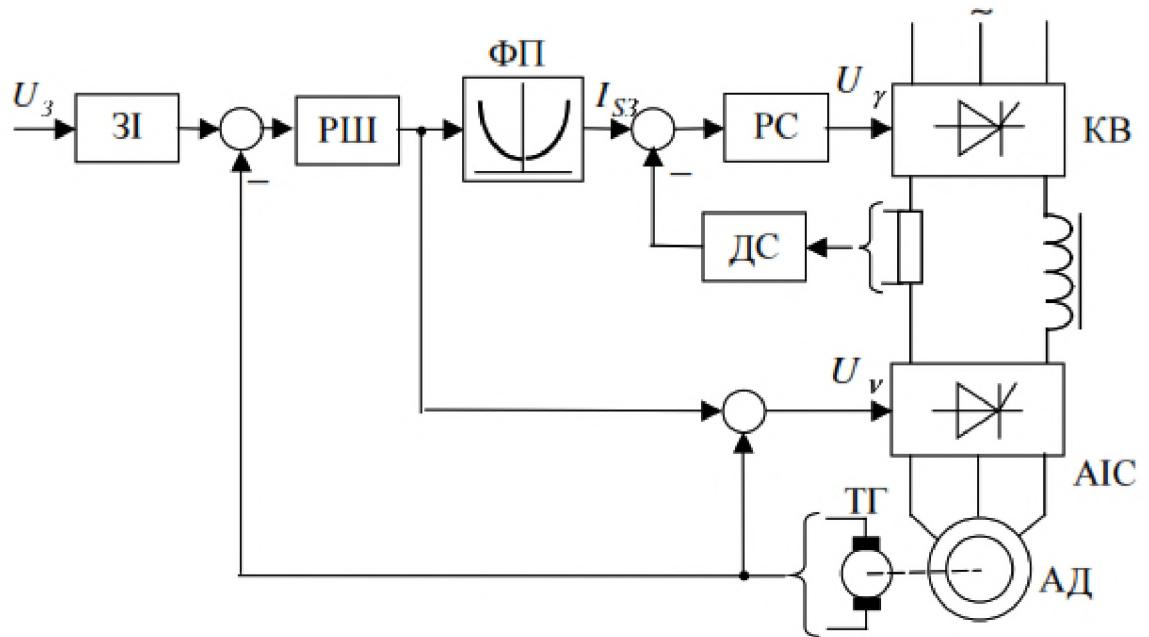


Рисунок 4.3 – Функціональна схема системи асинхронного ЕП з частотно-струмовим управлінням

В робочому діапазоні характеристики частотного ЕП мають практично лінійний характер, тому можливо представити систему частотний перетворювач–двигун як модель двигуна постійного струму. Структурну схему систему показано на рис.4.4.

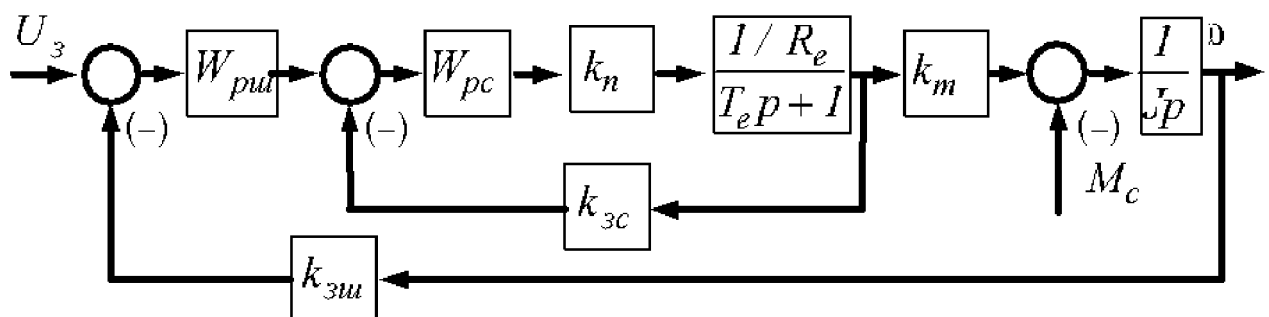


Рисунок 4.4 – Структурна схема електропривода за системою ПЧ-АД

4.2 Розрахунок параметрів приводного двигуна

Необхідні величини та параметри обраного двигуна визначимо за даними взяті з каталога компанії WEG (табл. 4.1, 4.2)

Таблиця 4.1 – Каталожні дані асинхронного двигуна W22 IE3 110 kW 6P 315S/M 3Ph 380-400-415/660-690//460 V 50 Hz IC411 - TEFC - B3T

Номінальна потужність	110 кВт
Номінальна лінійна напруга	$U_H=660$ В
Номінальна мережева частота	50 Гц
Число полюсів	6
Момент інерції	$4,695 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Номінальний ККД	93,8%
Коефіцієнт потужності	0.84
Перевантажувальна здатність	2.4
Пусковий момент	2,3
Кратність пускового струму	6.4
Номінальне ковзання	0.015
Критичне ковзання	0.0726

Таблиця 4.2 – Параметри при завантаженні двигуна на 50%

$P_{2,50}, \text{кВт}$	$\eta_{50}, \%$	$\cos \varphi_{50}$
55	0.93	0.71

Частота магнітного поля статора:

$$\omega_{0c} = 2\pi f_n = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад} / \text{с}$$

Синхронна швидкість двигуна

$$\omega_{\lambda\lambda} = \frac{\omega_{0c}}{p} = \frac{314}{3} = 104.7 \text{ рад} / \text{с}$$

Номінальна кутова швидкість вала ротора:

$$\omega_n = \omega_{\lambda\lambda} \cdot (1 - s_n)$$

$$\omega_n = 104,7 \cdot (1 - 0,015) = 103,15 \text{ рад} / \text{с}$$

Номінальний момент на валу двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n}$$

$$M_n = \frac{110000}{103,15} = 1066,4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичний момент двигуна

$$M_{\kappa} = m_{\kappa} \cdot M_n$$

$$M_{\kappa} = 2,4 \cdot 1066,4 = 2559.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент двигуна

$$M_n = m_n \cdot M_n$$

$$M_n = 2.3 \cdot 1066,4 = 2452.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Номінальна фазна напруга статора

$$U_{\phi} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381.05 \text{ В}$$

Номінальне значення фазного струму статора

$$I_{\phi} = \frac{P_{2н}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta \cdot \cos \varphi}$$

$$I_{\phi} = \frac{110000}{3 \cdot 381.05 \cdot 0.938 \cdot 0.84} = 122.12 \text{ А}$$

Амплітуда фазної напруги статора

$$U_{\phi a} = \sqrt{2} \cdot U_{\phi} = \sqrt{2} \cdot 381 = 538.82 \text{ В}$$

Амплітуда фазного струму статора

$$I_{\phi a} = \sqrt{2} \cdot I_{\phi} = \sqrt{2} \cdot 122.12 = 172.7 \text{ А}$$

Амплітуда потокозчеплення статора на холостому ходу

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{\phi a}}{\omega_{0c}} = \frac{538.82}{314} = 1.716 \text{ Вб}$$

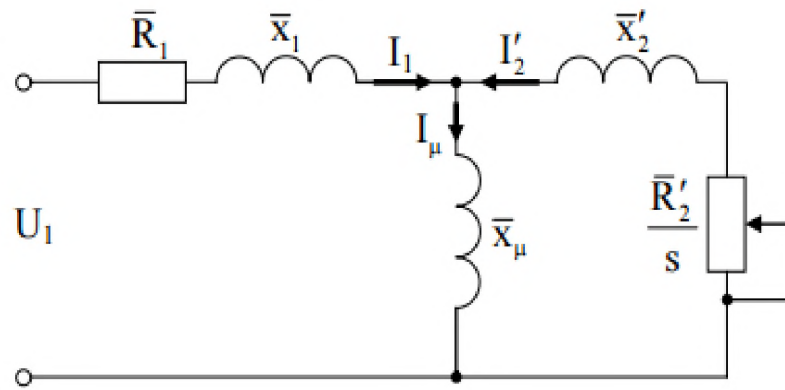


Рисунок 4.5 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Пусковий струм статора

$$I_n = k_i \cdot I_\phi = 6,4 \cdot 122,12 = 774,4 \text{ A}$$

Струм статора при завантаженні $0,5P_{2\text{ном}}$

$$I_{\phi 50} = \frac{P_{2,50}}{3 \cdot U_\phi \cdot \eta_{50} \cdot \cos \varphi_{50}}$$

$$I_{\phi 50} = \frac{55000}{3 \cdot 381,05 \cdot 0,93 \cdot 0,71} = 72,86 \text{ A}$$

Струм холостого ходу

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{\phi 50}^2 - \left(\frac{k_s \cdot (1 - s_n)}{(1 - k_s \cdot s_n)} \cdot I_\phi \right)^2}{1 - \left(\frac{k_s \cdot (1 - s_n)}{(1 - k_s \cdot s_n)} \cdot I_\phi \right)^2}}$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{72,86^2 - \left(\frac{0,5 \cdot (1 - 0,015)}{(1 - 0,5 \cdot 0,015)} \cdot 122,12 \right)^2}{1 - \left(\frac{0,5 \cdot (1 - 0,015)}{(1 - 0,5 \cdot 0,015)} \cdot 122,12 \right)^2}} = 46,6 \text{ A}$$

Критичне ковзання

$$s_{\kappa} = s_{\pi} \frac{m_{\kappa} + \sqrt{m_{\kappa}^2 - (2 \cdot s_{\pi} \cdot \beta \cdot (m_{\kappa} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_{\pi} \cdot \beta \cdot (m_{\kappa} - 1)}$$

$$s_{\kappa} = 0,015 \cdot \frac{2,4 + \sqrt{2,4^2 - (2 \cdot 0,015 \cdot 1,2 \cdot (2,4 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,015 \cdot 1,2 \cdot (2,4 - 1)} = 0,0726$$

де $\beta = (0,6 \div 2,5)$ попередньо приймаємо 1,2;

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\phi}} = 1 + \frac{46,6}{2 \cdot 6,4 \cdot 122,12} = 1,0298$$

Все зводиться до квадратного рівняння

$$\beta^2 + B \cdot \beta + C = 0,$$

$$\text{де } B = \frac{1}{s_{\pi}} + \frac{1}{s_{\kappa}} - \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_1}{s_{\pi}}$$

$$C = \frac{1}{s_{\pi} s_{\kappa}} - A_0 A_1 \cdot \left(\frac{1}{s_{\pi}^2} + \frac{1}{s_{\kappa}^2} \right)$$

$$A_0 = \frac{I_{\phi\pi} \cos \varphi_{\pi} - I_0 \cdot \cos \varphi_0}{U}$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U^2 (1 - s_{\pi})}{2 C_1 m_{\kappa} P_{2\pi}}$$

Приймаємо $\varphi_0 = 87^\circ$.

Тоді

$$A_0 = \frac{122,12 \cdot 0,84 - 46,6 \cdot \cos(87^\circ)}{381,05} = 0,265$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 381.05^2 (1 - 0.015)}{2 \cdot 1.0298 \cdot 2.4 \cdot 110 \cdot 10^3} = 0.789$$

$$B = \frac{1}{0.015} + \frac{1}{0.0762} - \frac{1 \cdot 0.265 \cdot 0.789}{0.015} = 52.57$$

$$C = \frac{1}{0.015 \cdot 0.0762} - 0.265 \cdot 0.789 \cdot \left(\frac{1}{0.015^2} + \frac{1}{0.0762^2} \right) = -50.09$$

Остаточно вирішуючи квадратне рівняння

$$\beta = -\frac{52.57}{2} + \sqrt{52.57^2 - 4 \cdot (-50.09)} = 0.9361$$

Активний опір ротора

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_k} \right) C_1} = \frac{0.789}{\left(0.9361 + \frac{1}{0.0726} \right) \cdot 1.0298} = 0.0521 \text{ Ом}$$

Активний опір статора

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 = 1.0298 \cdot 0.0521 \cdot 0.9361 = 0.0502 \text{ Ом}$$

Для серійний асинхронних двигунів індуктивності статора і ротора визначаються:

$$X_1 = 0.42 \cdot X_n$$

$$X_2 = 0.58 \cdot \frac{X_n}{C_1},$$

$$\text{де } X_n = \sqrt{\frac{1}{s_{\kappa}^2} - \beta^2} \cdot C_1 \cdot R'_2 = \sqrt{\frac{1}{0,0726^2} - 0,9361^2} \cdot 1,03 \cdot 0,052 = 0,716 \text{ Ом}$$

Тоді

$$X_1 = 0,42 \cdot 0,716 = 0,3 \text{ Ом}$$

$$X_2 = 0,58 \cdot \frac{0,716}{1,03} = 0,415 \text{ Ом}'$$

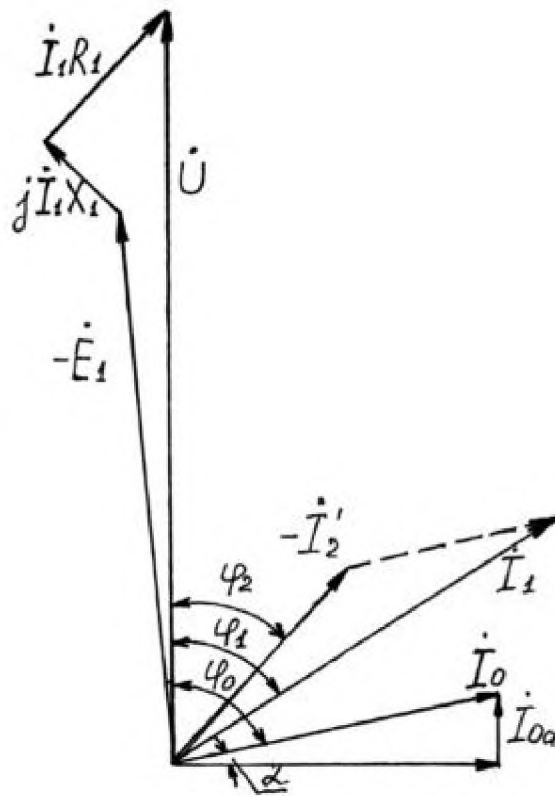


Рисунок 4.6 – Векторна діаграма АД

Згідно з векторною діаграмою (рисунок 4.6), ЕРС гілки намагнічування, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі, дорівнює:

$$E_1 = \sqrt{(U \cos \varphi_{1н} - R_1 I_{1н})^2 + (U \sin \varphi_{1н} - X_1 I_{1н})^2}$$

$$E_1 = \sqrt{(381 \cdot 0,84 - 0,05 \cdot 122,13)^2 + (381 \cdot 0,54 - 0,3 \cdot 122,13)^2} = 357,04 \text{ В}$$

Тоді опір вітки намагнічування

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{357,04}{46,6} = 7,66 \text{ Ом}$$

Сумарний момент інерції

$$J = J_{\text{дв}} + J_0 = 4,695 + 20,6 = 25,341 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

4.3 Синтез регуляторів

Для нашої системи проведемо налаштування регуляторів на модульний оптимум.

Вираз для ПІ- регулятора струму

$$W_{PI}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p} = \frac{T_e p + 1}{a_t T_e K_{ПЧ} \frac{K_t}{R_e} p},$$

де $T_e = \frac{L_e}{R_e}$ – електромагнітна стала часу двигуна;

$$R_e = 2(R_1 + R_2') + \frac{3}{\pi}(X_1 + X_2');$$

$L_e = 2(L_1 + L_2)$ – значення еквівалентного індуктивного опору двигуна.

Вираз для П-регулятора швидкості:

$$W_{PII}(p) = K_{PII} = \frac{K_t \cdot J_{\Sigma}}{a_c a_t T_{\mu} K_m K_{\Sigma II}},$$

де $K_t = \frac{U_{3.c}}{I_{\max}}$ – КЗЗ за струмом;

$I_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{K_m}$ – струм відсічки від'ємного зворотного зв'язку за струмом;

$K_{33.u} = \frac{U_{33.u \max}}{\omega_{xx}}$ – КЗЗ за швидкістю;

$T_{\mu} = 0.01 \text{ c}$ – мала некомпенсована стала часу;

$K_{ПЧ} = \frac{U_{\mu}}{U_{y \max}}$ – коефіцієнт передачі ПЧ.

Вираз для ПІ- регулятора швидкості

$$W_{PI}(p) = \frac{T_3 p + 1}{T_4 p} = \frac{a_c a_t b_c T_m p + 1}{\frac{a_c a_t b_c T_m}{K_{pm}} p}$$

4.4 Імітаційне моделювання системи керування приводом стрічкового конвеєра в Simulink

Враховуючи отримані в результаті розрахунків дані складових електромеханічної системи та, безпосередньо, синтезовані регулятори струму та швидкості, у модулі Simulink програмного пакету Matlab дослідили коректність відпрацювання розробленою системою електроприводу тахограми руху конвеєрної стрічки. Представлена на рисунку 4.7 модель скалярної ЕМС на базі асинхронного двигуна із живленням від перетворювача частоти з ПІ-регулятором швидкості продемонструвала наступні графіки в режимах пуску, роботи на усталеній швидкості та гальмування (рис. 4.8).

Рисунок 4.9 демонструє імітаційну модель скалярної ЕМС на базі асинхронного двигуна із живленням від перетворювача частоти з контуром

регулювання швидкості на основі П-регулятора швидкості. За проведеними на моделі дослідями були отримані часові діаграми відпрацювання моменту і швидкості двигуна (рис. 4.10).

Порівнюючи отримані осцилограми стає зрозумілим, що у випадку, коли в системі присутній ПІ-регулятор у графіка моменту двигуна наявне деяке перерегулювання. Це обумовлено присутністю інтегральної складової в складі регулятора швидкості.

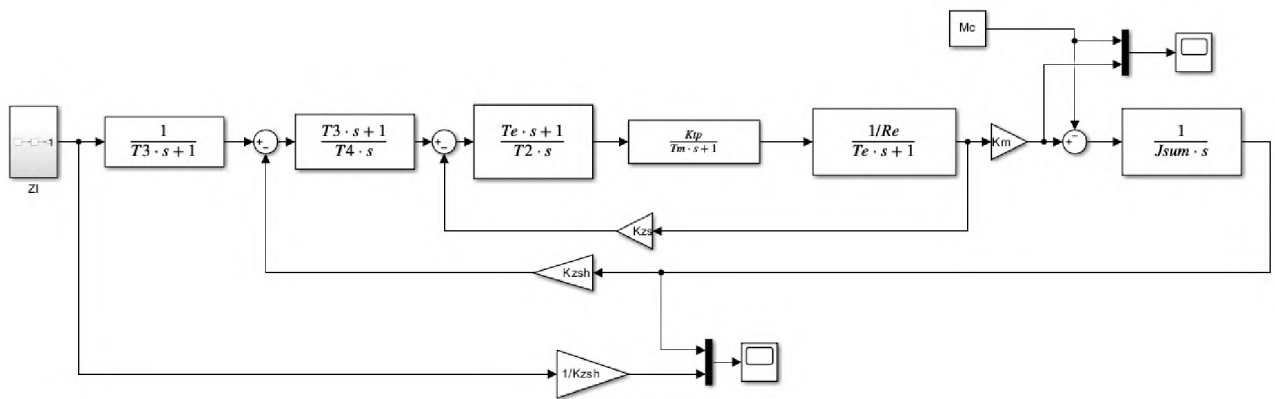


Рисунок 4.7 – Модель скалярної асинхронної ЕМС з ПІ-регулятором швидкості

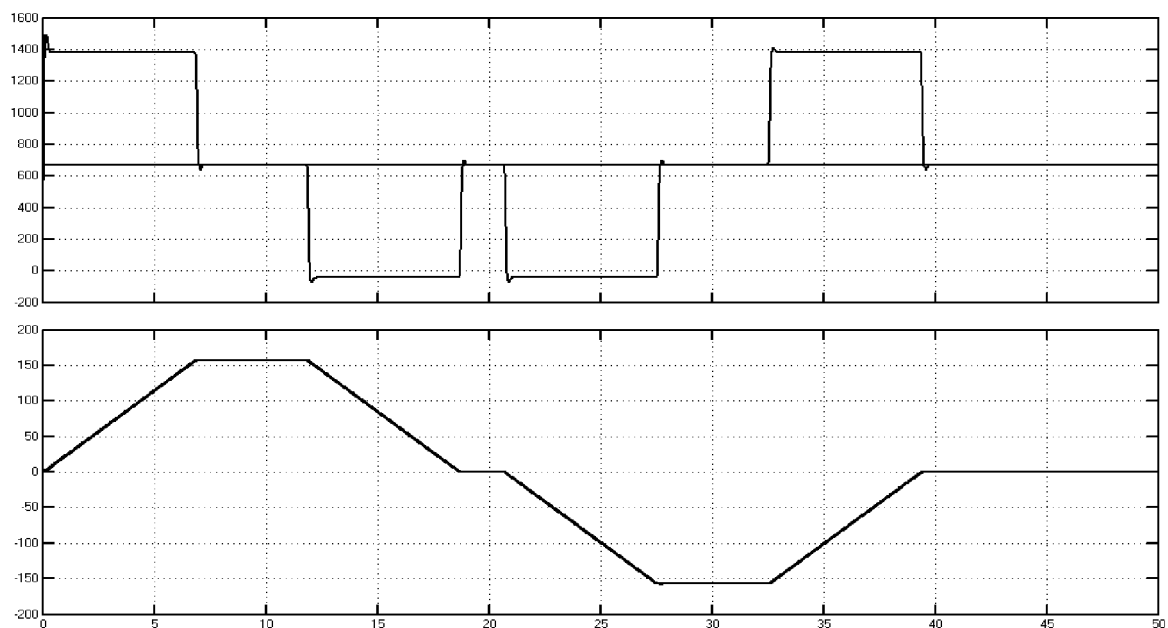


Рисунок 4.8 – Графіки перехідних процесів моменту та швидкості двигуна схеми ПЧ-АД з ПІ-регулятором швидкості

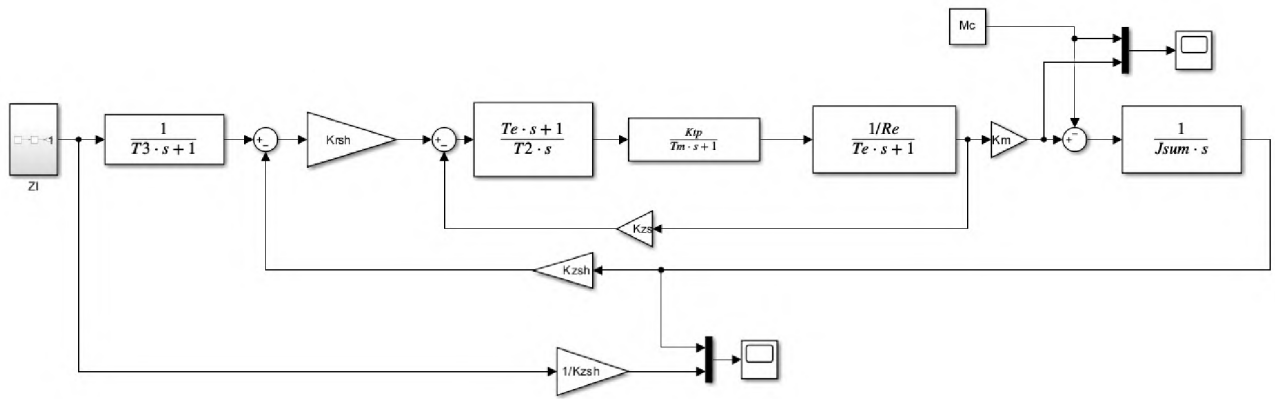


Рисунок 4.9 – Модель скалярної асинхронної ЕМС з П-регулятором швидкості

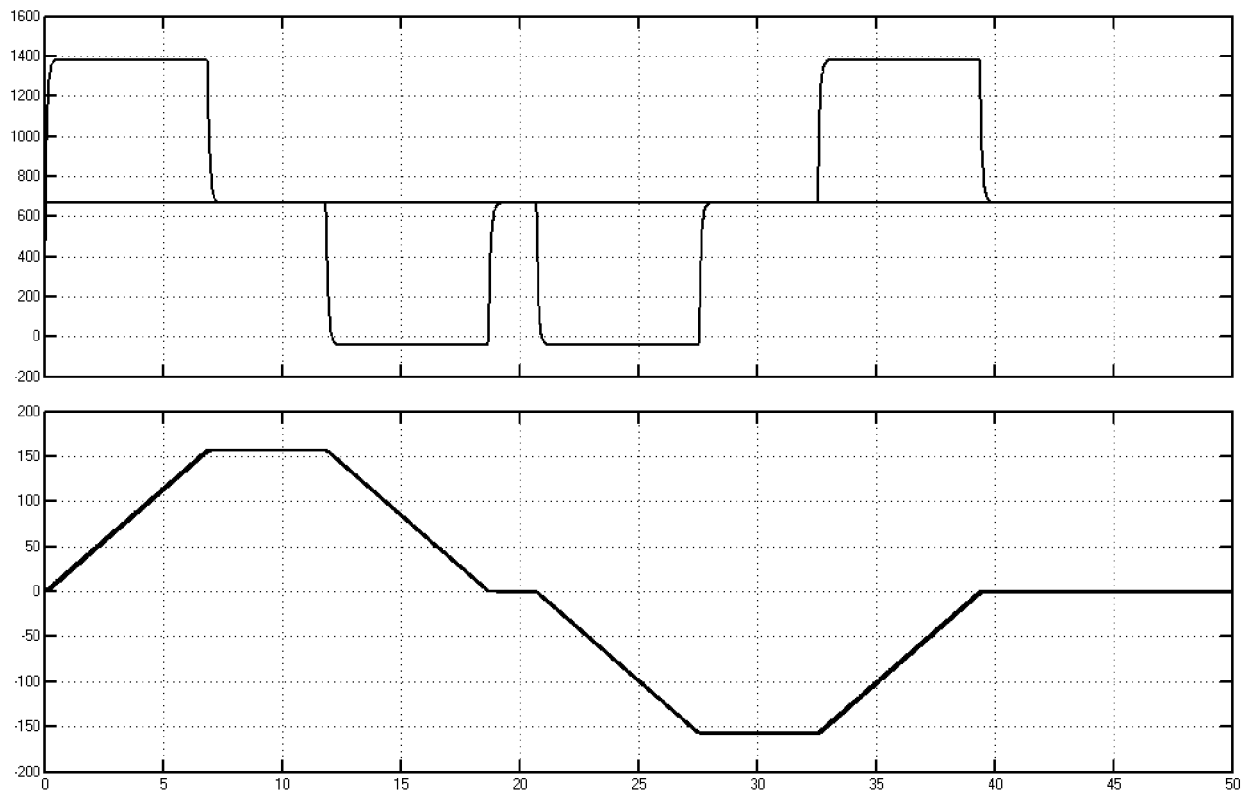


Рисунок 4.10 – Графіки перехідних процесів моменту та швидкості двигуна схеми ПЧ-АД з П-регулятором швидкості

ВИСНОВКИ

У виконаній дипломній роботі було зроблено аналітичний огляд з машин безперервного транспорту, стрічкових конвеєрів. Розглянуто схему стрічкового конвеєра, типові вузли, приведено дані про різні форми та будову стрічок. Приведені дані про різні типи електричних приводів стрічкових конвеєрів як, то: асинхронний з прямим пуском, при пуску від ТРН або перетворювача частоти, постійного струму.

За відомими параметрами стрічкового конвеєра та його схемою траси був проведений тяговий розрахунок у характерних точках, складена діаграма натягів стрічки.

По вихідним даним знайдено і перевірено на стійкість до розриву стрічку. Ширина стрічки – 1 м, вона складається з восьми прокладок міцністю 100 Н/мм кожна. Тип роликів опор – жолобчастий для реалізації переміщення більших об'ємів залізної руди.

За отриманим значенням тягових зусиль на приводному барабані підібраний трифазний асинхронний двигун WEG серії W22 IE3 315S/M потужністю 100 кВт, частотою обертання $n_{\text{дв}} = 985 \text{ об/хв,}$. Спираючись на потужність обраного двигуна, а також враховуючи потребу в забезпеченні достатньої перевантажувальної здатності за струмом був обраний перетворювач частоти Schneider Electric Altivar 71 132 кВт 3-фаз. - ATV71HC13N4.

За паспортними даними двигуна, користуючись відомою методикою, визначені параметри схеми заміщення. Проведений опис асинхронної машини, складена структурна схема, виконаний синтез регуляторів швидкості та струму для реалізації двоконтурної схеми підпорядкованого керування.

Під час моделювання зібраної в Simulink схеми досліджені дві моделі: з П- та ПІ-регулятором швидкості. Із чого стало зрозуміло, що інтегральна складова вносить у відпрацювання тахограми деяке перерегулювання. У випадку відсутності інтегральної складової в системі можна бачити дотягування, що не суперечить теорії автоматичного керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. P. M. McGuire, *Conveyors: Application, Selection, and Integration*. CRC Press, 2023.
2. I. G. Mulani, *Engineering Science and Application Design for Belt Conveyors*. Madhu I. Mulani, 2002.
3. E. D. Yardley and L. R. Stace, *Belt Conveying of Minerals*. Elsevier Science, 2008.
4. R. Marino, P. Tomei, and C. M. Verrelli, *Induction Motor Control Design*. Springer London, 2010.
5. A. Trzynadlowski, *Control of Induction Motors*. Elsevier Science, 2001.
6. Левинсон, В.П. Транспортные устройства непрерывного действия / В.П. Левинсон – М.: Машгиз, 1978. – 564 с.
7. Кузьмин А.В., Марон Ф.Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно—транспортных машин.— Минск: Высшая школа, 1983. — 350 с.
8. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины. — М.: Машиностроение, 1983. —487 с.
9. Проектирование ленточного конвейера. Методические указания для студентов специальности 190205 «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» / А.В. Тарнопольский, Н.Е. Курносов, Л.П. Корнилаева, Ю.К. Измайлов – Пенза : ПензГУ, 2009. – 60 с.

ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ

Планування робіт по охороні праці - це організаційний управлінський процес, здійснюваний з метою забезпечення безпечних умов праці працівників на основі ефективного використання засобів, що виділяються на поліпшення умов і охорони праці.

Складання планів по охороні праці є розробкою конкретних заходів на певний термін, з вказівкою виконавців і засобів, необхідних для реалізації заходів.

Фінансування заходів щодо поліпшення умов і охорони праці в організаціях незалежно від організаційно-правових форм (за винятком федеральних казенних підприємств і федеральних установ) здійснюється в розмірі не менше 0,2 відсотка суми витрат на виробництво продукції (робіт, послуг), а в організаціях.

Згідно з Рекомендаціями по плануванню заходів щодо охорони праці заходу щодо охорони праці забезпечуються відповідною проектно-конструкторскою і технологічною документацією, оформляються розділом в колективному договорі і угоді по охороні праці на основі аналізу причин виробничого травматизму і професійних захворювань, за результатами експертизи технічного стану виробничого устаткування, а також з урахуванням робіт по обов'язковій сертифікації постійних робочих місць на виробничих об'єктах на відповідність вимогам охорони праці.

Угода по охороні праці - правова форма планування і проведення заходів щодо охорони праці з вказівкою термінів виконання і відповідальних осіб.

Воно набуває чинності з моменту його підписання сторонами (працедавцями і уповноваженими працівниками показними органами) або з дня, встановленого в угоді. Внесення змін і доповнень до угоди виробляється по взаємній згоді сторін. Контроль за виконанням угоди здійснюється безпосередньо сторонами або уповноваженими ними представниками. При

здійсненні контролю сторони зобов'язані надавати усю необхідну для цього наявну інформацію.

Заходи щодо охорони праці повинні включати наступні напрями:

- модернізація технологічного, підйомно-транспортного і іншого виробничого устаткування;
- впровадження систем (пристроїв) автоматичного і дистанційного управління і регулювання виробничим устаткуванням, технологічними процесами, підйомними і транспортними пристроями, застосування промислових роботів в небезпечних і шкідливих виробництвах з метою забезпечення безпеки працівників;
- вдосконалення технологічних процесів в цілях усунення дії на працівників небезпечних і шкідливих виробничих чинників;
- впровадження систем автоматичного контролю і сигналізації рівнів небезпечних і шкідливих виробничих чинників на робочих місцях;
- впровадження і вдосконалення технічних пристроїв, що забезпечують захист працівників від поразки електричним струмом;
- установка запобіжних, захисних і сигналізуючих пристроїв (пристосувань) в цілях забезпечення безпечної експлуатації і аварійного захисту парових, водяних, газових, кислотних і інших виробничих комунікацій і споруд;
- механізація і автоматизація технологічних операцій (процесів), пов'язаних із зберіганням, переміщенням (транспортуванням), заповненням і спорожненням пересувних і стаціонарних резервуарів (посудин) з отруйними, агресивними, легкозаймистими і горючими рідинами, використовуваними у виробництві;
- зниження до регламентованих рівнів шкідливих речовин в повітрі робочої зони, несприятливо діючих механічних коливань (шум, вібрація, ультразвук та ін.) і випромінювань (іонізуючого, електромагнітного, лазерного, ультрафіолетового та ін.) на робочих місцях;
- пристрій нових і вдосконалення наявних засобів колективного захисту працівників від дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників;

- пристрій нових і реконструкція наявних опалювальних і вентиляційних систем у виробничих і побутових приміщеннях, теплових і повітряних завіс, аспіраційних і пилогазоуловлюючих установок з метою забезпечення нормального теплового режиму і мікроклімату, чистота повітряного середовища в робочій і обслуговуваних зонах приміщень;
- приведення природного і штучного освітлення на робочих місцях, в цехах, побутових приміщеннях, місцях масового переходу людей на території до норм;
- перепланування розміщення виробничого устаткування, організація робочих місць з метою забезпечення безпеки працівників;
- нанесення на виробниче устаткування (органи управління і контролю, елементи конструкції), комунікації і на інші об'єкти сигнальних кольорів і знаків безпеки; механізація робіт при складуванні і транспортуванні сировини, готової продукції і відходів виробництва;
- механізація прибирання виробничих приміщень, своєчасне видалення і знешкодження відходів виробництва, небезпечних і шкідливих виробничих чинників, що є джерелами, очищення воздуховодів і вентиляційних установок, освітлювальної арматури, вікон, фрамуг, світлових ліхтарів;
- приведення будівель (виробничих, адміністративних, побутових, громадських, складських), споруд, приміщень, будівельних і промислових майданчиків до норм;
- розширення, реконструкція і оснащення санітарно-побутових приміщень (гардеробних, душових, умивальних, убиралень, місць для розміщення приміщень для особистої гігієни, приміщень для обігріву або охолодження, обробки, зберігання і видачі спеціального одягу і др.;
- заходи, пов'язані із забезпеченням працівників, зайнятих на роботах з шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на роботах, вироблюваних в особливих температурних і кліматичних умовах або пов'язаних із забрудненням, спеціальним одягом, спеціальним взуттям і

іншими засобами індивідуального захисту, змиваючими і знешкоджуючими засобами;

- придбання і монтаж установок (автоматів) для приготування газованої води, пристрій централізованої подачі до робочих місць питної і газованої води, чаю і інших тонізуючих напоїв;
- пристрій на діючих об'єктах нових і реконструкція місць організованого відпочинку, що мають, приміщень і кімнат релаксації, психологічного розвантаження, місць обігріву працівників, а також укриттів від сонячних променів і атмосферних опадів при роботах на відкритому повітрі;
- пристрій тротуарів, переходів, тунелів, галерей на території підприємства (цехи), будівельного майданчика в цілях забезпечення безпеки працівників, впровадження системи заходів по профілактиці дорожньо-транспортного травматизму;
- проведення експертизи умов праці в проектній і технологічній документації при будівництві нових і реконструкції діючих підприємств, будівель, споруд, об'єктів виробничого призначення,
- проведення атестації робочих місць за умовами праці з наступної сертифікації організації робіт по охороні праці;
- організація навчання, інструктажу, перевірки знань по охороні праці працівників підприємства;
- організація кабінетів, куточків, пересувних лабораторій, придбання для них необхідних приладів, наочних посібників, демонстраційної апаратури і тому подібне, проведення виставок по охороні праці і безпеки дорожнього руху;
- розробка, видання (розмноження) інструкцій по охороні праці, а також придбання інших нормативних правових актів і літератури в області охорони праці.

На розсуд працедавців, професійних спілок і інших уповноважених працівниками показних органів в заходи щодо охорони праці можуть включатися і інші роботи, спрямовані на оздоровлення працівників і поліпшення умов їх праці.

ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____