

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕСШКОВ
“ ____ ” _____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **за другим (магістерським) рівнем вищої** **освіти**

на тему:

**«Підвищення енергоефективності роботи стрічкового конвеєру
гірничо-збагачувального виробництва»**

Виконав здобувач вищої освіти

VI курсу, групи *ЕЕ-20М*
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»,

Микола РУДНЄВ
« ____ » _____ 2021 р.

Керівник роботи
к.т.н., доцент

Наталія ГАРАСЬОВА
« ____ » _____ 2021 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *автоматики та енергетики*

Кафедра *електротехнічних систем та енергетичного менеджменту*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *14 «Електрична інженерія»*

Спеціальність *141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Освітньо-професійна програма *Електротехнічні системи електроспоживання*

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ *Плешков П.Г.*

«_____» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Руднєва Миколи Анатолійовича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи *Підвищення енергоефективності роботи стрічкового конвеєру гірничо-збагачувального виробництва*

Improvement of energy efficiency of the belt conveyor of mining and processing production

2. Керівник роботи *Гарасьова Наталія Юріївна, к.т.н., доцент*

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту *03.12.2021 р.*

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи *Аналіз особливостей експлуатації конвеєрних ліній гірничо-збагачувального виробництва; споживання електроенергії конвеєрними установками, основні напрямки її заощадження; розрахунок та математичне моделювання системи електроприводу стрічкового конвеєру; комп'ютерні імітаційні моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода конвеєрної установки; комп'ютерне імітаційне моделювання; охорона праці; оцінка економічної ефективності запропонованих заходів; висновки.*

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	доц., к.т.н. І.В. Савеленко		
Економічна частина	доц., к.е.н. І.В. Журило		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2021 р.	
2	Аналіз особливостей експлуатації стрічкових конвеєрів гірничо-збагачувального виробництва, основні напрямки заощадження електроенергії	11.10.2021 р.	
3	Використання регульованого електроприводу при роботі стрічкових конвеєрів гірничо-збагачувального виробництва	20.10.2021 р.	
4	Визначення та розрахунок системи електроприводу стрічкового конвеєру	27.10.2021 р.	
5	Комп'ютерні імітаційні моделі частотно-регульованого асинхронного електропривода конвеєрної установки	05.11.2021 р.	
6	Охорона праці	20.11.2021 р.	
7	Оцінка економічної ефективності запропонованих заходів	23.11.2021 р.	
8	Висновки, перелік посилань	25.11.2021 р.	
9	Оформлення презентації МР	28.11.2021 р.	
10	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки МР	01.12.2021 р.	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2021 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2021 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 103 с.; 35 рис.; 13 табл.; 44 джерела

Руднєв М.А. Підвищення енергоефективності роботи стрічкового конвеєру гірничо-збагачувального виробництва.

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

Ціллю кваліфікаційної роботи є дослідження режимів роботи та підвищення енергоефективності функціонування конвеєрних ліній гірничо-збагачувального виробництва.

Обґрунтовано доцільність застосування безперервного регулювання швидкості конвеєрної стрічки в залежності від вантажопотоку. Для регулювання вибраний частотно-регульований асинхронний електропривод. Розрахунки виконані для системи «перетворювач частоти-асинхронний двигун-конвеєр».

У якості математичного середовища для проведення розрахунків був використаний пакет прикладних програм MatLab Simulink. Визначені характеристики роботи системи в перехідних та усталених режимах. Розроблена структурна схема регулювання швидкості конвеєрної стрічки для стабілізації погонного навантаження конвеєра.

Розглянуто економічний ефект від впровадження частотно-регульованого електроприводу конвеєра.

**КОНВЕЄРНА ЛІНІЯ, РЕГУЛЬОВАНИЙ АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД,
ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, КОМП'ЮТЕРНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ,
РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ**

THE SUMMARY

Explanatory note: 103 pages, 35 figures, 13 tables, 44 sources.

Rudnev M.A. Improvement of energy efficiency of the belt conveyor of mining and processing production.

Specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics", educational and professional program "Electrical power consumption systems". - Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021.

The purpose of the qualification work is to study the modes of operation and increase the energy efficiency of the conveyor lines of mining and processing.

The expediency of application of continuous regulation of conveyor belt speed depending on cargo flow is substantiated. The frequency-regulated asynchronous electric drive is chosen for regulation. The calculations are performed for the system "frequency converter-asynchronous motor-conveyor".

The MatLab Simulink application package was used as a mathematical environment for calculations. The characteristics of the system operation in transient and steady-state modes are determined. The structural scheme of conveyor belt speed control for stabilization of conveyor running load is developed.

The economic effect of the introduction of frequency-regulated electric drive of the conveyor is considered.

CONVEYOR LINE, ADJUSTED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE,
FREQUENCY CONVERTER, COMPUTER SIMULATION MODEL, QUICK
ADJUSTMENT

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА, ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	11
1.1 Використання конвеєрного транспорту в гірничо-збагачувальному виробництві.....	11
1.2 Загальна характеристика електроприводів конвеєрних ліній.....	13
1.3 Споживання електричної енергії конвеєрними установками.....	14
1.4 Напрямки підвищення ефективності роботи конвеєрних ліній.....	16
2 ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРИ РОБОТІ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	19
2.1 Обґрунтування доцільності регулювання швидкості конвеєрної стрічки при зміні вантажопотоку.....	19
2.2 Автоматичне регулювання швидкості стрічкового конвеєра.....	22
2.2.1 Дискретне регулювання швидкості стрічкового конвеєра залежно від вантажопотоку.....	23
2.2.2. Безперервне регулювання швидкості стрічкового конвеєра залежно від вантажопотоку	26
2.3 Види і загальна характеристика регульованих електроприводів.....	28
2.3.1. Сучасні перетворювачі частоти загального застосування.....	28
2.3.2. Режими управління електродвигуном.....	30
2.3.3. Частотнорегульований асинхронний електропривод.....	32
2.4 Дослідження режимів роботи системи ПЧ – АД.....	37
3 ВИЗНАЧЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРУ.....	42
3.1 Вибір обладнання силової частини конвеєрної установки.....	42

	7
3.1.1. Розрахунок та вибір двигуна конвеєра.....	43
3.1.2. Розрахунок та вибір перетворювача частоти.....	44
3.2 Математичне представлення електромеханічної частини стрічкового конвеєра.....	48
4 КОМП'ЮТЕРНІ ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРНОЇ УСТАНОВКИ.....	54
4.1 Комп'ютерна імітаційна модель асинхронного двигуна та перетворювача частоти.....	54
4.1.1. Математична модель узагальненої АМ.....	54
4.2 Моделювання пускових та усталених режимів.....	61
4.3 Узагальнена структурна схема системи автоматичного керування погонним навантаженням конвеєрної установки на основі частотно-регульованого асинхронного електропривода.....	66
4.4 Система керування продуктивності стрічкового конвеєру.....	68
4.5 Дослідження на моделі системи стабілізації погонного навантаження конвеєра.....	74
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	79
5.1 Загальні положення електробезпеки на підприємстві.....	79
5.2 Електроустановки напругою до 1000 В в мережі із заземленою нейтраллю.....	80
5.3 Безпека та охорона праці при експлуатації конвеєрного транспорту..	81
5.4 Застосування залізобетонних фундаментів промислових будівель у якості заземлювачів.....	84
6 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ.....	87
6.1 Характеристика складових економічного ефекту.....	87
6.2 Економічне обґрунтування впровадження частотно-регульованого електроприводу конвеєрної лінії.....	90

	8
6.2.1. Визначення величини капіталовкладень.....	90
6.2.2. Розрахунок експлуатаційних витрат.....	91
6.2.3. Розрахунок показників економічної ефективності.....	95
ВИСНОВКИ.....	98
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	99
ДОДАТОК А ЗВІТ ПОДІБНОСТІ.....	103

ВСТУП

Питання підвищення енергоефективності промислового обладнання набуло особливої актуальності в наш час. Це пов'язано, в першу чергу, з підвищенням вартості електричної енергії та розвитком конкуренції в умовах ринку. Насамперед, це стосується енергоємних галузей промисловості, таких як гірничо-збагачувальне виробництво.

Серед промислового обладнання гірничо-збагачувального виробництва, значна частина споживання електроенергії витрачається на конвеєрні лінії та поточно-транспортні системи. Таким чином, проблема підвищення економічної ефективності конвеєрних установок при їх експлуатації на гірничо-збагачувальних виробництвах є актуальною.

Підвищення споживання електроенергії та знос електромеханічних частин конвеєрної установки викликає неузгодженість в роботі конвеєра та надходження вантажопотоку. Величина вантажопотоку, що надходить на стрічку конвеєру, повинна забезпечувати номінальну продуктивність стрічкового конвеєра. Сам вантажопотік, в ідеальному випадку, повинен бути безперервним і рівномірним, але реально потік нерівномірний та переривчастий.

Серед основних чинників, які впливають на зниження електроспоживання конвеєрних систем, є регулювання швидкості руху стрічки конвеєру в залежності від величини вантажопотоку. При регулюванні швидкості стрічки конвеєра зменшуються витрати електроенергії та знос механічних елементів системи.

В роботі розглянуто основні види регулювання швидкості руху стрічки, такі як дискретне та безперервне. Наводяться основні переваги та недоліки кожного способу та виконується їх обґрунтоване порівняння.

Дуже важливим є вибір типу електроприводу конвеєрної установки. В роботі виконується огляд основних типів електроприводів та здійснюється вибір частотно-регульованого асинхронного електроприводу з короткозамкнутим ротором. Також розглядається вибір системи керування.

Далі проводяться дослідження запропонованої системи з точки зору забезпечення регулювання швидкості руху стрічки на стабілізацію погонного навантаження конвеєра.

Для проведення дослідження задачі регулювання швидкості обертання двигуна в залежності від величини вантажопотоку приймається до використання пакет програм MatLab. Цей пакет являється універсальним середовищем з точки зору моделювання технічних систем. Він дозволяє створювати різні моделі: фізичні, математичні, структурні.

В нашому випадку, потрібно дослідити роботу системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором - конвеєр» з точки зору регулювання швидкості обертання при зміні продуктивності роботи та проаналізувати основні показники цієї системи. Аналіз публікацій показує доцільність вибору математичної та структурної моделі, які в подальшому будуть використанні для проведення розрахунків.

В роботі приділена увага також економічному аспекту роботи системи та розраховуються основні техніко-економічні показники.

Обов'язково розглянуті питання техніки безпеки та охорони праці при експлуатації конвеєрних ліній.

1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА, ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЗАОЩАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Використання конвеєрного транспорту в гірничо-збагачувальному виробництві

У структурному плані гірничо-збагачувальне виробництво є об'єднанням декількох комплексів: гірничого, транспортного, дробильного, збагачувального, допоміжних цехів та управління. До його складу входять кар'єри, цех технологічного автотранспорту, залізничний цех, в якому здійснюється відвантаження товарної руди і транспортування порід з горизонтів кар'єру, збагачувальна фабрика, дробильна фабрика. На виробництві застосовується циклічно-потокова технологія здобичі руди з використанням автомобільно-конвеєрного транспорту. Технологічна схема передбачає переміщення висадженої руди із забоїв автосамоскидами до конусних дробарок приймальних пристроїв. Після дроблення рудапохилими конвеєрами підземними виробленнями та наземними галереями подається на збагачувальні фабрики.

Таким чином, від роботи конвеєрного транспорту, основу якого складають стрічкові конвеєри, залежить ефективність всього виробництва. Ефективність функціонування вимагає застосування високопродуктивних стрічкових конвеєрів, достатньо великої довжини з використанням синтетичних і гумовотросових стрічок, що зумовлює збільшення вартості конвеєрної установки. Також зниження ефективності використання конвеєрної установки приводить нерівномірність завантаження конвеєру та повна відсутність вантажу у певні інтервали часу. Це збільшує холостий пробіг стрічки, що в результаті призводить до збільшення споживання електроенергії. Крім того, такі режими роботи, викликають знос стрічки та роликів.

Насамперед, для вирішення цієї проблеми потрібно узгодити параметри вантажопотоку, тобто кількість руди, що надходить на стрічку конвеєру, з режимом роботи стрічкового конвеєру. Потрібно забезпечити номінальну продуктивність конвеєру, що досягається його стабільним завантаженням, безперервним та рівномірним вантажопотоком.

Зробити це можливо двома способами:

- впливом на вантажопотік;
- регулюванням швидкості конвеєру.

При використанні першого способу застосовуються бункери та дискретне регулювання швидкості конвеєра. Але цей спосіб має багато недоліків, бо знижується надійність роботи двигуна конвеєру в пусько-гальмівних режимах, що призводить до більшого зносу механічного устаткування конвеєра та викликає додаткові капітальні витрати. При підземних розробках цей метод взагалі не використовується, через обмежений простір гірських вироблень.

Тому доцільно розглянути другий спосіб, що пов'язаний з налаштуванням автоматичної зміни швидкості руху стрічки конвеєру, в залежності від поточної величини вантажопотоку, що поступає на неї. Тоді виникає можливість зниження зносу стрічки та витрати електроенергії. Також можливо розраховувати ширину стрічки не по максимальному вантажопотоку, який трапляється в окремі моменти часу, а по деякому середньому значенню.

Використовують два способи регулювання: безперервний та дискретний. При дискретному регулюванні здійснюється стрибкоподібна зміна швидкості руху стрічки при досягненні вантажопотоком рівня перемикання. При безперервному регулюванні швидкість конвеєрної стрічки змінюється пропорційно, відповідно до величини вантажопотоку, при цьому погонне навантаження на стрічці залишається постійним і близьким до максимального розрахункового.

1.2 Загальна характеристика електроприводів конвеєрних ліній

До найбільш розповсюджених механізмів безперервного транспорту відносяться стрічкові конвеєри. Вони широко застосовуються на гірничих розробках, теплових електростанціях, збагачувальних фабриках і т.і.

Часто виробничий процес обслуговується групою конвеєрів, які пов'язані загальним технологічним процесом і складають єдину поточно-транспортну систему (ПТС). В ПТС конвеєри можуть створювати декілька паралельних або послідовних гілок. При цьому рух тягових органів конвеєрів повинен бути узгодженим.

Механізми і системи безперервного транспорту обладнані датчиками різних типів, що призначені для контролю стану технологічного процесу і його параметрів (рівня, тиску, швидкості руху, температури і т.і).

Конвеєри та транспортери складають основу транспортних ліній на гірничо-збагачувальних фабриках. Від їх надійності та безаварійності залежить продуктивність підприємства. Звичайно, стрічкові конвеєри обладнуються одним або декількома асинхронними електроприводами і в процесі експлуатації не регулюються по швидкості.

Для транспортування руди на дробильно-збагачувальних фабриках використовують наступні типи конвеєрів:

- конвеєр стрічковий кар'єрний КЛКЗ, КЛКМ, КЛКМ(н), КЛКО. Технічна характеристика:

- Ширина стрічки, мм – 1200;
- Швидкість стрічки, м/с – 3,1; 4,2; 5,2; 6,3;
- Продуктивність, т/год – 3800
- Висота транспортування, м – 2-35;
- Довжина транспортування, м – 250-800;
- Напруга живлення, в - 6000,10000;
- Максимальна сумарна потужність головних приводних електродвигунів, кВт – 1х250; 1х315; 1х400; 2х250; 2х315; 2х400.

- конвеєр стрічковий магістральний 4Л1200Д.

Технічна характеристика:

- Ширина стрічки, мм – 1200;
 - Швидкість стрічки, м/с – 2,5; 3,15; 4,0;
 - Довжина транспортування, м – 2000;
 - Максимальна продуктивність при швидкості транспортування 2,5 м/с., т/год - 1400;
 - Напруга живлення, в – 660, 1140;
 - Встановлена потужність привода, кВт -4x250.
- конвеєр скребковий стаціонарний типу КСК. Технічна характеристика КСК-6; КСК-8; КСК-10:
 - Швидкість ланцюга, м/с –0,5;
 - Максимальна продуктивність, т/год - 250; 350; 650;
 - номінальна потужність електродвигуна, кВт -37; 50; 90.
- конвеєр стрічковий : 1Л80; 2Л80:
 - продуктивність, т/год – 330, 420; 300, 420;
 - приймальна здатність, м³/хв – 6,5; 8,15
 - довжина, м - 500 ; 1000;
 - потужність електропривода, кВт – 40; 80, 110;
 - ширина стрічки, мм – 800;
 - швидкість стрічки, м/с – 1,6; 2,0;

1.3 Споживання електричної енергії конвеєрними установками

Стрічка конвеєра приводиться до руху за допомогою електричного двигуна (наприклад це асинхронний двигун з короткозамкнутим чи фазним ротором) через редуктор та приводний барабан.

Оцінити величину електроспоживання конвеєрними установками можливо наступними способами: прямим вимірюванням обсягів спожитої електроенергії та розрахунковими методами.

Існує декілька розрахункових методів:

- точний тяговий розрахунок з використанням уточнених технологічних коефіцієнтів;
- наближений тяговий розрахунок з використанням коефіцієнтів, отриманих шляхом обробки статистичних даних;
- за допомогою регресійних моделей;
- за допомогою математичної моделі.

Для орієнтовних розрахунків можна користуватися спрощеною формулою, за якою споживання електроенергії однією конвеєрною лінією за розрахунковий період часу визначається за формулою [4]:

- для стрічкового конвеєра:

$$W_{CT} = 0,013 \cdot L \cdot \delta \left[C_{CT} \cdot V_{CT} \cdot t_p + 0,28 \cdot Q_p \cdot \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{\delta} \right) \right], \text{ кВт} \cdot \text{год.}; \quad (1.1)$$

- для скребкового конвеєра:

$$W_{CK} = 0,01 \cdot L_T \cdot \delta [C_{CK} \cdot V_{CK} \cdot t_p + 0,34 \cdot Q_p \cdot (1 \pm \operatorname{tg} \beta)], \text{ кВт} \cdot \text{год.}, \quad (1.2)$$

де L – довжина конвеєра, м;

L_{Π} – половина просування лінії вибою за розрахунковий період роботи при подовженні конвеєра;

β – кут установки конвеєра, градус;

$L_r = L \cdot \cos \beta$ - значення горизонтальної довжини конвеєрної стрічки, м;

δ – значення коефіцієнту опору руху, який приймається для стаціонарних конвеєрів у межах (0,02-0,033);

$C_{л}, C_{CK}$ –погонна маса частин конвеєра, що рухаються ;

t_p – час роботи конвеєрної установки, що приймається за розрахунковий період, год;

V_c, V_{CK} – відповідно швидкість стрічки конвеєра та його ланцюга, м/с;

Q_p – розрахункова маса вантажу, який переміщений конвеєром за час роботи, т.

При роботі незавантажених конвеєрів можна оцінити нераціональні витрати електроенергії. Для цього використовується перший доданок формул (1.1) та (1.2) і час роботи конвеєрної установки t_p замінюється часом неробочого ходу конвеєрної лінії $t_{нх}$.

1.4 Напрямки підвищення ефективності роботи конвеєрних ліній

Для економії електроенергії при експлуатації конвеєрного транспорту пропонуються наступні заходи [4]:

- збільшення середнього завантаження конвеєрних ліній до номінального;
- усунення додаткової роботи конвеєрів в неробочих режимах;
- припинення нераціонального використання скребкових конвеєрів;
- постійний догляд за технічним станом конвеєра;
- застосування регульованого електропривода;
- автоматизація конвеєрних установок.

Для досягнення збільшення завантаження конвеєра, слід за конвеєром встановлювати бункер чи іншу усереднюючи ємність, за допомогою якої можливо здійснювати завантаження послідовно працюючих конвеєрів.

Потрібно розглядати можливість заміни скребкових конвеєрів на стрічкові. Економічний ефект цього заходу, а також використання бункерів, визначається з використанням аналітичних виразів витрати електроенергії конвеєрами.

Для того, щоб знизити електроспоживання шляхом підтримки високого технічного стану конвеєрів, пропонуються наступні заходи:

- періодично, відповідно до карти заводу-виготовлювача, проводити змащування механічних вузлів;

- виключати заштибовки конвеєру і кінцевих станцій;
- виключити експлуатацію конвеєру при надмірному зношенні окремих вузлів;
- регулярно контролювати стан пристроїв для очищення барабанів та стрічки у стрічкових конвеєрів;
- регулярно контролювати технічний стан замкових з'єднань і стиків секцій регулювання натягу скребкового ланцюга в заданих межах для скребкових конвеєрів;
- вчасно робити планово-запобіжний ремонт.

Що стосується автоматизації конвеєрних установок, то її застосування дозволяє здійснювати програмне керування, регулювання та моніторинг ходу конвеєрної стрічки. Наведемо приклади таких систем автоматизованого керування конвеєрними лініями:

- ✓ Система автоматики APD1 (Чехія) виконує функції керування, програмного регулювання та моніторингу ходу конвеєрної стрічки.

Вона дозволяє забезпечити гучний розмовний зв'язок та передачу даних з шахти на поверхню, візуалізацію процесу відробітки, сигналізацію і передачу попереджувального сигналу при розгоні машин на штреках або в забої.

Ця система придатна до використання у всіх шахтах небезпечних за вибухом вугільного пилу та метану.

Система автоматики APD1 є мікропроцесорною системою керування.

- ✓ Система АКК-1М призначена для керування розгалуженими конвеєрними лініями.

Ця система виконує наступні основні функції [21]:

- здійснює автоматичний пуск конвеєрів, які об'єднані в одну лінію. При цьому визначається порядок запуску послідовних конвеєрів, який відповідає зворотному напрямку руху вантажопотоку. Витримуються необхідний проміжок часу між пусками окремих конвеєрів;
- пуск може здійснюватися з виносного кнопочового посту або з пульта керування, запускатися може як частина, так і вся конвеєрна стрічка;

- запуск конвеєру може бути здійснений на місці для випробування, ремонту
 - забезпечує заданий максимальний час запуску кожної конвеєрної лінії;
 - виконує автоматичне відключення конвеєрної стрічки в аварійних режимах та регулює відключення конвеєрів, що працюють об'єднаними в проточно-транспортну систему;
 - забезпечує роботу апаратури на розгалуженій конвеєрній лінії;
 - забезпечує можливість роботи конвеєру в енергозберігаючому режимі при застосуванні додаткових апаратів.
- ✓ Система автоматизованого керування конвеєрними лініями (САККЛ).

Система призначена для:

- централізованого автоматизованого керування та контролю роботи стрічкових конвеєрних ліній, які використовуються для перевезення людей та транспортування вантажу. Можуть бути використані нерозгалужені та розгалужені конвеєрні лінії з необмеженим числом маршрутів та з числом конвеєрів (до 60 одиниць), що підключаються на один комплект АПУ та АЛС;
- місцевого та централізованого автоматизованого керування і контролю роботи як окремих конвеєрів, так і конвеєрів, що входять до складу конвеєрної лінії;
- виконання функцій захисного відключення і блокування, автоматичної реєстрації інформації про роботу конвеєрів та команди керування і налаштування.

Апаратура САККЛ використовується в підземних виробленнях шахт, що небезпечні по газу і пилу, але може також застосовуватися на копальнях, збагачувальних фабриках і інших підприємствах.

Більш детально, у розділі 2, розглянемо доцільність застосування регульованого електроприводу, оскільки цей захід дозволяє отримати суттєву економію електроенергії та є перспективним.

2 ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРИ РОБОТІ СТІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 Обґрунтування доцільності регулювання швидкості конвеєрної стрічки при зміні вантажопотоку

Для вирішення питання доцільності використання регульованого електроприводу розглянемо рівняння руху стрічки. Рух стрічки конвеєра або транспортера, як правило, передається від асинхронного двигуна через редуктор і приводний барабан. Значення моменту на валу двигуна розраховується за формулою:

$$M = \frac{F \cdot R}{i_p \cdot \eta_p}, \quad (2.1)$$

де F – величина зусилля на приводному барабані;

i_p – значення передавального відношення редуктора;

η_p – значення коефіцієнту корисної дії редуктора;

R – значення радіусу приводного барабана.

У свою чергу, зусилля на приводному барабані знаходиться за формулою:

$$F = F_{нх} + F_{\epsilon}, \quad (2.2)$$

де $F_{нх}$; F_{ϵ} – значення зусилля, що витрачається на переміщення стрічки конвеєра та вантажу відповідно.

Рівняння (2.1) справедливо також для моменту неробочого ходу двигуна:

$$M_{нх} = \frac{F_{нх} \cdot R}{i_p \cdot \eta_{п.нх}}, \quad (2.3)$$

де $\eta_{p_{hx}}$ - ККД редуктора, відповідний зусиллю F_{hx} .

Тобто, при роботі конвеєру, тягове зусилля складається з двох частин: зусилля на переміщення стрічки (неробочий хід) та зусилля на переміщення вантажу (корисна робота).

Далі, для більшої наочності, перейдемо до відносних одиниць. Вважаючи, що залежність сил тертя від зусиль, що необхідні для переміщення вантажу, лінійна, представимо залежність моменту на валу двигуна від зусилля на барабані:

$$M_* = M_{h.x*} + (1 - M_{h.x*})F_{B*}, \quad (2.4)$$

де $M_* = M/M_{ном}$;

$M_{h.x*} = M_{h.x}/M_{ном}$;

$F_{B*} = F_B/F_{B,ном}$ ($M_{ном}$ - номінальний момент на валу двигуна, який враховує переміщення стрічки конвеєру з номінальною швидкістю при номінальному завантаженні).

Продуктивність конвеєрної установки Q визначається складовою F_B зусилля, що тягне, і лінійною швидкістю переміщення V і розраховується:

$$Q_* = F_g \cdot V_*, \quad (2.5)$$

де $Q_* = Q/Q_{ном}$ ($Q_{ном}$ - значення номінальної продуктивності конвеєра).

Якщо номінальній швидкості конвеєра постійна $V_* = 1$

$$Q_* = F_{I*}, \quad (2.6)$$

тому потужність, що споживається з валу двигуна можна записати у вигляді:

$$P_* = M_* \omega_* = M_{h.x*} + (1 - M_{h.x*}) \cdot Q_*, \quad (2.7)$$

$$\text{де } P_* = \frac{P}{P_{ном}}; \quad \omega_* = \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad \omega = \frac{V \cdot i_p}{R}$$

$P_{ном}$, $\omega_{ном}$ - номінальна потужність та кутова швидкість на валу двигуна, відповідно.

Оскільки продуктивність конвеєрної установки визначається потужністю, що витрачається на переміщення вантажу, то для підвищення ефективності потрібно знижувати потужність, яка відповідає за подолання моменту неробочого ходу.

Потрібно підтримувати такий режим роботи, при якому отримується постійна складової зусилля $F_{в*}=1$. При цьому, потрібно мати такий закон зміни кутової швидкості:

$$\omega_* = V_* = Q_*.$$

Тоді потужність на валу двигуна:

$$P_* = M_* \omega_* = [M_{X.X*} + (1 - M_{X.X*})] \cdot Q_* = Q_* . \quad (2.8)$$

Зміна потужності на валу двигуна:

$$\Delta P_* = M_* \omega_* = M_{X.X*} (1 - Q_*). \quad (2.9)$$

Аналізуючи формулу (2.9) бачимо, що найбільший ефект при регулюванні швидкості конвеєру можна отримати при великому моменті неробочого ходу, коли значно знижується його продуктивність.

Доцільності регулювання швидкості конвеєрної стрічки присвячено дуже багато робіт, наприклад [12-16].

При роботі конвеєру зі змінним навантаженням, час роботи конвеєру в режимі неробочого ходу може становити до 40 % повного часу роботи конвеєру. Для прикладу розглянемо споживання електроенергії конвеєрами для різних типів електроприводів та навантаження. Розрахунки виконувалися для конвеєру з нерегульованим асинхронним електроприводом, частотно-регульованим асинхронним електроприводом та двохшвидкісним асинхронним електроприводом при співвідношенні кутових швидкостей 1:2 та 1:3 [3].

Розрахунки виконувалися для стрічкового конвеєра типу 2Л80У. У випадку нерегульованого АЕП, при низькому завантаженні конвеєру

спостерігалось максимальне споживання електроенергії (воно прийняте за базове у відносних одиницях). При переході на частотно-регульований електропривод з підтримкою постійного погонного навантаження конвеєра, споживання електроенергії знижується на 26... 38 % відповідно до нерегульованого електроприводу. Якщо застосовувати двохшвидкісний асинхронний електропривод при співвідношенні кутових швидкостей 1:2 та 1:3 споживання електроенергії знижується на 5...21% в порівнянні з нерегульованим приводом.

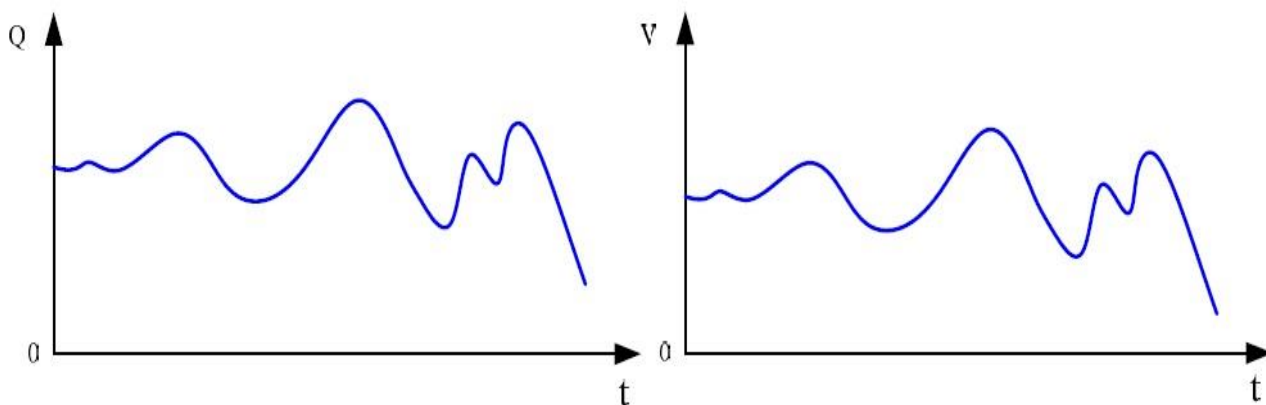
Проведений аналіз підтверджує доцільність застосування регульованого електроприводу, причому отримання максимальної економії можливе при значному зниженні навантаження конвеєру.

2.2. Автоматичне регулювання швидкості стрічкового конвеєра

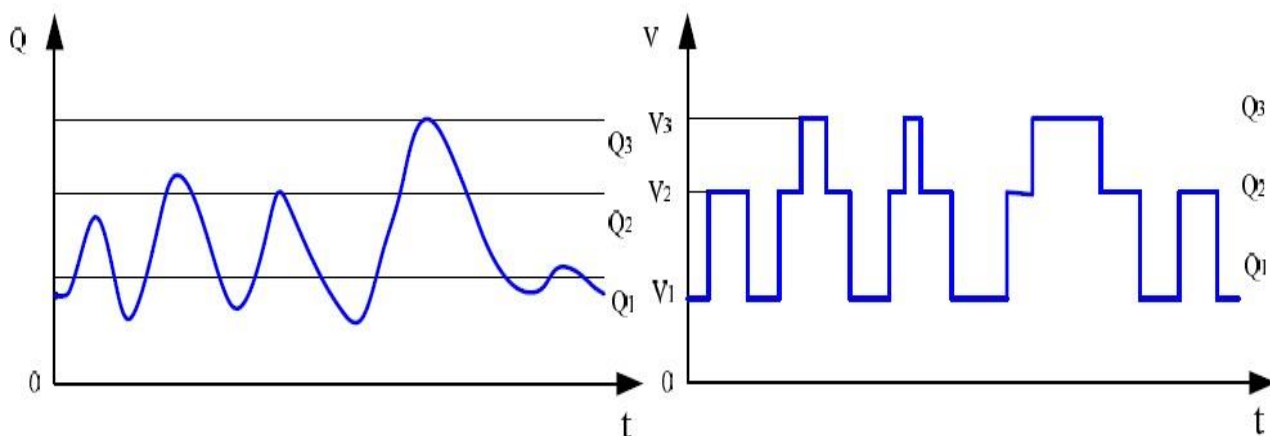
Далі в роботі досліджується питання виконання автоматичного регулювання швидкості конвеєру. Принципово розрізняються два способи:

- дискретний;
- безперервний.

В обох випадках, швидкість конвеєрної стрічки регулюється залежно від величини вантажопотоку, наочно це представлено на рисунку 2.1.



a)



б)

Рисунок 2.1- Безперервна (а) та дискретна (б) зміна швидкості конвеєрної стрічки в залежності від величини вантажопотоку.

Кожний з цих способів має як переваги, так і недоліки, тому розглянемо більш детально їх використання.

2.2.1. Дискретне регулювання швидкості стрічкового конвеєра

При дискретному способі регулювання зміні вантажопотоку відповідають певні порогові значання, при яких виконуються перемикання. Тобто кількість цих порогових значення визначає кількість перемикачів швидкості двигуна.

Важливо розглянути випадок повної відсутності вантажу на конвеєрі. В цьому випадку можлива повна зупинка конвеєра, або робота з мінімальною швидкістю, що ілюструється рисунком 2.2.

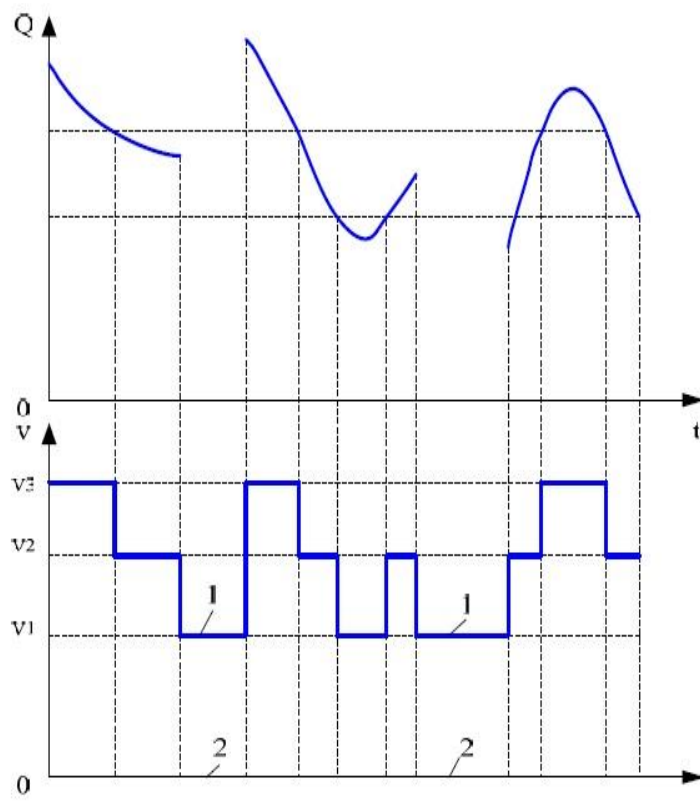


Рисунок 2.2 - Визначення швидкості руху конвеєру без вантажу:
1 – мінімальна швидкість; 2 – повна зупинка

Порівняння цих двох варіантів показує, що в плані економії електроенергії доцільніше використання другого варіанту, але необхідність постійних пусків двигуна призводить до великих пускових моментів та струмів, підвищує динамічне навантаження у стрічці [30,31].

У випадку дискретного регулювання дуже важливо визначити кількість ступенів перемикавання, цьому присвячено багато робіт. У роботі [8] пропонується визначати кількість ступенів перемикавання по діапазону продуктивності. Наприклад, якщо продуктивність конвеєра змінюється в 2-3 рази, то конвеєр буде працювати з 2-3 швидкостями. Вводиться поняття показника ефективності регулювання швидкості:

$$\lambda = \frac{V_{\text{роз}}}{V_{\text{сер}}}, \quad (2.10)$$

де $V_{\text{роз}}$ – розрахована швидкість конвеєра;

$V_{\text{сер}}$ – середня швидкість конвеєра.

Графік цього параметру в залежності від числа перемикачів швидкості наведено на рис. 2.3.

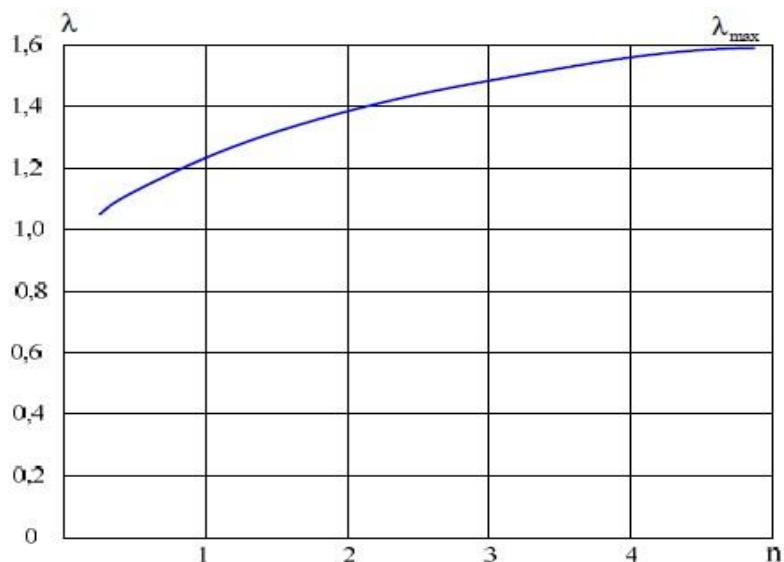


Рисунок 2.3- Значення коефіцієнта ефективності регулювання λ від числа перемикачів швидкості

При необхідності дискретної зміни швидкості розглядається питання вибору типу електроприводу. Наприклад в роботі [13] пропонуються до використання АД з КЗ ротором зі статичним перетворювачем; багатошвидкісний АД; електромеханічний дводвигуновий диференціальний привід; регульований об'ємний гідропривід.

У роботі [6] показано, що ефективної роботи конвеєрної установки можна досягти при діапазоні регулювання 1:3. В цьому випадку використовується чотири ступені перемикачів та чотирьохшвидкісний асинхронний двигун.

При використанні дискретного способу регулювання важливо забезпечити мінімальний пробіг стрічки та середнє погонне навантаження.

2.2.2. Безперервне регулювання швидкості стрічкового конвеєра

Безперервне регулювання передбачає зміну швидкості двигуна пропорційно вантажопотоку. При цьому контролюється значення погонного навантаження стрічки, яке підтримується постійним.

Дослідженню безперервного регулювання швидкості обертання теж присвячено багато робіт, наприклад в роботі [8] розглядається процес стабілізації погонного навантаження стрічки. У зв'язку з тим, що елементи системи автоматичного регулювання є інерційними, реакція конвеєру на зміну вантажопотоку відбувається з запізненням. Для усунення цього недоліку пропонується вимірювати вантажопотік з деяким випередженням у часі, це дозволить виключити недовантаження конвеєру або прокидання вантажу.

Пропонується також слідкувати за погонним навантаженням попереднього конвеєру [12] і коректувати регулювання швидкості наступного.

В роботі [17] визначається, що безперервне регулювання дозволяє підтримувати постійне погонне навантаження на конвеєрі і пробіг стрічки конвеєру скорочується в λ разів. Так як ступінь зносу стрічки конвеєру та роликкоопір має лінійну залежність від довжини шляху, то пропонується приймати що в λ разів зменшиться знос стрічки та роликкоопір.

Для організації безперервного регулювання швидкості конвеєру потрібно використання замкнутих систем автоматичного регулювання (САР). На рисунку 2.4 наведено схему безперервного регулювання. В цій схемі присутні датчики: вантажопотоку (існує багато типів конвеєрних ваг, наприклад, електронні), швидкості стрічки (наприклад, тахометричні). Датчик швидкості, як правило, встановлюється у місці завантаження. Також у схему входять: об'єкт регулювання (це сам конвеєр); виконавчий пристрій (двигун з пристроєм, що регулює), коригувальний пристрій (частотно залежні активні та пасивні елементи); підсилювач та елемент порівняння.

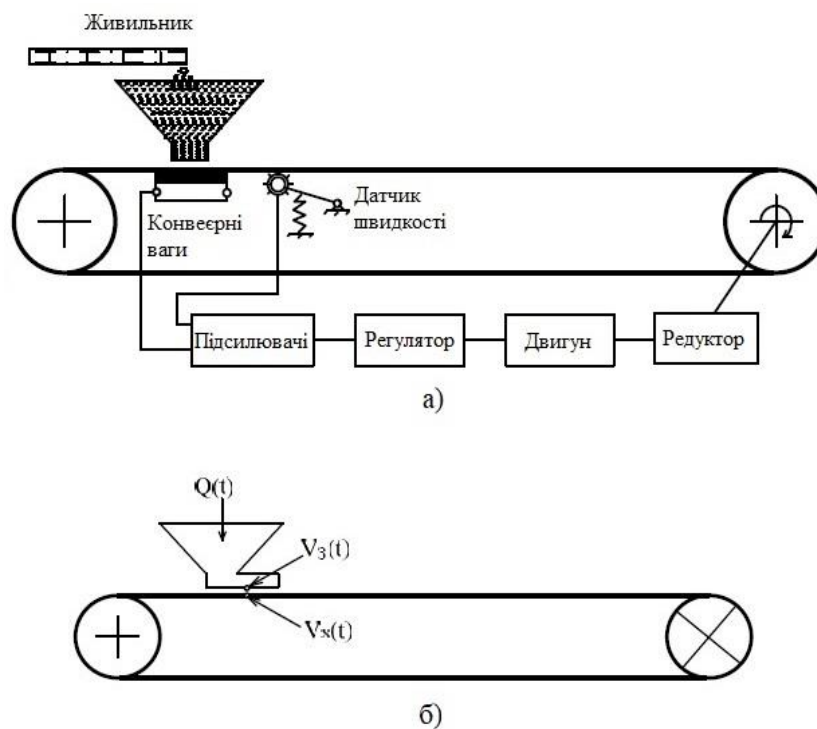


Рисунок 2.4 - Схема системи безперервного регулювання швидкості конвеєру (а) та умовні позначення (б)

Пропонується [25] будувати САР для регулювання швидкості за принципом стабілізації на заданому рівні регульованого параметру за конкретною програмою, або за допомогою слідкуючих систем. Параметром, що регулюється виступає дійсне погонне навантаження на конвеєрі, збурювальний вплив - вантажопотік $Q(t)$, а заданою величиною - сигнал, який пропорційний розрахованому погонному навантаженню $q_{\text{ном}}$.

На вхід елементу порівняння подається сигнал, що пропорційний розрахунковому навантаженню. Формується сигнал неузгодженості, що поступає на регулюючий орган, який в свою чергу змінює швидкість конвеєру. Внаслідок зміни швидкості руху конвеєру, знову змінюється дійсне погонне навантаження. Процес закінчується, коли сигнал неузгодженості стане дорівнювати нулю, що свідчить про стабілізацію погонного навантаження конвеєру.

2.3 Види і загальна характеристика регульованих електроприводів

Найбільш розповсюдженими типами регульованого асинхронного електроприводу (АЕП) являються:

- напівпровідниковий перетворювач частоти – асинхронний двигун (НПЧ-АД);
- тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун (ТПН-АД).

Якщо використовується АД з фазним ротором, застосовується система «пристрій реостатного регулювання – асинхронний двигун з фазним ротором» (ПРР – АДФР).

З цих способів найбільш економічним та ефективним являється частотний спосіб регулювання, тобто НПЧ-АД. Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна регулюється зміною частоти, що отримується з виразу швидкості ідеального неробочого ходу:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_1}{p_n}, \quad (2.11)$$

де f_1 – частота напруги обмотки статора;

p_n – число пар полюсів двигуна.

2.3.1. Сучасні перетворювачі частоти загального застосування

На світовому ринку працюють сотні виробників перетворювачів частоти. Серед них є не тільки всесвітньо відомі гіганти — Mitsubishi, Hitachi (Японія), ABB (Фінляндія), Siemens (ФРГ), але і малі, і дуже малі фірми. З 1990-х років виробництво ПЧ успішно освоєне в Україні.

Крупні фірми вже давно виробляють широкий спектр перетворювачів. Наприклад перетворювачі фірми ABB мають шкалу типорозмірів залежно від потужності - 0,75...1000 кВт, 1 000... 8 000 кВт. Аналогічні сімейства випускають Mitsubishi, Hitachi і інші крупні фірми. Малі фірми, що заявили про свою

продукцію останніми роками, спеціалізуються, в основному, на випуску одного-трьох ходових типоразмерів в діапазоні потужностей від 5 до 75 кВт.

Швидке зростання ринку електронних ПЧ пов'язане перш за все з появою нової елементної бази - силових транзисторних модулів IGBT, IPM і ін.

Перетворювачі частоти поставляються фірмами в різному виконання (від IP00 до IP54) і випускаються в декількох конструктивних виконаннях - від навісного компактного до великогабаритного у вигляді шафи.

Перетворювачі частоти, що виробляються крупними фірмами, в більшості випадків призначені для загального вживання з живленням від трифазної мережі 50/60 Гц з напругою 380 ...460 В і можуть експлуатуватися в умовах, що забезпечують перешкодо- і вологозахищеність, захист від вібрацій і магнітних перешкод, при температурі довкілля від -10 до +40 °С і вологості повітря не більше 95 %.

Перетворювачі частоти мають добрі технічні характеристики, до яких можна віднести плавні динамічні режими (пуск, гальмування та регулювання швидкості), високе значення ККД та експлуатаційні характеристики. Діапазон частот, в якому здійснюється регулювання сягає до 400 Гц, несуча частота до 15 кГц. Є можливість як ручного, так і автоматичного керування, по аналоговому або цифровому входу. Час динамічних режимів до 6000 с.

Важливою функцією є впровадження захистів:

- від миттєвого підвищення струму — до $3,75 I_{\text{ном}}$;
- від перевантаження по струму ($1,2 \dots 1,5$) $I_{\text{ном}}$ протягом 1 хв кожні 10 мін;
- від підвищеної напруги $1,3 U_{\text{ном}}$;
- від зниженої напруги $0,65 U_{\text{ном}}$;
- від втрати фази — електронна;
- від перегріву двигуна — електронна, програмована;
- від зупинки АД — електронна, програмована.

2.3.2. Режими управління електродвигуном

Залежно від характеру навантаження ПЧ забезпечує різні режими управління електродвигуном, реалізуючи ту або іншу залежність між швидкістю обертання електродвигуном і вихідною напругою.

Розрізняють наступні типи систем керування НПЧ: скалярне, векторне та пряме керування моментом.

Системи скалярного керування являються найбільш простими та дешевими. Вони характеризуються невеликим діапазоном регулювання швидкості (від 1:5 до 1:10), відносно низькою точністю та якістю регулювання.

Системи векторного керування можуть бути зі зворотнім зв'язком по швидкості або без нього. Вони являються найбільш швидкодіючими і якісними і забезпечують діапазон регулювання швидкості 1:1000 і більше. Їх недолік заключається у необхідності використання вбудованого у двигун або прибудованого датчика швидкості.

Скалярне керування є простішим варіантом реалізації частотно-регульованого електроприводу. За рахунок нескладної системи керування, тобто застосування простого контролера, відсутності датчиків на валу двигуна НПЧ зі скалярним керуванням користуються попитом і успішно конкурують з дорогими багатофункціональними перетворювачами.

При скалярному керуванні широтно-імпульсному перетворювачу задається частота і амплітуда вихідної напруги. Частота задається напряму з пульту керування, або з регулятора технологічного параметру. В цьому випадку використовується зворотній зв'язок по технологічному параметру, тобто по тиску витраті рідини, тощо. Необхідна амплітуда напруги є функцією частоти.

Типовим законом в системах скалярного керування є закон пропорційного керування ($u_1 / w_1 = const$), який для механізмів з вентиляторною характеристикою не являється оптимальним. При скалярному управлінні момент двигуна не регулюється, а визначається навантаженням, Точність підтримання швидкості невелика. У випадку застосування регулятора технологічного параметру,

система працює на такій швидкості, яка забезпечує заданий рівень технологічного параметру. При відсутності такого регулятора швидкість визначається поточним ковзанням, тобто навантаженням.

Закон пропорційного керування є найбільш розповсюдженим, але він не являється оптимальним, так як, по-перше, не забезпечує мінімуму енергоспоживання в усталеному режимі при мінімумах навантаження, а по-друге, при низьких частотах за рахунок падіння напруги на активних опорах статора перевантажувальна здатність двигуна знижується. Для механізмів з вентиляторним навантаженням застосовується також закон $u_1/\omega_1^2 = \text{const}$. В цьому випадку момент навантаження має ступеневу залежність від швидкості, тому немає необхідності підтримувати високу перевантажувальну здатність у всьому діапазоні частот, тобто з'являється можливість поліпшити енергетичні показники при зниженні швидкості.

Для створення високоякісних асинхронних приводів використовується векторне керування. На відміну від скалярного керування, в ньому використовується векторне представлення регулюємих величин, тобто в системі керування крім абсолютних значень струмів і потокозчеплень використовується їх кутове положення у вибраній системі координат. У більшості сучасних високоякісних асинхронних електроприводів використовується принцип орієнтації поля, при якому регулювання проходить в системі координат, що жорстко зв'язана з однією з векторних величин.

Існує також метод прямого керування моментом і потоком, або пряме керування моментом. В цьому методі, на відміну від векторного способу керування, потік і момент управляються безпосередньо, у той час як струми та напруги – опосередковано. Основна ідея цього методу заключається у відказі від звичайного широтно-імпульсного модулятора і виборі такого стану інвертора, який визиває зміну потоку та моменту у потрібний бік. В даному способі керування використовуються принципи релейного (гістерезисного) керування.

Незважаючи на суттєву різницю у принципах керування, що використовуються, більшість перетворювачів частоти мають єдині принципові рішення у побудові силової частини.

Застосування сучасних перетворювачів частоти дозволяє створити систему керування технологічним процесом. За допомогою цієї системи можливо контролювати основні параметри стану електроприводу конвеєру, проводити діагностування.

Саме таке використання системи «перетворювач напруги – асинхронний двигун- конвеєр» сприяє забезпеченню економічного ефекту, як від зниження втрат електричної енергії, так і від зменшення експлуатаційних витрат, збільшення тривалості служби обладнання.

2.3.3. Частотнорегульований асинхронний електропривод

За рахунок застосування енергозберігаючих заходів в нерегульованому електроприводі знижуються втрати в двигуні і живлячій лінії. Основна ж частка втрат пов'язана саме з технологічним процесом, із способами керування технологічними координатами.

Найбільш економічним способом енергозбереження, який включає сам технологічний процес є застосування регульованого електропривода. Цей спосіб дозволяє здійснювати подачу до робочого органу технологічної установки необхідної в кожний момент потужності при мінімальних втратах у всіх елементах силового каналу.

Технічно це реалізується приєднанням перетворювача електричної енергії (в нашому випадку – перетворювача частоти) між мережею та двигуном, що впливає на швидкість обертання двигуна, тобто - на потужність, що підводиться до навантаження, завдяки чому виключається необхідність використання інших енергоємних регулюючих засобів.

Ефект, зрозуміло, істотно залежить від конкретної реалізації підсистеми перетворювач—двигун, тобто від того, як організований регульований електропривод.

До середини 1980-х років в системах регулювання масово використовувалися електроприводи постійного струму. Але у них є досить суттєві недоліки: вартість машини та потреба в обслуговуванні. Тому цей вид регульованого електроприводу практично не використовувався для масових агрегатів.

У деяких агрегатах (крани, ліфти і ін.) використовувалися і використовуються багатошвидкісні асинхронні двигуни з обмотками статора на різне число полюсів і короткозамкнутим ротором, асинхронні двигуни з фазним ротором при реостатному регулюванні, в потужних агрегатах з невеликим діапазоном регулювання застосовувалися каскадні схеми електроприводу, проте більшість (до 95 %) електроприводів були нерегульованими, побудованими на основі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

В наш час, у зв'язку з розвитком електронної бази, доступні досконалі електронні ПЧ (перетворювачі частоти). Саме ці пристрої зумовили переворот в сучасному електроприводі — різко (до 15%) понизили частку інших регульованих електроприводів та доступним засобом для реалізації високоякісного регульованого АЕП в масових установках.

Також знижується застосування багато швидкісних асинхронних електродвигунів, через суттєві недоліки: вони дорогі, важкі, вимагають багато контактної апаратури, вартість приводу досягає, а іноді і більше вартості системи перетворювач частоти — серійний двигун. Стало непривабливим неекономічне реостатне регулювання.

Трифазний асинхронний електродвигун (АД) з короткозамкнутим ротором - наймасовіший тип електричної машини, чудово відпрацьований технологічно за більш ніж сторічний період розвитку. Частота обертання поля n_0 в двигуні визначається частотою напруги живлячої мережі f_1 .

$$n = n_0 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (2.12)$$

де p - число пар полюсів.

Відмінність частоти обертання ротора n від n_0 визначається ковзанням s :

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (2.13)$$

яке в нормальних двигунах не перевищує 0,02...0,04, тобто

$$n = n_0 - n_0 \cdot s = (0.96 - 0.98) \cdot n_0. \quad (2.14)$$

Єдиним раціональним способом плавно регулювати швидкість такого двигуна є зміна частоти прикладеної до його обмоток напруги. Інші способи - зміна числа пар полюсів або амплітуди напруги - припускають або використання спеціального важкого і дорогого двигуна, або пов'язані з істотним погіршенням енергетичних характеристик.

Перетворювачі частоти, які призначені для частотнорегульованих асинхронних електроприводів, різняться за типом зв'язку з живлячою мережею на перетворювачі частоти дволанкові та безпосередні. Дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ) мають проміжну ланку постійного або змінного струму (рисунки 2.5-2.7).

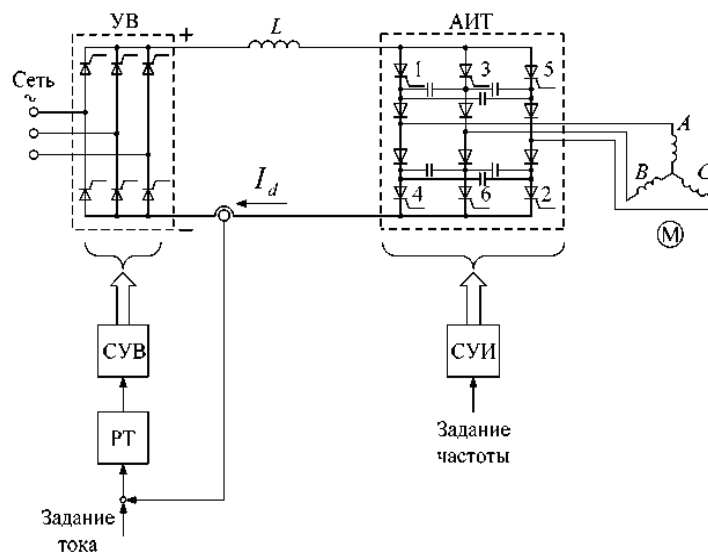


Рисунок 2.5 - ДПЧ з ланкою постійного струму і АИН

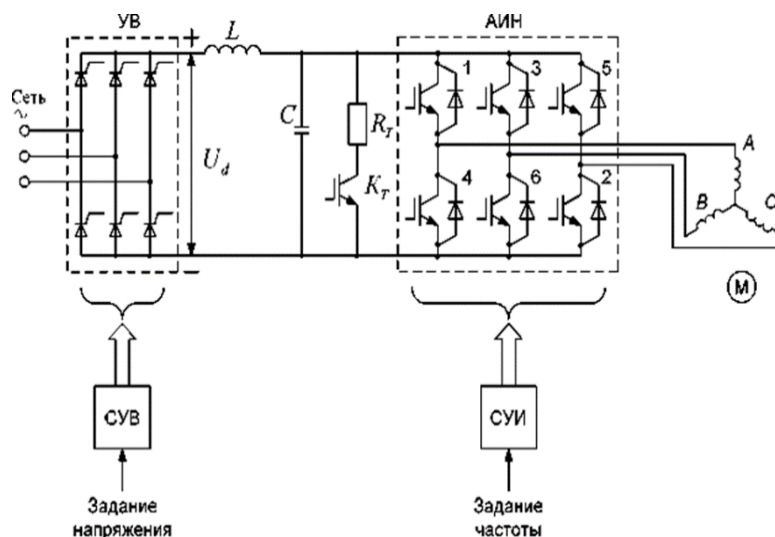


Рисунок 2.6 - ДПЧ з ланкою постійного струму і АІС

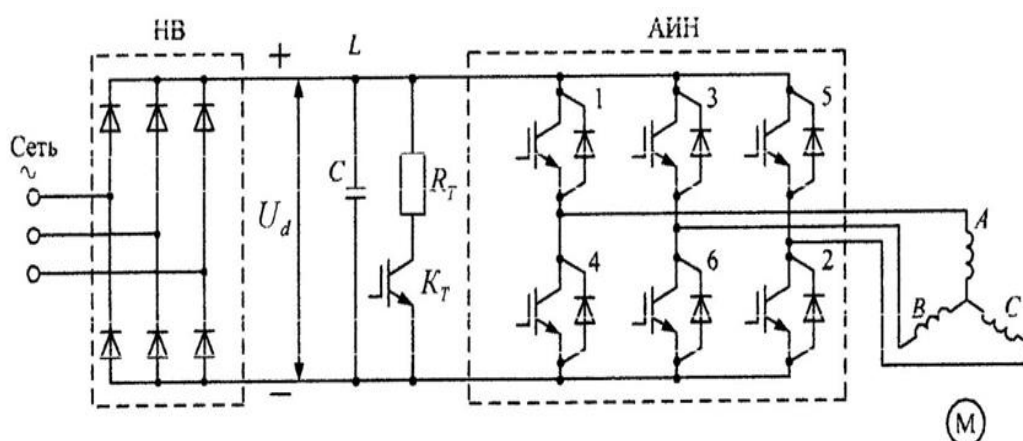


Рисунок 2.7 - Структура силової частини перетворювача частоти з ШІМ

В сучасних частотнорегулюючих асинхронних електроприводах широко застосовуються ДПЧ з проміжною ланкою постійного струму. Основними елементами таких перетворювачів є випрямляч, фільтр проміжної ланки постійного струму і автономний інвертор.

За типом інвертора, який представляє собою комутатор на напівпровідникових силових ключах, ДПЧ розрізняються на два класи: з застосуванням автономних інверторів напруги (АІН) та струму (АІС).

До складу перетворювача частоти входить: некерований випрямляч (НК), фільтр, що підключений у ланку постійного струму і АІН, виконаний на

повністю керованих напівпровідникових ключах. Для автономного інвертору використовується режим широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) вихідної напруги. У випадку необхідності в схему силових кіл крім головного вимикача, лінійних запобіжників, головного контактора вмикається фільтр електромагнітної сумісності, вхідний комутуючий реактор, синусоїдальний фільтр і вихідний реактор.

Перетворювач частоти з АІН не дозволяє забезпечувати двосторонній обмін енергією між мережею і двигуном, так як у ньому використовується некерований випрямляч. При генераторному гальмуванні енергія, яка віддається двигуном розсіюється в елементах інвертора і резисторі гальмівного пристрою, який підключається до шин постійного струму через керуючий напівпровідниковий ключ. В тих випадках, коли для здійснення режимів електропривода вигідний обмін між мережею та двигуном, доцільно застосовувати дволанкові перетворювачі частоти з АІН, які містять замість некерovanого випрямляча активний випрямляч напруги.

За допомогою активного випрямляча напруги забезпечується не тільки рекуперативне гальмування асинхронного двигуна, але й робота перетворювача частоти з заданим значенням коефіцієнта потужності, наприклад рівним одиниці.

В найближчий час в регулюючому асинхронному електроприводі можуть знайти застосування ПЧ з безпосереднім зв'язком на повністю керованих напівпровідникових приладах.

Застосування дволанкових ПЧ з активними випрямлячами і ПЧ з безпосереднім зв'язком на керованих напівпровідникових приладах дозволяє вирішувати на якісно більш високому рівні задачу енергозбереження в системі автоматизованого електропривода при виконанні їм основної своєї функції, яка полягає в управлінні рухом робочих органів технологічних машин і пристроїв.

2.4 Дослідження режимів роботи системи ПЧ – АД

Розберемо, як основні енергетичні характеристики впливають на енергетичну ефективність системи «перетворювач частоти-асинхронний двигун» в усталених і перехідних режимах.

До основних енергетичних характеристик відноситься, насамперед, коефіцієнт корисної дії (ККД). Для оцінки економічності перетворення енергії системою ПЧ – АД в усталених режимах електропривода використовується відношення між споживаною з мережі активною потужністю P і корисною потужністю на валу двигуна $P_{\text{мех}}$. Тоді:

$$\eta_{\text{ЕП}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P}, \quad (2.15)$$

$$\text{де} \quad \eta_{\text{ЕП}} = \eta_{\text{ПЧ}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}, \quad (2.16)$$

$\eta_{\text{ПЧ}}; \eta_{\text{ДВ}}$ - значення коефіцієнтів корисної дії перетворювача частоти та асинхронного двигуна.

Також, дуже важливою енергетичною характеристикою являється потужність втрат енергії. Цей показник розраховується для різних режимів роботи ЕП і одночасно використовується для вибору та перевірки двигуна за умовами нагріву.

Визначення електричних втрат в ПЧ аналітичними методами дуже ускладнено, через необхідність врахування дискретних та нелінійних властивостей. Тому при розрахунках приймають припущення, які дозволяють не враховувати другорядні складові. Нехтують комутаційними процесами в випрямлячі та інверторі, що дозволяє виконати опис процесів за безперервними складовими [3].

Розглянемо більш детально сумарні втрати енергії системі ПЧ – АД. В загальному випадку при перехідному процесі можемо записати:

$$\Delta W_{\text{п.п.}} = \int_0^{t_{\text{п.п.}}} \Delta p(t) dt, \quad (2.17)$$

де $\Delta p(t)$ – значення миттєвої потужності сумарних втрат в системі;

$t_{п.п}$ – тривалість перехідного процесу.

Загалом, втрати енергії в перехідних режимах (пуск двигуна, перехід від однієї швидкості обертання до іншої, гальмування) являються миттєвою потужністю сумарних втрат в елементах АД та ПЧ. Розглядаються електричні, механічні, магнітні та додаткові втрати.

Миттєва електрична потужність втрат енергії системи ПЧ – АД залежить не тільки від струмів обмоток статора і ротора, але і від активної потужності двигуна в динамічному режимі.

Таким чином, сумарні втрати енергії в перехідному процесі системи ПЧ – АД будуть надалі оцінюватися інтегральною характеристикою, яка має вигляд [3]:

$$\Delta W_{ЕЛ} = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta p_{ЕЛ}(t) dt, \quad (2.18)$$

де $\Delta p_{ЕЛ}(t)$ - миттєва потужність сумарних втрат системи ПЧ – АД.

Метою задачі оптимізації режимів частотнорегульованого асинхронного електропривода являється отримання екстремуму функції якості, що досліджується, за критерієм оптимальності. Таким критерієм якості, з точки зору надійності та енергетичних показників, являються втрати потужності. Тобто, доцільно розглядати мінімізацію втрат в електроприводі, в його окремих елементах: двигуні та перетворювачі частоти.

Розглянемо оптимізацію режиму керування в двигуні за мінімумом втрат. Це також надає можливість розширити допустимі за нагрівом моменти навантаження.

Також це дозволяє забезпечити надійну роботу двигуна, так як навіть несуттєве повторне перевищення температури обмотки статора над допустимою призводить до прискореного старіння ізоляції та зменшення терміну служби АД.

Оптимізація режимів електропривода за мінімумом втрат для системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» являє практичний інтерес при

розгляданні електропривода як споживача електроенергії. При цьому важливо знати в якому відношенні до умови мінімуму втрат в цій системі співвідносяться втрати в АД та ПЧ.

Рішення задачі оптимального управління, яке отримане без врахування насичення машини, може бути використане тільки для обмеженого діапазону зміни M і ω . У більш широкому діапазоні магнітне коло АД насичується. Тоді обов'язкове врахування насичення АД по головному магнітному шляху. Якісні і кількісні розходження екстремальних характеристик, які наведено на рисунку 2.8, підтверджують необхідність обліку насичення, якщо момент змінюється в широких межах [3].

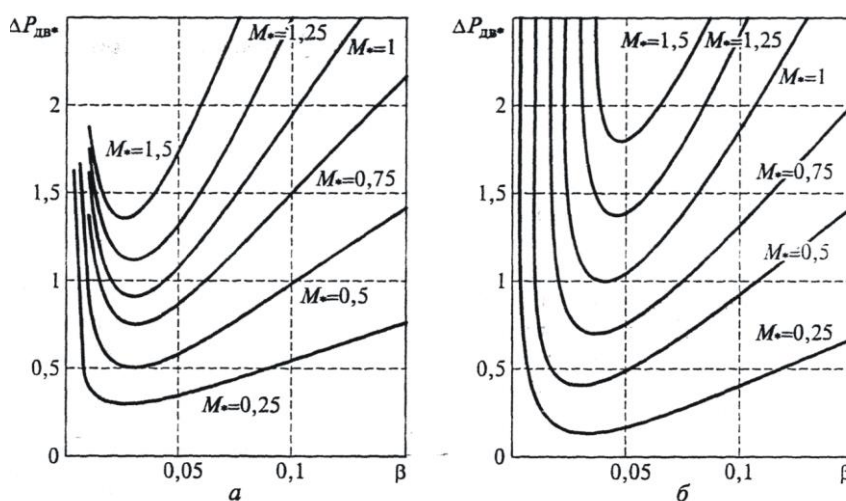


Рисунок 2.8 – Залежності $\Delta P_{дв*} = f(\beta)$ для відносного значення $\omega^* = 1$ і різних відносних значеннях моменту M^* без врахування насичення (а) і з врахуванням за головним магнітним шляхом (б)

Врахування насичення магнітного кола ускладнює рішення задачі оптимізації за мінімумом втрат АД. Аналітичне рішення задачі стає можливим за деяких умов та припущень.

Аналітичні методи порівняно прості, але використовуються лише при незначній зміні моменту навантаження асинхронного двигуна. При параметричній формі представлення закону оптимального управління складно

виконати порівняльну оцінку ефективності законів керування, якщо задані швидкість та момент двигуна. Тоді пошук екстремуму функції ведеться за чисельними алгоритмами.

Розглянемо оптимальне керування за мінімумом $\Delta P_{\text{дв}}$. На рисунку 2.9 наведено характеристики АД типу 4A132M6, коли змінюються значення відносної кутової швидкості.

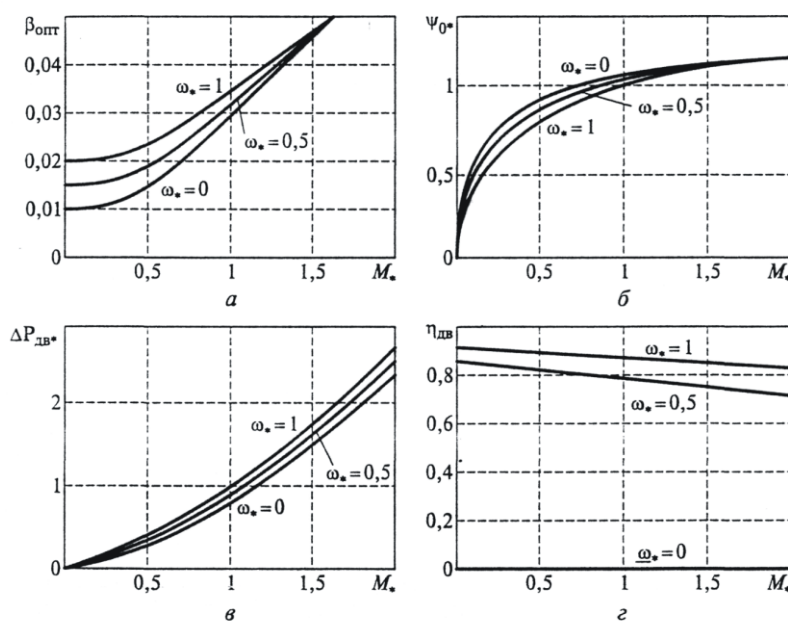


Рисунок 2.9 - Характеристики АД типу 4A132M6 при оптимальному керуванні за мінімумом $\Delta P_{\text{дв}}$ при різних значеннях відносної кутової швидкості ω_* : а – абсолютне ковзання; б – головне потокозчеплення; в – сумарні втрати; г – коефіцієнт корисної дії

При значеннях швидкості $\omega_* > 0,1$ залежність абсолютного ковзання від моменту носить нелінійний характер (рис. 2.9, а). Слід відзначити, що при збільшенні швидкості наростає нелінійність діапазону зміни моменту.

Характерно, що на характеристику намагнічування у нелінійній області більше впливає момент навантаження, ніж швидкість двигуна. Для отримання мінімальних втрат потрібно форсування магнітного потоку відносно його

номінального значення. Це може бути досягнуто за рахунок збільшення напруги статорної обмотки.

Важливим являється питання оптимізації режимів роботи системи ПЧ-АД за мінімумом сумарних втрат $\Delta P_{\text{еп}}$ в електроприводі. Досліджується залежність характеристик перетворювача частоти та потужність втрат у перетворювачі від режимів роботи двигуна. Електричні втрати в перетворювачі частоти залежать від струму статора i_1 та активної потужності двигуна P_1 . Цю залежність можливо представити у вигляді виразів (2-19;2-20) [3]:

$$i_{1*}(M_*, \beta) = \left[\frac{\varepsilon_1(\beta)}{\varepsilon_{1\text{ном}}} \cdot \frac{\beta_{\text{ном}}}{\beta} \cdot M_* \right]^{1/2}; \quad (2.19)$$

$$P_{1*}(M_*, \omega_*, \beta) = \left[\frac{\beta_{\text{ном}}}{\beta} \cdot \omega_* + k'_c \cdot \frac{\varepsilon_1(\beta)}{\varepsilon_{1\text{ном}}} + k'_p \cdot \frac{\varepsilon_2(\beta)}{\varepsilon_{2\text{ном}}} + k'_\delta \cdot \frac{\delta_0(\beta_*)}{\delta_{0\text{ном}}} \cdot \omega_{1*} + k'_\delta \cdot \frac{\delta_0^2(\beta_*)}{\delta_{0\text{ном}}^2} \cdot \omega_{1*}^2 \right] \times \frac{\beta_{\text{ном}}}{\beta} \cdot M_* \quad (2.20)$$

Аналіз варіантів оптимального керування ЧР АД та його кількісні оцінки, що отримані для різних законів оптимального керування, дозволяють здійснити вибір та застосувати необхідний закон керування залежно від параметрів та режимів роботи АД.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРУ

3.1 Вибір обладнання силової частини конвеєрної установки

Як правило, технологічні процеси, що обслуговують конвеєри, визначають рівномірний (в одному напрямку) рух вантажа, швидкість якого постійна, або повинна змінюватись в незначних межах. Тому режим роботи приводних електродвигунів конвеєрів – тривалий, з рідкими пусками та зупинками. У разі необхідності застосовується неглибоке регулювання швидкості.

Електричний привод конвеєрних ліній повинен витримувати значне перевантаження, особливо у важких умовах пуску. Тому таке важливе значення приділяється плавному пуску та гальмуванню з вантажем на конвеєрній стрічці, або без нього.

У якості конвеєру в роботі приймається стрічковий конвеєр, який встановлено для переміщення руди на гірничо-збагачувальному виробництві. Технічна характеристика конвеєру:

- продуктивність, т/год – 400;
- приймальна здатність, м³/хв – 6,5;
- довжина, м - 200 ;
- ширина стрічки, мм – 800;
- швидкість стрічки, м/с – 1,6.

Визначимо значення номінального погонного навантаження [44]:

$$q_s = \frac{Q}{3,67 \cdot V} = \frac{400}{3,6 \cdot 1,6} = 69,44 \text{ кг/м.} \quad (3.1)$$

3.1.1. Розрахунок та вибір двигуна конвеєра

Визначення потужності електропривода конвеєра виконується шляхом розрахунку та побудови діаграми тягових зусиль з врахуванням втрат в кожному елементі по всій трасі конвеєра.

Але для орієнтовного визначення потужності двигуна запропонована спрощена формула [42]:

$$P = \frac{Q}{367 \cdot \eta_n} (c \cdot L + H) \cdot k_z = \frac{400}{367 \cdot 0,75} (0,15 \cdot 200 + 0) \cdot 1,2 = 52,3 \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

де P – потужність, кВт;

Q – продуктивність конвеєра, т/год;

H – висота підйому вантажа, м;

c – розрахунковий коефіцієнт, що залежить від продуктивності конвеєра та його довжини; вибирається відповідно до таблиці 3.1 [42]:

Таблиця 3.1 - Значення коефіцієнту c

L, м	Q, т/год			
	10	50	200	400
10	2	0,92	0,50	0,37
50	0,66	0,35	0,22	0,18
200	0,35	0,21	0,14	0,12

L – довжина конвеєра між барабанами;

η_n – ККД передаточного механізму (0,75-0,8);

k_z – коефіцієнт запасу (1,1-1,25).

В якості електродвигуна конвеєрної установки вибираємо асинхронний двигун АІР225М4У3 потужністю 55 кВт з частотою обертання 1500 об/хв.

Технічні характеристики даного двигуна наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Технічні дані двигуна AIR225M4Y3

Параметр	Позначення	Значення
1	2	3
Потужність	$P_{\text{ном}}$, кВт	55
Частота обертання умовна (фактична)	$n_{\text{ном}}$, об./хв.	1500 (1480)
Напруга (Δ/Y)	$U_{\text{Iном}}$, В	380/660
ККД	$\eta_{\text{ном}}$, %	93
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi_{\text{ном}}$	0,87
Співвідношення крутних моментів	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	2.3
Співвідношення крутних моментів	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	2.2
Співвідношення струмів	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$	7,2
Момент інерції	J	0,35 кг·м ²
Рівень шуму	L	83 дБ(А)

Пуск електродвигуна під навантаженням можливий при співвідношенні крутних моментів: $M_{\text{пуск}} > M_{\text{ст}}$

Так як для вибраного двигуна:

$$\frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = 2,2;$$

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{P_{\text{ед}}}{n_{\text{ед}}} = 9550 \cdot \frac{55}{1480} = 354,9 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{пуск}} = 2,2 \cdot M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 354,9 = 780,8 \text{ Нм};$$

3.1.2. Розрахунок та вибір перетворювача частоти.

Першочерговим завданням при підборі ПЧ є правильна класифікація виконавчого механізму. Перетворювачі залежно від місця використання відрізнятимуться потужністю і набором функцій технологічних завдань, що забезпечують рішення.

При виборі перетворювача по потужності слід враховувати наступні моменти:

- паспортна потужність двигуна повинна бути меншою за паспортну потужність перетворювача частоти або дорівнювати їй;
- робочий номінальний струм ПЧ завжди має бути більше номінального струму, споживаному електродвигуном, інакше привід блокуватиметься за помилкою «перевищення струму».

Робота ПЧ з одним двигуном. Для розрахунку буде потрібно наступні величини:

P_n – значення номінальної потужності двигуна (кВт);

J - момент інерції навантаження, що приведений до валу двигуна ($\text{Н}\cdot\text{м}^2$). У випадку, коли вал двигуна не з'єднаний з інерційними механізмами чи двигун працює в режимі неробочого ходу, приведений момент інерції приймається рівним моменту інерції ротора;

n – значення частоти обертання ротора, до якої потрібно розганяти двигун за час t ;

t - час (с) протягом якого потрібно розганяти двигун до значення частоти обертання n ;

U_n – напруга (В) на обмотках двигуна при номінальних оборотах;

k – значення коефіцієнту спотворення струму на виході ПЧ.

$k = 0,95 - 1,05$.

η – значення коефіцієнту корисної дії двигуна;

$\cos\phi$ - береться із специфікації на двигун, приблизно рівний 0,8- 0,85.

Розрахунок номінального моменту на валу двигуна:

$$M_{\text{ном}} = \frac{9554 P_{\text{ном}}}{n}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.3)$$

Розрахунок динамічного моменту на валу двигуна:

$$M_d = \frac{J \cdot n}{9,55t}, \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (3.4)$$

Розрахунок пускової потужності двигуна:

$$P_p = \frac{kn}{9550\eta \cos \varphi} (M_{\text{ном}} + M_d), \text{ кВт} \quad (3.5)$$

На підставі цієї величини вибирається робоча потужність ПЧ, яка повинна відповідати умові:

$$P_{\text{пч}} = P_p / 1,5 \text{ кВт}. \quad (3.6)$$

Струм, що споживається електродвигуном при лінійному розгоні I_d :

$$I_d = \frac{kn}{9,55\eta \cos \varphi U_{\text{ном}} \sqrt{3}} (M_{\text{ном}} + M_d) \text{ А}. \quad (3.7)$$

Це значення повинно бути меншим за пусковий струм перетворювача частоти.

Слід звернути увагу, що ПЧ серії Altivar володіють перевантажувальною здатністю по перехідному моменту: для Altivar 61 – (110 – 130) % номінального моменту двигуна протягом 60 с.

Визначимо повну потужність, що споживається двигуном в сталому номінальному режимі:

$$P_s = \frac{kP_{\text{ном}}}{\eta \cos \varphi}, \text{ кВт}. \quad (3.8)$$

Враховуючи наведені вище рекомендації вибираємо перетворювач частоти Altivar 61. Каталожні данні двигуна приймаємо по таблиці 3.2.

$$M_{\text{ном}} = \frac{9554 \cdot 55}{1480} = 354,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$M_d = \frac{0,2 \cdot 1480}{9,55 \cdot 5} = 6,199 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

$$P_p = \frac{1,05 \cdot 1480}{9550 \cdot 0,93 \cdot 0,87} \cdot (354,9 + 6,199) = 72,623 \text{ кВт.}$$

$$P_{пч} = \frac{72,623}{1,5} = 48,415 \text{ кВт.}$$

$$I_d = \frac{1,05 \cdot 1480}{9,55 \cdot 0,93 \cdot 0,87 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} \cdot (354,9 + 6,199) = 110,469 \text{ А.}$$

Приймаємо перетворювач частоти серії Altivar 61 тип ATV 61 HD55 N4.
На рис.3.1 представлено типова схема підключення перетворювача частоти [43]:

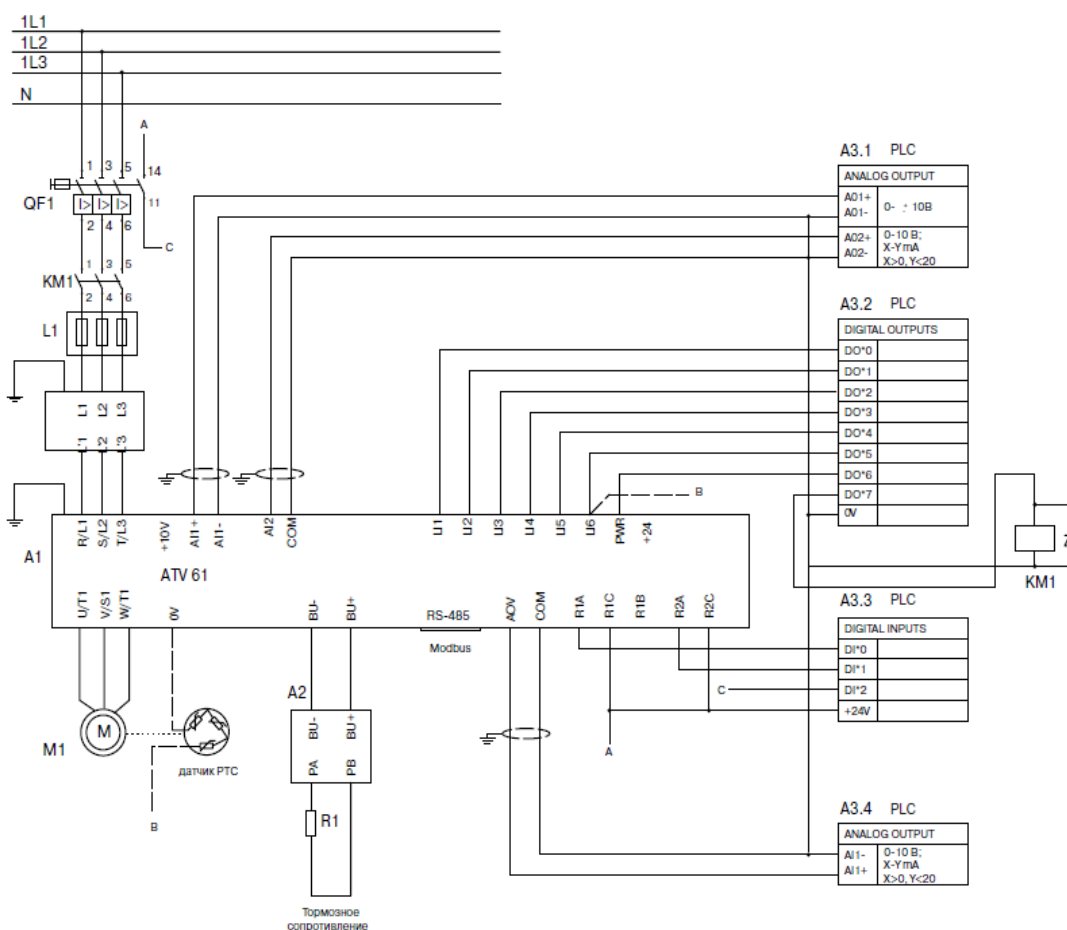


Рисунок 3.1 – Типова схема підключення перетворювача частоти: 1 – мережевий дросель; 2 – пасивний фільтр; 3 – фільтр електромагнітної сумісності; 4 – дросель постійного струму.

3.2 Математичне представлення електромеханічної частини стрічкового конвеєра

Створено вже багато моделей, які описують електромеханічну частину системи, з врахуванням більш точного математичного опису або введення спрощення в розрахунках. Тому підходити до вибору або побудови такої моделі доцільно з точки зору завдань, які вона буде виконувати, враховуючи те, що буде досліджуватися на цій моделі.

Насамперед, стоїть завдання досягнути підвищення ефективності функціонування, за рахунок енергозбереження в системі регульованого електроприводу стрічкового конвеєру та зменшення динамічних навантажень. Для вирішення першої частини завдання потрібно розглянути статичні та енергетичні характеристики електромеханічної системи стрічкового конвеєру. На динамічні навантаження в тяговому органі впливають низькочастотні механічні коливання мас, що переміщуються по конвеєру і можна знехтувати високочастотними електромагнітними коливаннями в системі. З врахуванням цих припущень, можна спростити вимоги до математичної моделі.

Якщо в загальному випадку система НПЧ-АД представляється динамічною ланкою вищого порядку, то для нашого випадку можемо, спрощено, прийняти другий порядок динамічної ланки з електромагнітною та електромеханічною постійними часу. Таке зниження порядку динамічної ланки є правомірним та помилка розрахунків не перевищує допустиму [40].

Така модель підходить і до скалярного, і до векторного закону частотного керування, різниця заключається лише в точності регулювання швидкості, що несуттєво впливає на енергетичні характеристики та демпферні властивості системи.

Потрібно, щоб вихідні частоти ПЧ змінювалися від 0 до номінальної частоти, забезпечуючи стабілізацію результуючого вектору потокозчеплення

ротора. У цьому випадку ЧРЕ має такі ж механічні характеристики, як і ЕП постійного струму з незалежним підключенням обмотки збудження. Такі механічні характеристики мають велику переважувальну здатність і відзначаються високим ступенем лінійності в робочій зоні.

Спостерігається залежність синхронної швидкості від значення напруги холостого ходу обмотки статора. Тоді рівняння механічної характеристики для лінійної частини гілки МХ ЧРЕП запишеться наступним чином:

$$M = \kappa_m \cdot (U_{01} - \kappa_\omega \cdot \omega_1), \text{ Нм},$$

де ω_1 - кутова швидкість ротора.

Для статорної обмотки двигуна напруга неробочого ходу:

$$U_{01} = I_\mu \cdot (x_0 + x_1) \cdot \nu \quad \text{В},$$

де I_μ - струм неробочого ходу, А;

x_0 - індуктивний опір намагнічуючого контуру двигуна, Ом;

x_1 - індуктивний опір статорної обмотки, Ом;

$\nu = f / f_{\text{ном}}; f_{\text{ном}}$ - відносна та номінальна частота статора.

Для режиму неробочого ходу при $M = 0$, будемо мати $U_{01} = \kappa_\omega \cdot \omega_{1\text{ном}}$, тоді:

$$\kappa_\omega = \frac{U_{01}}{\omega_{1\text{ном}}} = \frac{I_\mu \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1\text{ном}}},$$

де $\omega_{1\text{ном}}$ - синхронна номінальна кутова швидкість двигуна для номінальної частоти статора, с^{-1} .

$$\omega_{1\text{ном}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{ном}}}{60}, \text{ с}^{-1}$$

Номінальний момент АД:

$$M_{\text{ном}} = \kappa_M \cdot (U_{01} - \kappa_\omega \cdot \omega_{\text{ном}}) = \kappa_M \cdot \kappa_\omega \cdot \Delta\omega_{\text{ном}}, \text{ Нм},$$

де $\omega_{\text{ном}}$ - кутова номінальна швидкість ротора двигуна для номінального моменту, с^{-1} ;

$\Delta\omega_{\text{ном}} = \omega_{1\text{ном}} - \omega_{\text{ном}}$ - зміна номінальної кутової швидкості, с^{-1} .

Визначаємо значення:

$$\kappa_M = \frac{M_{\text{ном}}}{\kappa_\omega \cdot \Delta\omega_{\text{ном}}} = \frac{M_{\text{ном}}}{s_{\text{ном}} \cdot I_\mu \cdot (x_0 + x_1)},$$

де $s_{\text{ном}} = \frac{\omega_{1\text{ном}} - \omega_{\text{ном}}}{\omega_{1\text{ном}}}$ - номінальне ковзання АД.

Значення електромеханічної сталої часу системи визначається за формулою:

$$T_M = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \Delta\omega_{\text{ном}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{J_\Sigma}{k_\mu \cdot k_\omega}, \text{ с}$$

Значення електромагнітної постійної часу системи визначається за формулою:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e}, \text{ с.}$$

При цьому, індуктивність L_e і активний опір R_e потрібно привести до ланцюга постійного струму ПЧ.

Еквівалентний активний опір:

$$R_e = r_d + \frac{3}{2} \cdot k_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r^2} \right),$$

де r_d - активний опір дроселя в колі постійного струму ПЧ, Ом;

$\kappa_i = 2 \cdot \sqrt{3} / \pi$ - коефіцієнт передачі по струму автономного інвертора;

r_1 - активний опір статорної обмотки, Ом;

r_2' - активний опір роторної обмотки, що приведений до статорної обмотки, Ом;

$L_\mu = x_0 / 314$ - індуктивність намагнічуючого контуру двигуна, Гн;

$L_r = L_\mu + L_2'$ - повна індуктивність роторної обмотки, Гн;

$L_2' = x_2' / 314$ - індуктивність розсіювання роторної обмотки;

x_2' - індуктивність роторної обмотки, що приведена до статорної обмотки, Гн.

Еквівалентна індуктивність :

$$L_e = L_d + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r} \right),$$

де L_d - індуктивність кола постійного струму ПЧ, Гн;

$L_s = L_\mu + L_1$ - повна індуктивність статорної обмотки, Гн;

$L_1 = x_1 / 314$ - індуктивність розсіювання статорної обмотки, Гн.

Після цього необхідно визначити залежність напруги неробочого ходу статорної обмотки від сигналу керування. У нашому випадку приймаємо пропорційну залежність:

$$U_{01} = \kappa_{пч} \cdot U_y, \text{ В},$$

де $\kappa_{пч} = \frac{U_{01}}{U_{y.ном}} = \frac{I_\mu \cdot (x_0 + x_1)}{U_{y.ном}}$ - статичний коефіцієнт передачі ПЧ;

$U_{y.ном}$ - номінальна напруга керування ПЧ, в розрахунках приймається

$$U_{y.ном} = 10 \text{ В}.$$

Данні, що використовувалися в розрахунках та основні розрахункові параметри двигуна зведено до таблиць 3.3 та 3.4.

Таблиця 3.3 - Вихідні данні для розрахунків асинхронного двигуна з КЗ ротором

№ п/п	Величини	Позначення	Розмірність	Значення
1	Номінальна потужність, що віддається	$P_{ном}$	κBt	55
2	Номінальна фазна напруга	$U_{1ном}$	B	380
3	Номінальний струм статора	$I_{1ном}$	A	58.268
4	Активна складова струму н.х.	I_{0a}	A	0.764
5	Реактивна складова струму н.х.	$I_{0p} \approx I_{\mu}$	A	13.337
6	Механічні втрати потужності	$P_{мех}$	κBt	948.722
7	Повні втрати в сталі	$P_{ст}$	κBt	883.135
8	Активний опір фази обмотки статора	r_1	Ωm	0.175
9	Індуктивний опір фази обмотки статора	x_1	Ωm	1.2
10	Приведений активний опір фази обмотки ротора	r'_2	Ωm	0.103
11	Приведений індуктивний фазний опір роторної обмотки	x'_2	Ωm	0.752

Таблиця 3.4 - Основні розрахункові параметри

Типорозмір	$\omega_{1ном},$ с ⁻¹	$\omega_{ном},$ с ⁻¹	$\Delta\omega,$ с ⁻¹	$S_{ном}$	$L_{\mu},$ Гн	$L_{\Gamma},$ Гн	$L_2',$ Гн	$L_1,$ Гн	$L_s,$ Гн
4A225M4У3	157	154,9	2,093	0,013	0,046	0,049	0,002	0,001	0,047

Оскільки значення електромагнітної інерційності системи керування перетворювачем частоти дуже мале ($T_{nc} = 0,005$), їм можна знехтувати.

Для механічної ланки додаємо рівняння руху електроприводу, для пускових режимів при реактивному моменті статичного опору:

$$M = M_c + M_d, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де M_d - динамічний момент, Н·м.

По приведеним вище формулам будемо структурну схему електромеханічної системи конвеєру з частотно-регульованим електроприводом.

Коефіцієнти структурної моделі наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 - Параметри структурної моделі

k_ω	$k_{пч}$	k_m	$T_{пч}, \text{с}$	$T_e, \text{с}$	$J_\Sigma, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
1,319	20,7	128,567	0,005	0,107	0,35

На підставі отриманих залежностей маємо математичний опис одно масової з електроприводом по схемі «перетворювач частоти - асинхронний двигун» у вигляді структурної схеми, яку наведено на рис. 3.2.

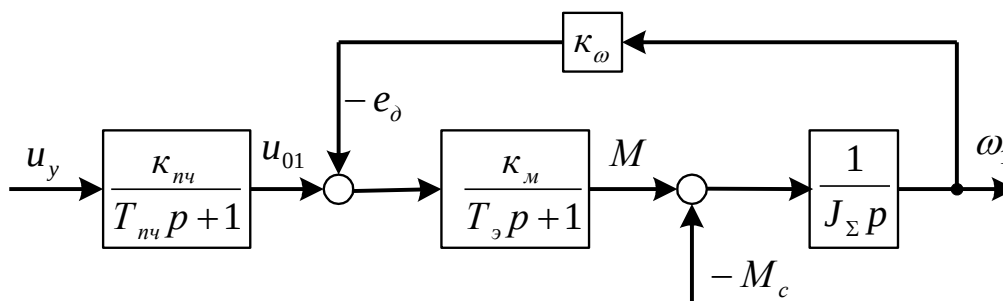


Рисунок 3.2- Структурна схема системи ЧРЕП.

4 КОМП'ЮТЕРНІ ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЄРНОЇ УСТАНОВКИ

Для проведення дослідження задачі регулювання швидкості обертання двигуна в залежності від величини вантажопотоку приймається до використання пакет прикладних програм MatLab додаток Simulink. Цей пакет являється універсальним середовищем з точки зору моделювання технічних систем. Він дозволяє створювати різні моделі: фізичні, математичні, структурні.

4.1 Комп'ютерна імітаційна модель асинхронного двигуна та перетворювача частоти

Цифрове моделювання перехідних процесів та усталених режимів дозволяє оцінити енергетичні показники асинхронного двигуна. Більш детально в роботі розглянуто моделювання асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

4.1.1. Математична модель узагальненої АМ

Для складання рівнянь рівноваги ЕРС в обмотках ротора та статора, що описують узагальнену асинхронну машину, скористаємося другим законом Кірхгофа.

Для статора:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}, \\ u_B &= R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_C &= R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Для ротора:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Рівняння потокозчеплення обмоток зі струмами в обмотках, запишемо відповідно до закону Ампера.

Для статора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_A &= L_{AA} i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c, \\ \psi_B &= L_{BA} i_A + L_{BB} i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c, \\ \psi_C &= L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_{CC} i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Для ротора:

$$\left. \begin{aligned} \psi_a &= L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c, \\ \psi_b &= L_{bA} i_A + L_{bB} i_B + L_{bC} i_C + L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c, \\ \psi_c &= L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_{cC} i_C + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

де $L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}$, - власні індуктивності обмоток;

всі інші - взаємоіндуктивності між обмотками.

Скористаємося також другим законом Ньютона, який описує рівновагу моментів на валу машини:

$$J \frac{d\vec{\omega}_m}{dt} = \vec{M} - \vec{M}_c, \quad (4.5)$$

де J (кг·м²) – значення моменту інерції на валу машини, який дорівнює доданку інерційності машини та інерційності робочого механізму і редуктора, що приведені до валу двигуна;

ω - значення кутової швидкості ротору двигуна;

$\vec{M}_c$ (Н·м) – значення моменту робочого механізму, що приведений до валу ротора двигуна.

Також використовується закон Ленцу, або правило лівої руки:

$$\vec{M} = k(\vec{\psi} \times \dot{i}). \quad (4.6)$$

Тоді рівняння узагальненої машини можна записати наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u}_S &= R_S \dot{i}_S + \frac{d\vec{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \vec{\psi}_S, \\ \vec{u}_R &= R_R \dot{i}_R + \frac{d\vec{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \vec{\psi}_R, \\ \vec{\psi}_S &= L_S \dot{i}_S + L_m \dot{i}_R, \\ \vec{\psi}_R &= L_m \dot{i}_S + L_R \dot{i}_R, \\ M &= \frac{3}{2} p \cdot k \cdot \text{Mod}(\vec{\psi}_i \times \dot{i}_k), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_c. \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

Для дослідження режимів роботи конвеєрної установки на основі частотно-регульованого асинхронного електроприводу шляхом використання методу комп'ютерного імітаційного моделювання, необхідно розробити математичні моделі елементів структурної схеми а також провести синтез САК швидкістю руху конвеєрної установки.

Комп'ютерну модель виконавчого пристрою САК можна умовно поділити на два блоки: імітаційна модель перетворювача частоти та імітаційна модель асинхронного двигуна. Узагальнена структурна схема частотно-регульованого асинхронного електроприводу зображена на рис. 4.1.

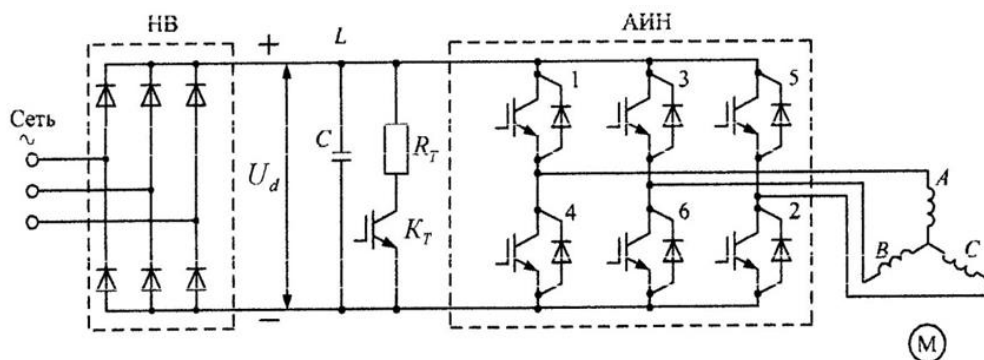


Рисунок 4.1 - Узагальнена структурна схема частотно-регульованого асинхронного електропривода

В залежності від алгоритму керування швидкістю обертання валу асинхронного двигуна (скалярне або векторне керування) будуть відрізнятися і моделі асинхронного частотного електроприводу.

Слід зазначити, що побудова детальної імітаційної моделі частотно-регульованого асинхронного електроприводу є досить складною інженерною задачею. Це пов'язано із високим ступенем складності математичного опису процесів, що відбуваються в частотному перетворювачі за рахунок наявності в ньому великої кількості нелінійних елементів. Також досить складною науково-технічною задачею є побудова математичної моделі асинхронного двигуна, динаміка процесів в якому описується системою диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Для дослідження режимів роботи скалярного та векторного частотно-регульованого асинхронного електроприводу в середовищі Matlab/Simulink найдоцільніше скористатись блоками «Six-Step VSI Induction Motor Drive» (скалярне керування) та «Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive» (векторне керування) із бібліотеки SimPowerSystems. Основу зазначених блоків складають детальна математична модель трифазного перетворювача частоти та модель асинхронного двигуна, складена на основі вищезгаданих диференціальних рівнянь Парка-Горєва.

Зовнішній вигляд зазначених блоків наведено на рис. 4.2.

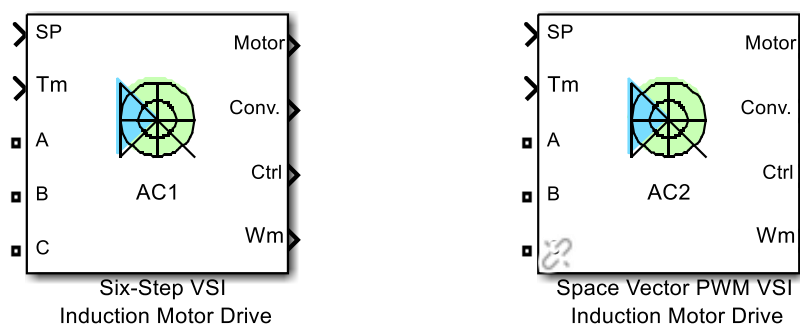


Рисунок 4.2 - Зовнішній вигляд блоків «Six-Step VSI Induction Motor Drive» та «Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive»

Узагальнена структурна схема силової частини блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» зображена на рис. 4.3.

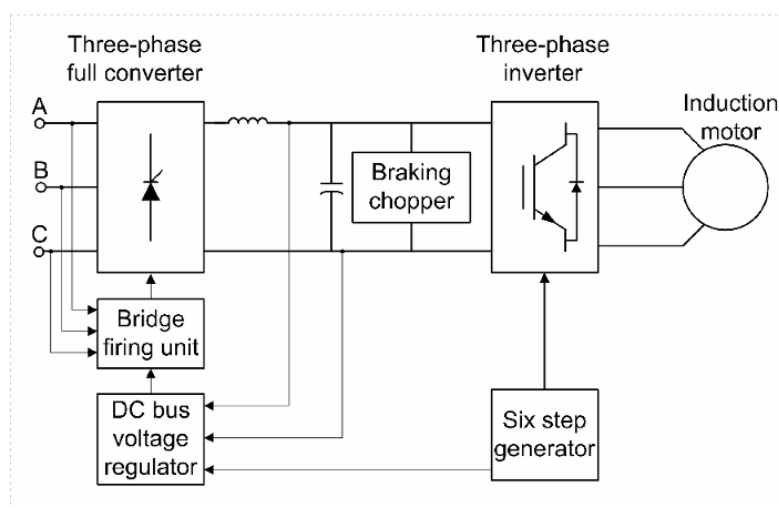


Рисунок 4.3 - Узагальнена структурна схема силової частини блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»

Схема силової частини блоку складається з:

- Three - phase full converter– трифазний мостовий керований випрямляч (KB);

- DC bus voltage regulator – систему керування (КВ), до якої входить регулятор постійної напруги живлення інвертора;
- Braking chopper – ланцюг скиду енергії гальмування виконавчої асинхронної машини;
- Three - phase inverter – трифазний інвертор ;
- Bridge firing unit– блок генерування імпульсів керування КВ;
- Induction motor - АД з КЗ ротором ;
- Six step generator – система управління інвертором.

Налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive» відбувається у діалогових вікнах, зовнішній вигляд яких зображено на рис. 4.4.

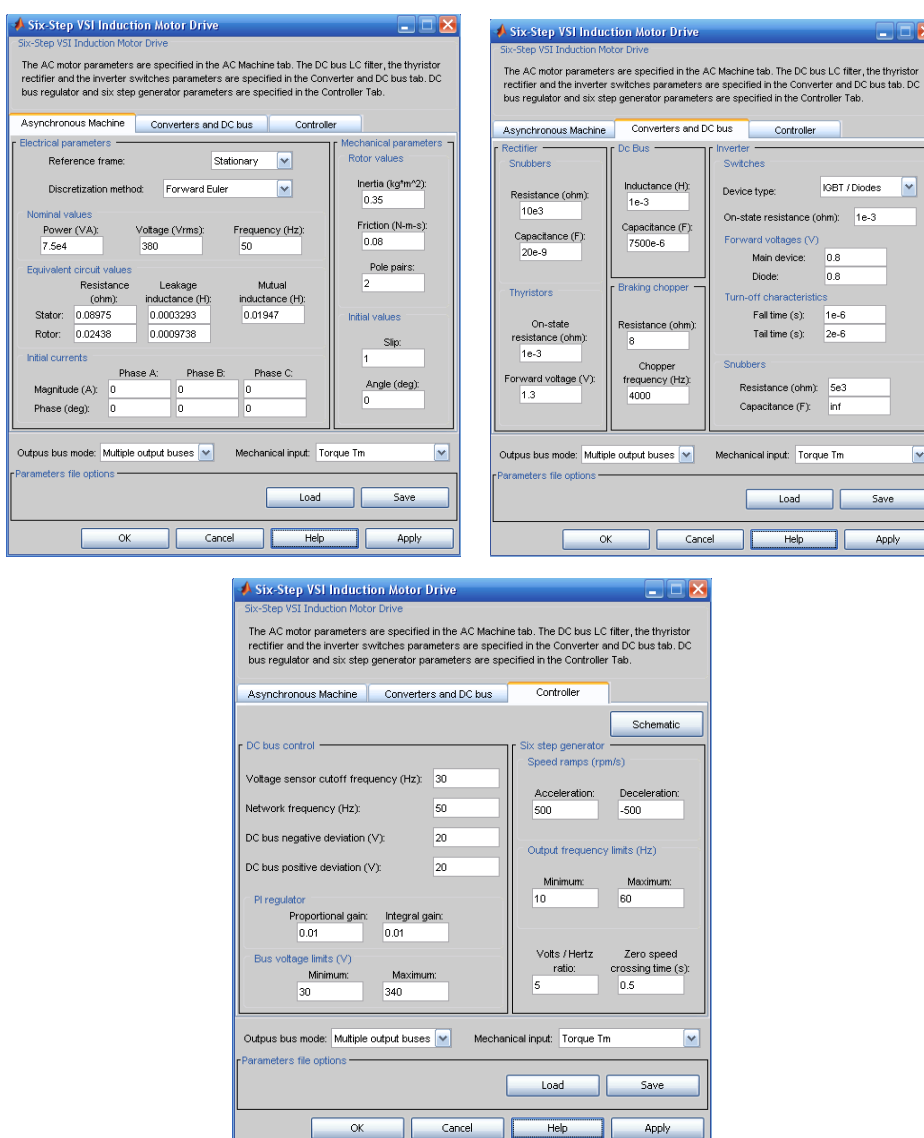


Рисунок 4.4 - Діалогові вікна налаштування параметрів блоку «Six-Step VSI Induction Motor Drive»

Узагальнена принципова схема та діалогові вікна налаштування параметрів блоку векторного керування «Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive» є аналогічними описаним вище. Більш детально роботу з даними блоками описано у відповідній літературі [39].

В якості електродвигуна використовується асинхронний двигун потужністю 55 кВт з частотою обертання 1480 об./хв. Технічні характеристики даного двигуна наведено в розділі 3.

Параметри комп'ютерної моделі даного асинхронного двигуна розраховані із використанням функції Matlab «power_Asynchronous Machine Params». Дана функція має зручний графічний інтерфейс і дозволяє розраховувати параметри моделі асинхронного двигуна за його паспортними даними.

Модель блоку «АЧП» зображена на рис. 4.5.

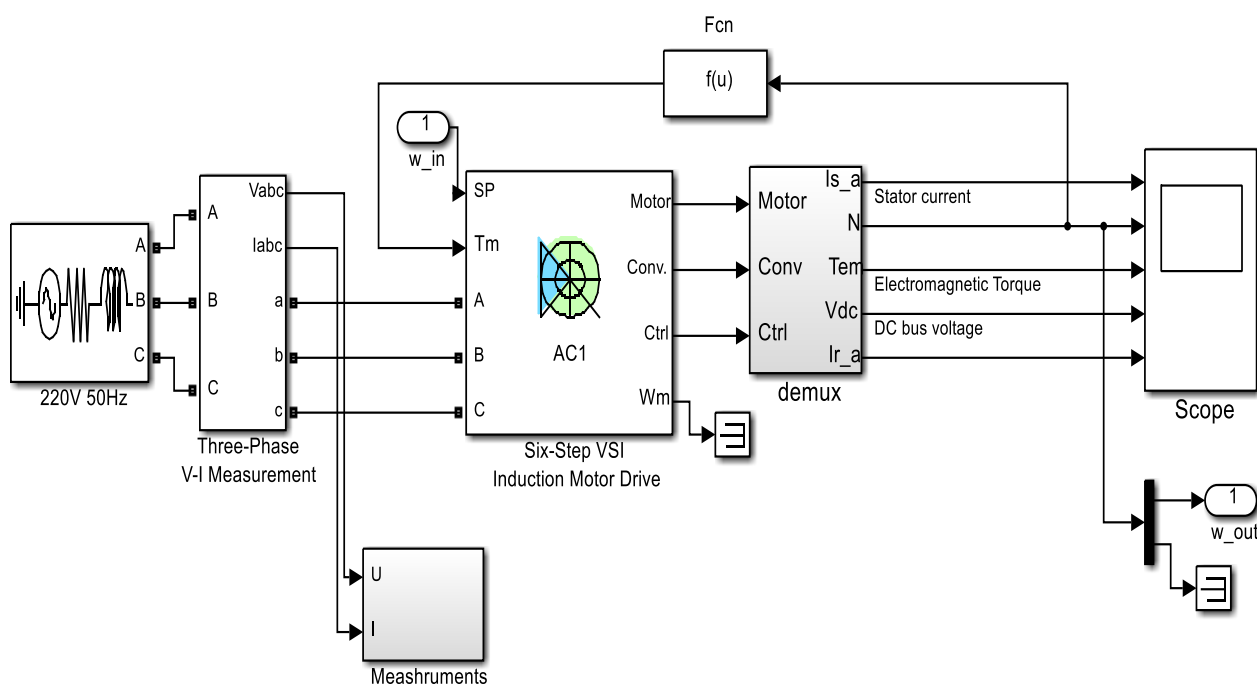


Рисунок 4.5 - Модель блоку «АЧП»

Детальну інформацію щодо призначення окремих блоків в моделі, а також щодо принципів функціонування даної моделі наведено в літературі [39].

4.2 Моделювання пускових та усталених режимів

Принциповою особливістю прямого пуску АД з короткозамкнутим ротором є виникнення великих електромагнітних моментів і струмів. Великі кидки електромагнітних моментів можуть викликати небезпечні динамічні навантаження на обмотки електродвигунів і механічні напруги в елементах кінематичного ланцюга електропривода. Формування плавних перехідних процесів при пуску й гальмуванні забезпечує виключення великих динамічних навантажень, що збільшує термін служби електродвигунів і елементів механічного устаткування. Крім того, при великій потужності електропривода завдяки плавному пуску виключається вплив пікових електричних навантажень на живлячу мережу, що сприятливо позначається на інших споживачах електричної енергії.

На рис. 4.8 наведено модель Simulink для дослідження прямого пуску асинхронного електропривода, потужність двигуна $P_{ном} = 55$ кВт, параметри наведено вище.

На рис. 4.9 та 4.10 наведені залежності миттєвих значень струму статора $i_{1*}(t)$ та ротора при прямому пуску АД $P_{ном} = 55$ кВт. З рисунків видно, що перехідний процес носить коливальний характер. Значення першого ударного струму статора становить $5,5I_{1ном}$. При розгоні двигуна коливання моменту й струму загасають, а кутова швидкість ротора ω_* (рис.4.11) наближається до сталого значення.

На рис. 4.12 наведено динамічну механічну характеристику при прямому пуску АКЗ $P_{ном}=55$ кВт.

На рисунках 4.13-4.15 наведено графіки електромагнітного моменту, струмів статора та ротора при роботі з ПЧ.

Графіки на рисунках 4.16-4.18 ілюструють зміну напруги та струму на вході перетворювача частоти.

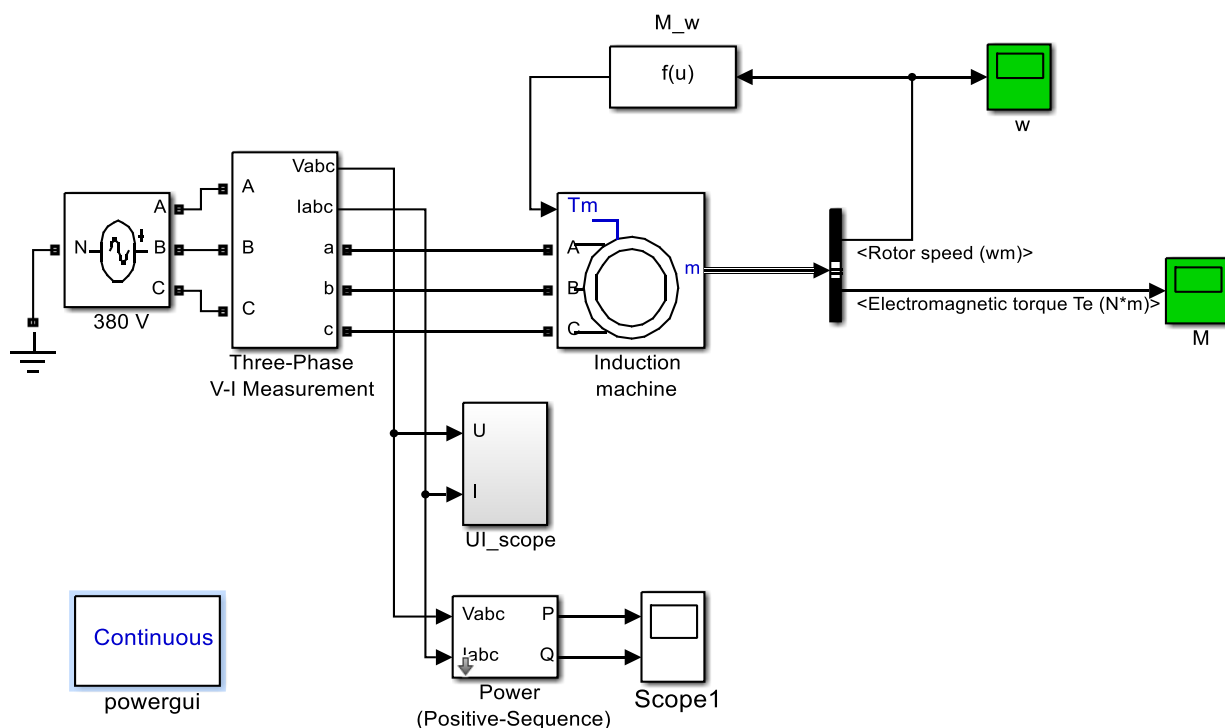


Рисунок 4.8 - Модель Simulink для дослідження прямого пуску асинхронного електропривода

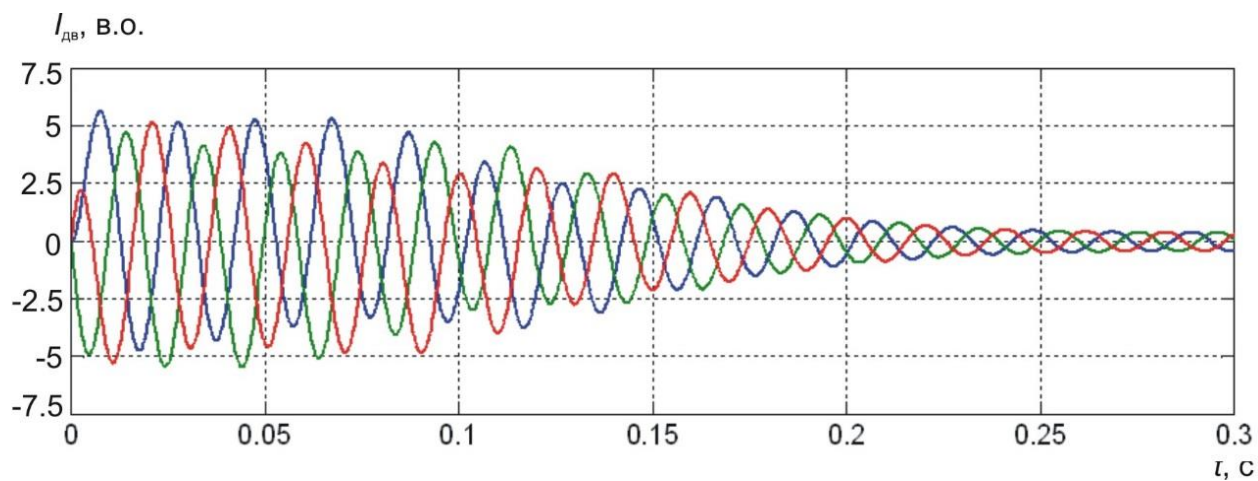


Рисунок 4.9 - Криві струмів статора у функції часу для АКЗ $P_H=55$ кВт при прямому пуску на холостому ході $M_c=0$

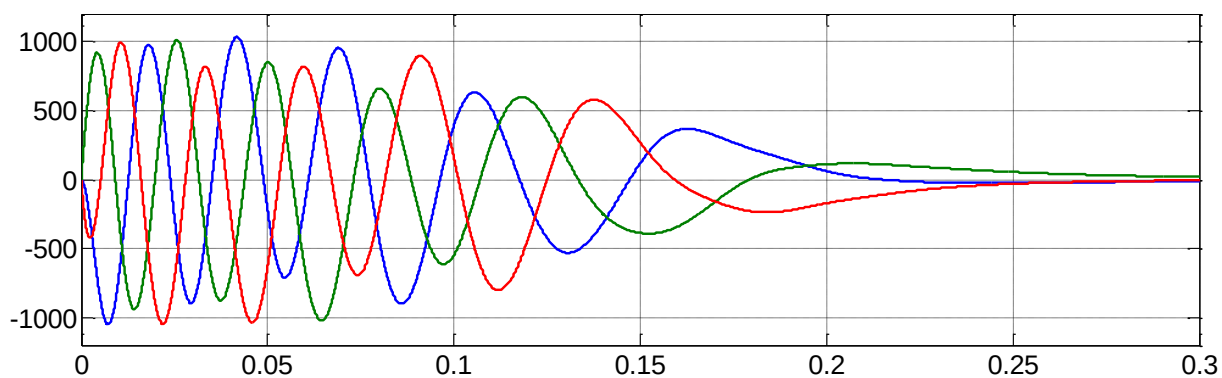


Рисунок 4.10 - Криві струмів ротору у функції часу для АКЗ $P_H=55\text{кВт}$ при прямому пуску на холостому ході $M_c=0$

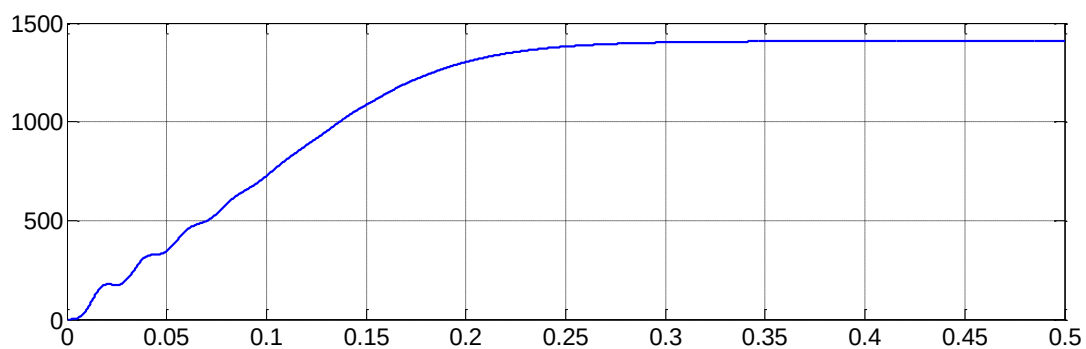


Рисунок 4.11 - Крива швидкості у функції часу для АКЗ $P_H=55\text{кВт}$ при пуску на холостому ході $M_c=0$

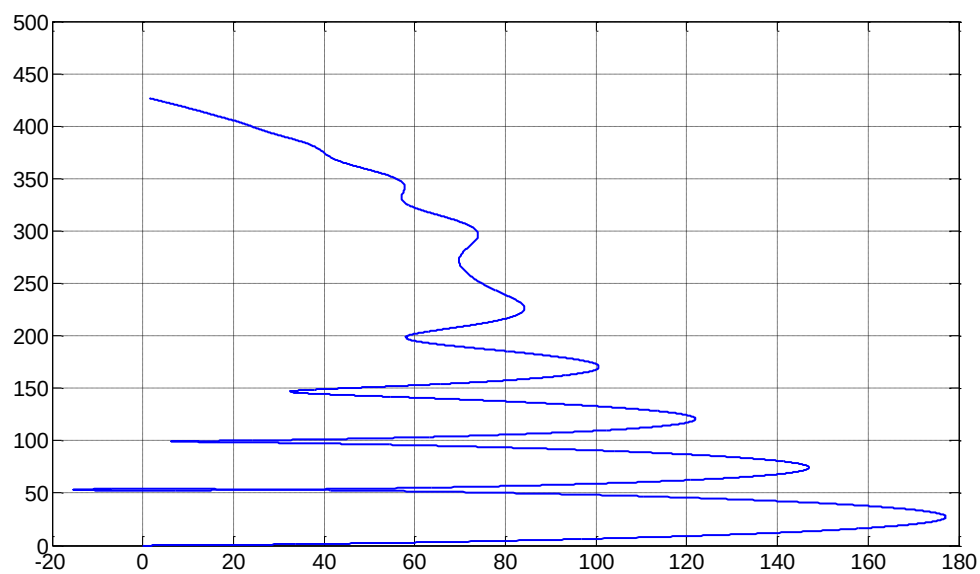


Рисунок 4.12 - Динамічна механічна характеристика при прямому пуску АКЗ $P_H=55\text{кВт}$

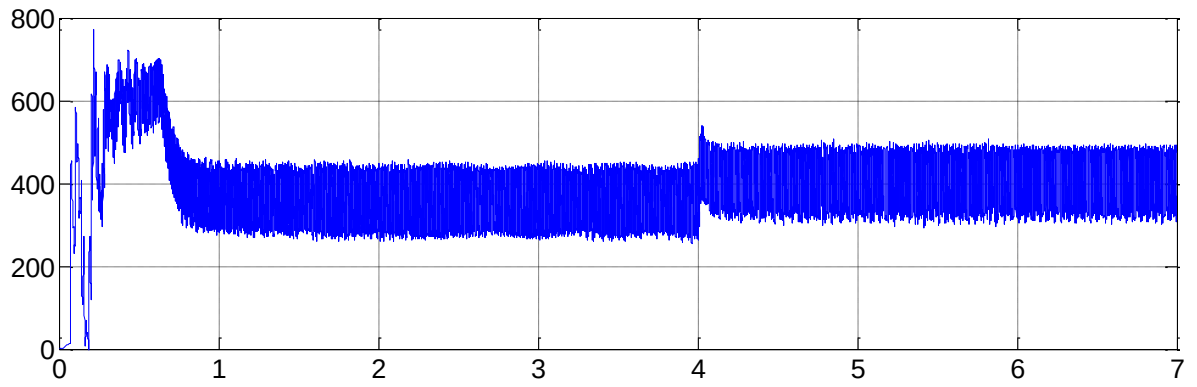


Рисунок 4.13 - Графік зміни електромагнітного моменту M_{em}

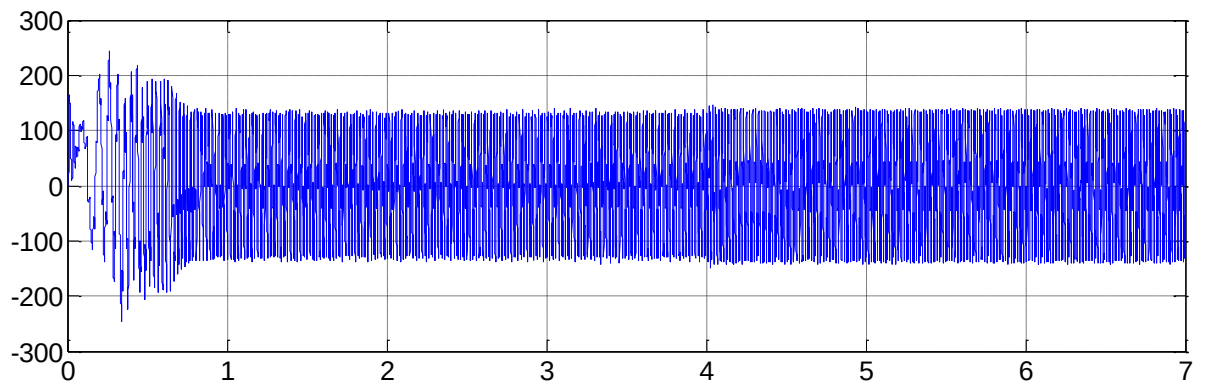


Рисунок 4.14 - Графік зміни струму статора i_s

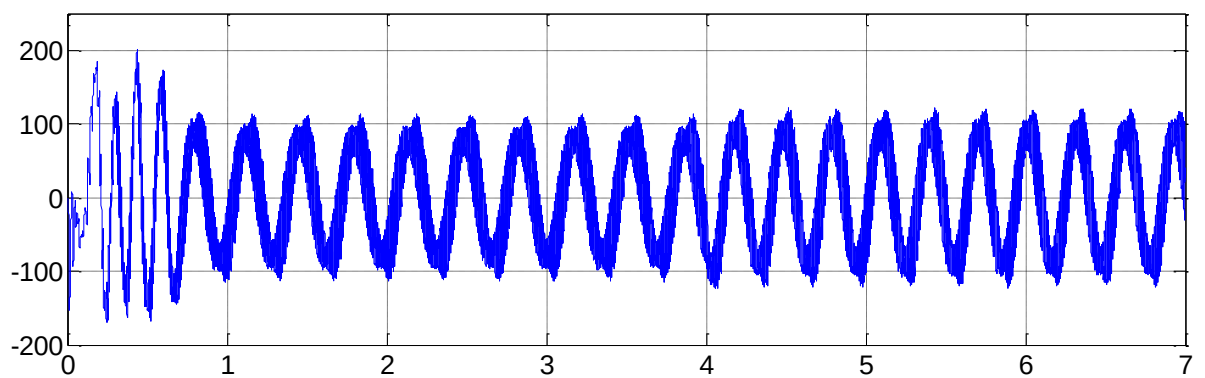


Рисунок 4.15 - Графік зміни струму ротора i_r , приведенного до сторони статора

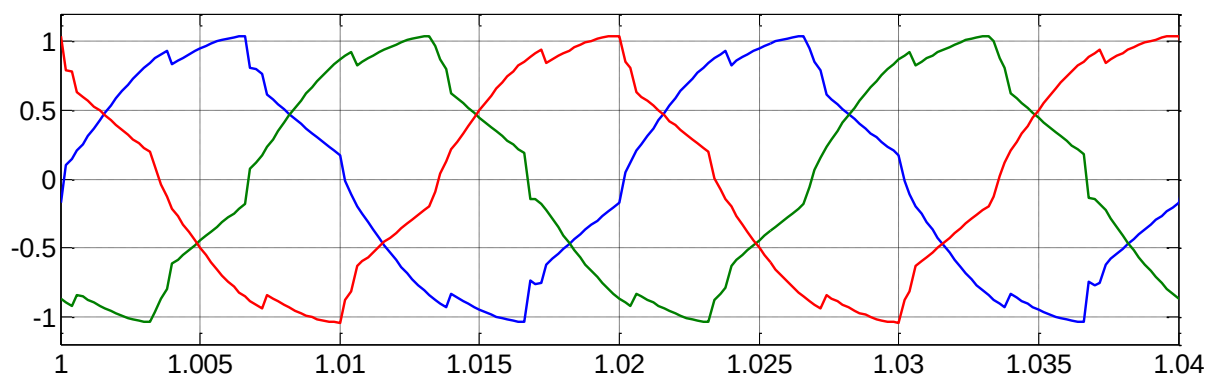


Рисунок 4.16 - Графік зміни напруги U (в.о.) на затискачах ЧП

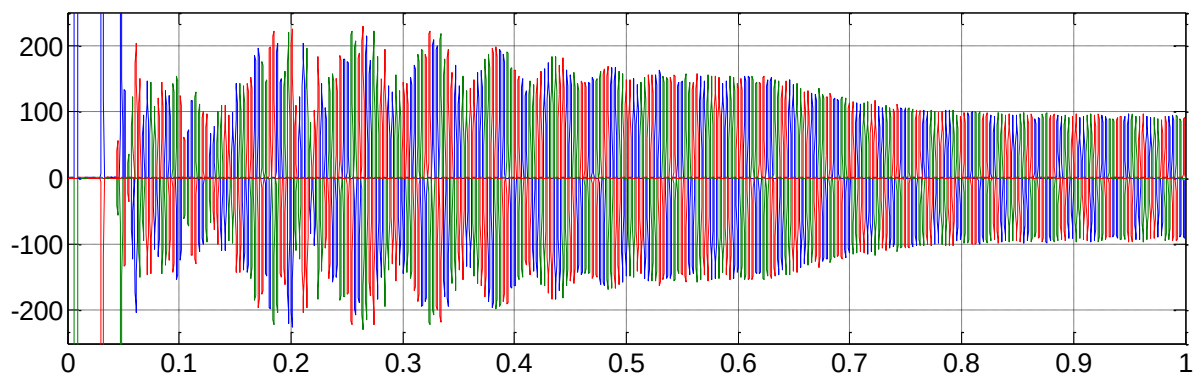


Рисунок 4.17 - Графік зміни струму на вході частотного перетворювача (процес пуску)

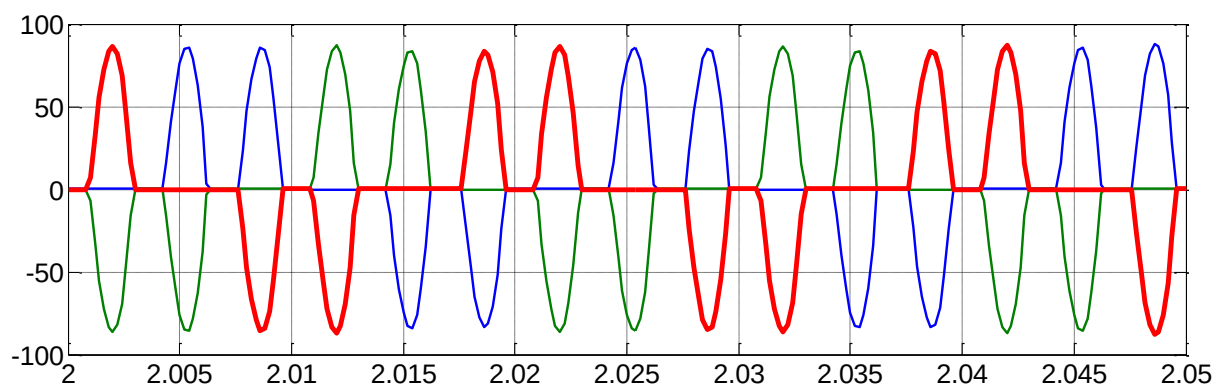


Рисунок 4.18 - Графік зміни струму на вході ЧП (усталений режим)

На рисунку 4.19 наведено механічні характеристики частотнорегульованого асинхронного електропривода для різних частот обертання.

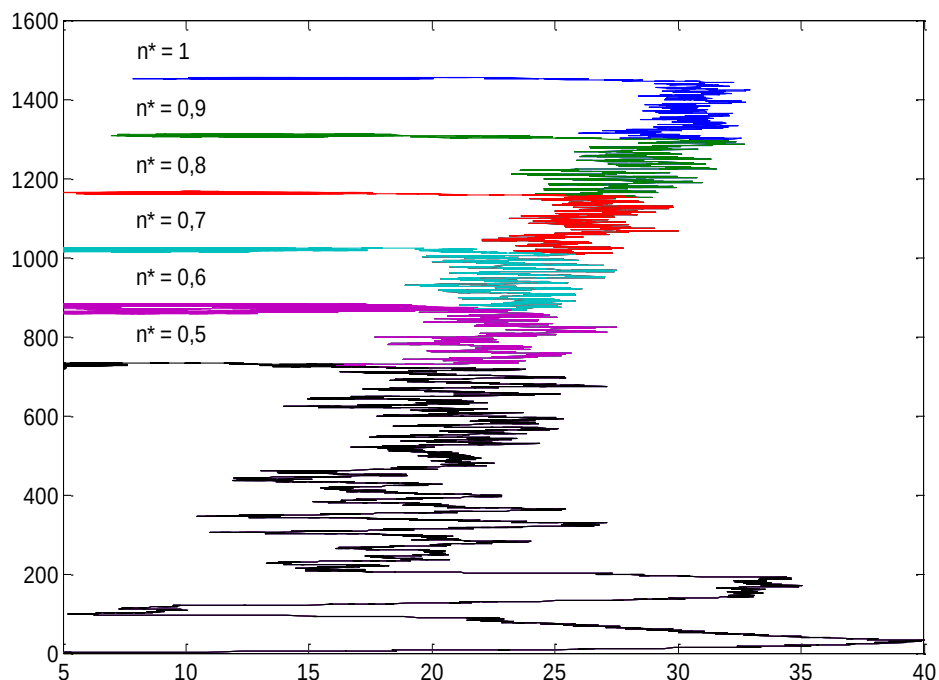


Рисунок 4.19 - Механічні характеристики частотнорегульованого асинхронного електропривода для різних частот обертання

Ударні моменти, пускові струми, втрати потужності й споживання реактивної потужності можуть бути знижені в системах керування АД при плавній зміні частоти напруги статора.

4.3 Узагальнена структурна схема системи автоматичного керування погонним навантаженням конвеєрної установки на основі частотно-регульованого асинхронного електропривода

На рисунку 4.20 наведено узагальнену структурну схему системи автоматичного керування погонним навантаженням конвеєрної установки на основі частотно-регульованого асинхронного електропривода.

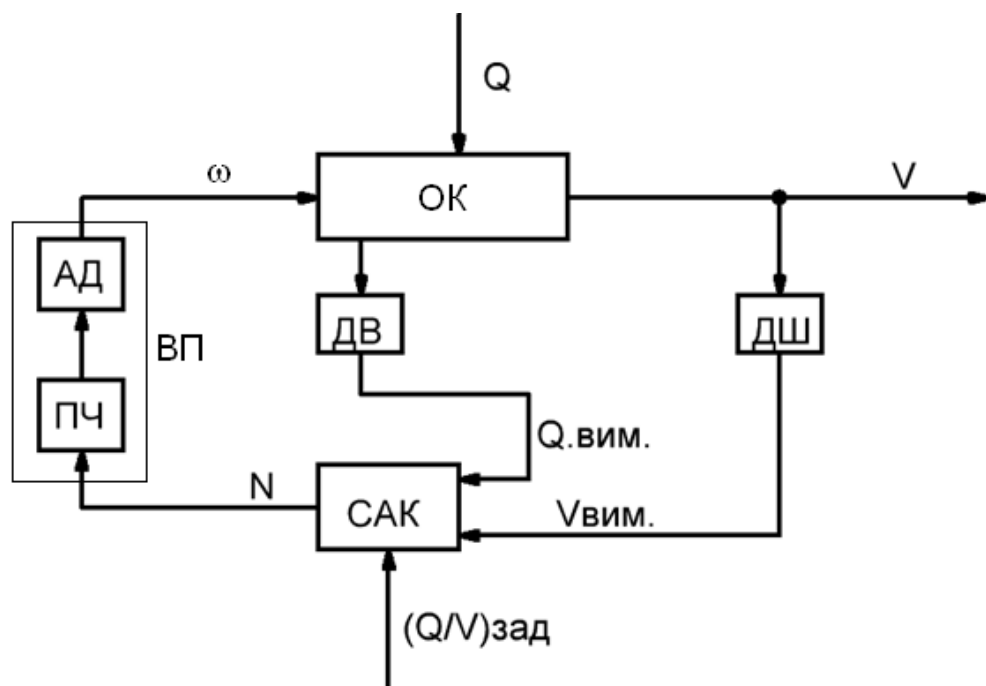


Рисунок 4.20 - Узагальнена структурна схема САК погонним навантаженням конвеєрної установки на основі частотно-регульованого асинхронного електропривода

В схемі на рис. 4.20 прийняті наступні позначення:

ОК – об’єкт керування (стрічковий конвеєр);

ДВ – датчик ваги;

ДШ – датчик швидкості;

ВП – виконавчий пристрій (частотно-регульований асинхронний електропривод);

ПЧ – перетворювач частоти;

АД – асинхронний двигун;

САК – система автоматичного керування погонним навантаженням (блок автоматичного керування);

Q – продуктивність конвеєру (випадкове вхідне зовнішнє збурення), т/год;

N – швидкість обертання валу асинхронного двигуна (вихідний сигнал блоку автоматичного керування);

ω – значення кутової швидкості обертання (вхідний керуючий сигнал об'єкта керування), рад/с.

Структурна схема включає до свого складу об'єкт керування (конвеєр), датчик ваги (ДВ), датчик швидкості руху стрічки конвеєра (ДШ), виконавчий пристрій (ПЧ та АД) та систему автоматичного керування (САК). При зміні ваги вантажу, що поступає на стрічку конвеєра, сигнали з блоків ДВ та ДШ надходять на вхід блоку керування, де згідно обраного алгоритму автоматичного керування відпрацьовуються сигнали з датчиків і формується вихідний керуючий сигнал N (необхідна частота обертання валу двигуна). Керуючий сигнал N потрапляє на вхід виконавчого пристрою, який на виході формує значення сигналу кутової швидкості обертання валу двигуна конвеєра. САК стабілізації погонного навантаження стрічки конвеєра сумісно з перетворювачем частоти повинні підтримувати постійне значення відношення (Q/V).

4.4 Система керування продуктивності стрічкового конвеєру

Система керування налаштовується таким чином, щоб контролювати вантажопотік, який надходить на стрічку конвеєру та в залежності від цього змінювати швидкість тягового органу, тобто стрічки конвеєру. Величина вантажопотоку змінюється в досить широких межах, від мінімального до максимального значення, і є випадковим значенням. При номінальному завантаженню конвеєру, яке відповідає номінальній продуктивності, стрічка конвеєру рухається теж з номінальною швидкістю. При зменшенні об'ємів вантажопотоку, швидкість стрічки руху теж знижується, що забезпечує постійне значення зусилля, яке потрібне на переміщення вантажу. Такий режим роботи конвеєру зі змінною лінійною швидкістю є більш економічним та ресурсозберігаючим, так як збільшує термін служби конвеєрної стрічки та знижує її пробіг.

Так як регулювання виконується у функції вантажопотоку, виникає необхідність визначення його значення у кожний момент часу. Таким вимірювачем вантажопотоку можуть бути, наприклад, електронні ваги, які встановлюються на конвеєр і передають сигнал на датчик вантажопотоку. Система керування змінює швидкість конвеєрної стрічки в залежності від маси вантажопотоку. Реалізація такого алгоритму роботи представлена у якості структурної схеми системи регулювання (рис.4.21).

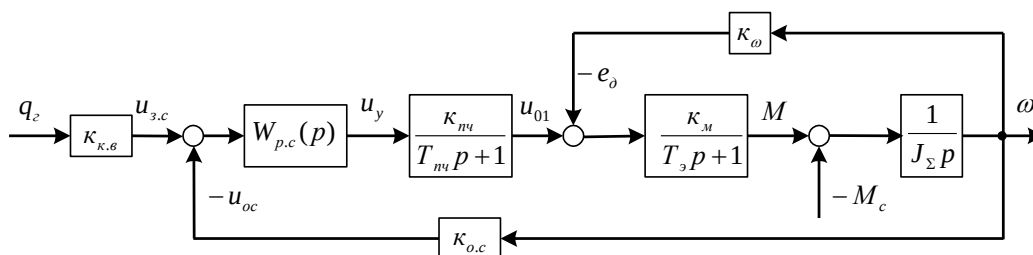


Рисунок 4.21 - Схема структурна з одним контуром системи регулювання за вантажопотоком конвеєру

У цій схемі:

$q_{гp}$ - погонна маса вантажопотоку на конвеєрі, кг/м;

$K_{к.в}$ - коефіцієнт передачі ваг конвеєру, В·м/кг;

$u_{з.с}$ - сигнал завдання швидкості (напруга), В;

$K_{о.с}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю, Вс;

$u_{о.с}$ - сигнал зворотного зв'язку за швидкістю, (напруга) В;

$W_{p.c}(p)$ - передавальна функція для регулятора швидкості.

В цій схемі об'єктом керування являються три послідовно з'єднаних ланцюги:

- ланцюг ПЧ - $W_{пч}(p) = K_{пч} / (pT_{пч} + 1)$;
- електромагнітний ланцюг АД - $W_{ем}(p) = K_M / (pT_э + 1)$;
- ланцюг швидкості ротора двигуна - $W_c(p) = 1 / pJ_Σ$.

Тобто отримується контур, до складу якого входять АД, ПЧ та регулятор швидкості.

Потрібно визначитися з погонним навантаженням конвеєрних ваг, яке повинно вибиратися у відповідності до погонного навантаження стрічкового конвеєра. Для конвеєрних ваг визначається коефіцієнт передачі, по формулі:

$$\kappa_{к.в} = \frac{U_{у.ном}}{q_{гр.макс}} = \frac{10}{150} = 0,067 \text{ В} \cdot \text{м/кг},$$

де $U_{у.ном}$ - номінальне значення напруги керування, В;

$q_{гр.макс}$ - максимальне погонне навантаження, кг/м.

Далі визначаємо коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю. Його розрахунок виконується по максимальній кутовій швидкості ротора двигуна, яка визначає швидкість стрічки.

$$\omega_{1max} = 1,08 \cdot i_p \cdot v / R_6 ;$$

$$\kappa_{oc} = \frac{U_{o.c}}{1,08 \cdot \omega_1} = \frac{9 \cdot R_6}{1,08 \cdot v \cdot i_p} = \frac{8,33 \cdot R_6}{v \cdot i_p} = \frac{8,33 \cdot 1}{1 \cdot 49,03} = 0,17,$$

де $U_{o.c} = 9$ - значення напруги зворотного зв'язку за швидкістю стрічки.

Це значення приймається трохи нижчим 10 В, щоб забезпечити запас на пере регулювання швидкості в перехідних режимах.

Визначаємо передаточну функцію регулятора швидкості. Використовуємо налаштування цієї функції для розімкнутого контуру за модульним оптимумом:

$$W_{ж}(p) = \frac{1}{2 \cdot p \cdot T_{\mu} \cdot (p \cdot T_{\mu} + 1)},$$

де T_{μ} - некомпенсована постійна часу.

Знехтуємо впливом ЕРС двигуна ($e_d = 0$), тоді передаточну функцію розімкнутого контуру можливо представити наступним чином:

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}}(p) &= W_{p.c.}(p) \cdot \frac{k_{\text{ПЧ}}}{pT_{\text{ПЧ}} + 1} \cdot \frac{k_M}{pT_e + 1} \cdot \frac{1}{pJ_{\Sigma}} \cdot k_{o.c.} = \\ &= W_{p.c.}(p) \cdot \frac{20,7}{0,005p + 1} \cdot \frac{128,6}{0,107p + 1} \cdot \frac{1}{0,2p} \cdot 0,17 \end{aligned}$$

Для визначення передаточної функції регулятора швидкості, вибираємо значення $T_{\text{нч}}$ таким, що дорівнює некомпенсованій постійній часу:

$$\begin{aligned} W_{p.c.}(p) &= \frac{pT_e + 1}{2 \cdot T_{\text{ПЧ}} \cdot k_{\text{ПЧ}} \cdot k_M \cdot k_{o.c.} / J_{\Sigma}} = \\ &= \frac{0,001p + 1}{2 \cdot 0,005 \cdot 20,7 \cdot 128,6 \cdot 0,17 / 0,2} = \frac{0,001p + 1}{22,6} \end{aligned}$$

Розрахунки виконані для контуру швидкості з пропорційно-диференціальним регулятором (ПД-регулятором).

Порівняємо обчислення параметрів для пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (PID controller):

$$P = \frac{J_{\Sigma}}{2 \cdot T_{\text{ПЧ}} \cdot k_{\text{ПЧ}} \cdot k_M \cdot k_{o.c.}} = \frac{0,2}{2 \cdot 0,005 \cdot 20,7 \cdot 128,6 \cdot 0,17} = 0,044 ;$$

$$D = \frac{J_{\Sigma} \cdot T_e}{2 \cdot T_{\text{ПЧ}} \cdot k_{\text{ПЧ}} \cdot k_M \cdot k_{o.c.}} = \frac{0,2 \cdot 0,107}{2 \cdot 0,005 \cdot 20,7 \cdot 128,6 \cdot 0,17} = 0,0047 .$$

Розроблену структурну схему синтезуємо в середовищі MATLAB-Simulink для двох типів регуляторів швидкості: ПД та ПІД (рисунки 4.22 та 4.23 відповідно).

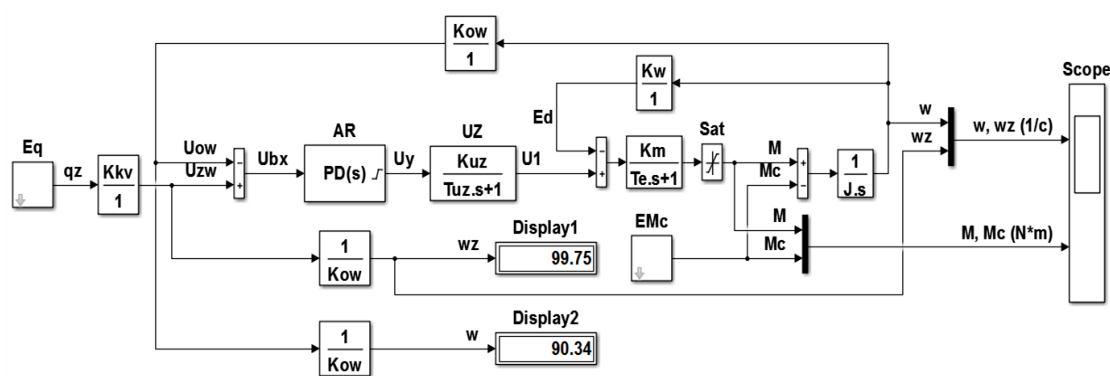


Рисунок 4.22 - Структурна модель ЧРЕП стрічки конвеєра із ПД-регулятором швидкості

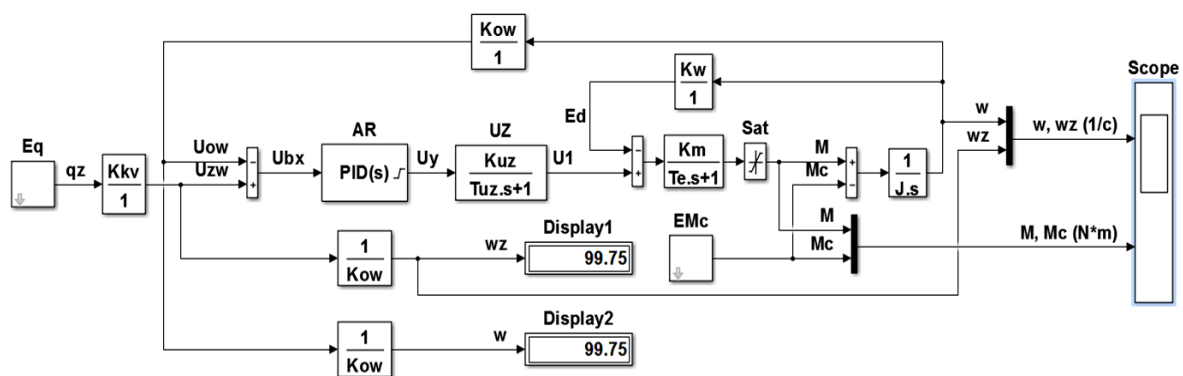


Рисунок 4.23 - Структурна модель ЧРЕП стрічки конвеєра з ПІД-регулятором швидкості

В цих структурних моделях:

Eq - блок завдання вантажопотоку конвеєру;

AR – ПД або ПІД регулятор швидкості;

UZ – ПЧ;

Sat - блок обмеження моменту за пусковим значенням;

EMc- блок завдання по статичному моменту опору;

Display1 - блок, що використовуються для визначення значення заданої ω_z кутової швидкості;

Display2 - блок, що використовуються для визначення значення дійсної ω кутової швидкості;

Score - віртуальний осцилограф, використовується для візуалізації змінних кутових швидкостей та моментів.

Проведені на структурних моделях розрахунки дозволяють отримати графіки зміни кутових швидкостей та моментів двигуна для роботи з ПД-регулятором швидкості (рис.4.24 а)) та ПД-регулятором швидкості (рис.4.24 б)).

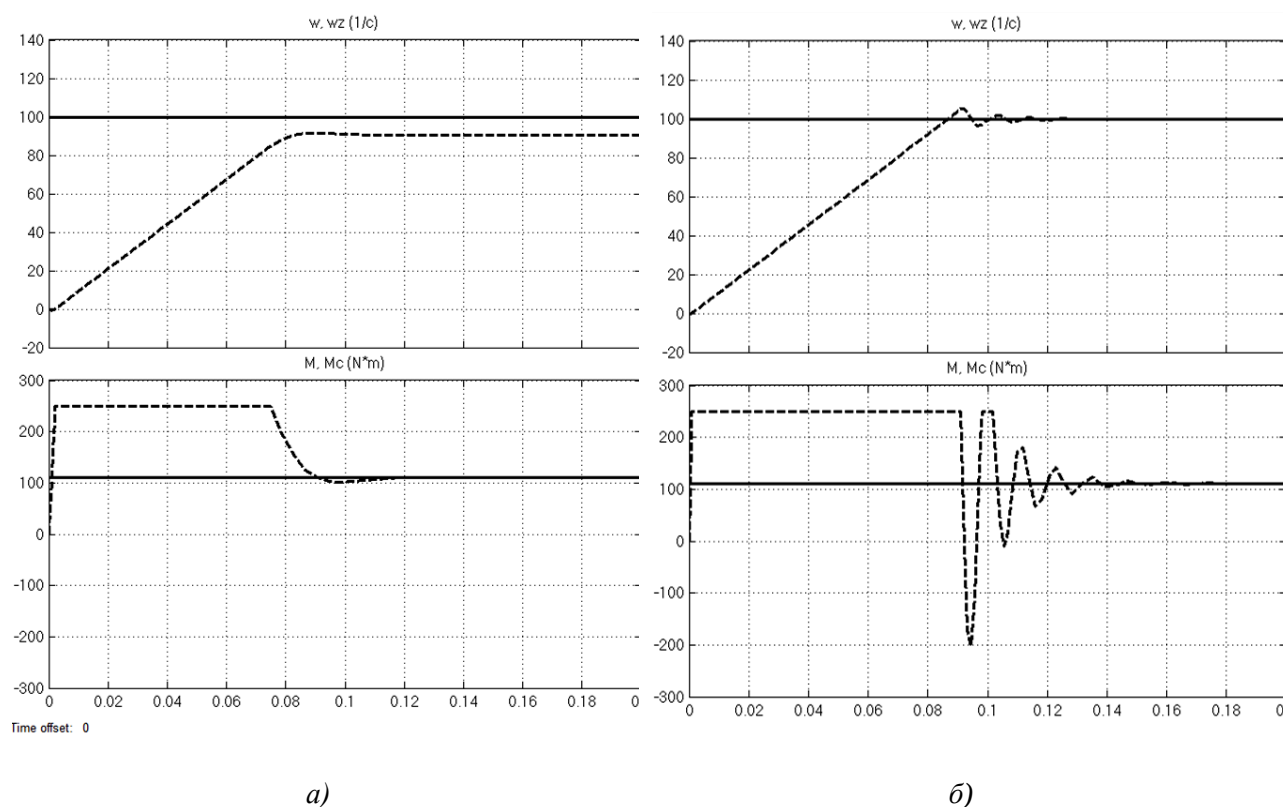


Рисунок 4.24 - Діаграми зміни кутових швидкостей та моментів при використанні : а) ПД-регулятора швидкості; б) ПД-регулятора швидкості

При проведенні розрахунків були прийняті певні припущення, так знехтували внутрішнім зворотнім зв'язком по ЕРС двигуна для схеми з ПД-регулятором швидкості.

Проведемо аналіз даних графіків. Статична помилка (на підставі показань блоків Display) виходить: 9, 3% для ПД-регулятора швидкості та дорівнює нулю для ПД-регулятора швидкості. Момент двигуна дорівнює статичному в усталеному режимі для ПД-регулятора швидкості та з'являються коливання у

графіку моменту двигуна та пере регулювання за швидкістю для ПД-регулятора швидкості.

В цілому, розроблені схеми дозволяють провести моделювання регулювання швидкості конвеєрної стрічки за продуктивністю та оцінити параметри регулювання для випадків застосування ПД- та ПД-регуляторів швидкості.

4.5 Дослідження на моделі системи стабілізації погонного навантаження конвеєра

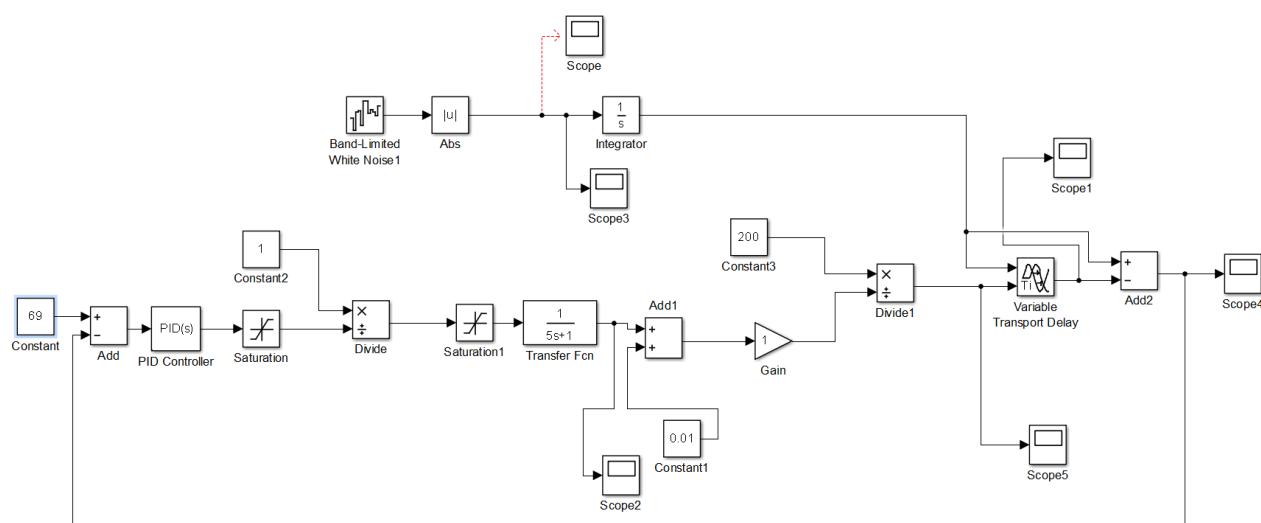
Змоделюємо систему керування швидкістю руху конвеєрної стрічки для отримання постійного погонного навантаження, відповідно до розробленого алгоритму. Моделювання виконується в середовищі прикладних програм MATLAB, бібліотеці Simulink.

Навантаження конвеєру є випадковою величиною, що змінюється в певних межах. Для того, щоб об'єктивно оцінити роботу системи керування розглянемо декілька варіантів завдання зміни навантаження. Для цього в структурній схемі стабілізації погонного навантаження будемо змінювати блоки, що відповідають за завдання навантаження. Вибираємо наступні блоки:

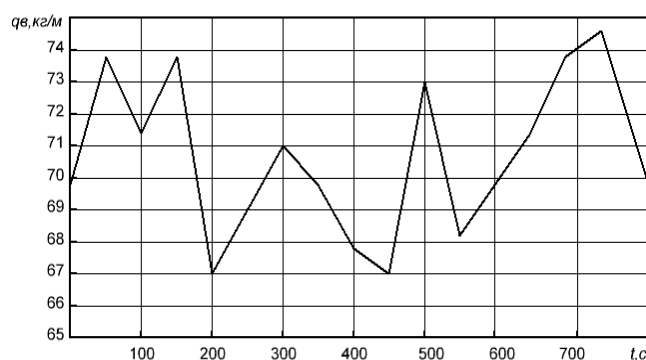
- 1) Band-Limited White Noise;
- 2) Random Number;
- 3) Sine Wave.

Структурні схеми для моделювання стабілізації погонного навантаження конвеєру з різними типами блоків завдання навантаження наведено на рис. 4.25, а); 4.26 а), б).

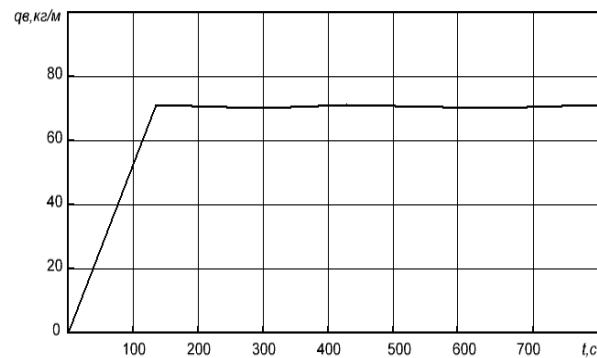
Загальний вигляд графіків змодельованого фактичного навантаження з блоком завдання навантаження Band-Limited White Noise наведено на рисунку 4.25 б), а завантаження стрічки конвеєру з регулюванням на стабілізацію погонного навантаження на рисунку 4.25 в).



а)



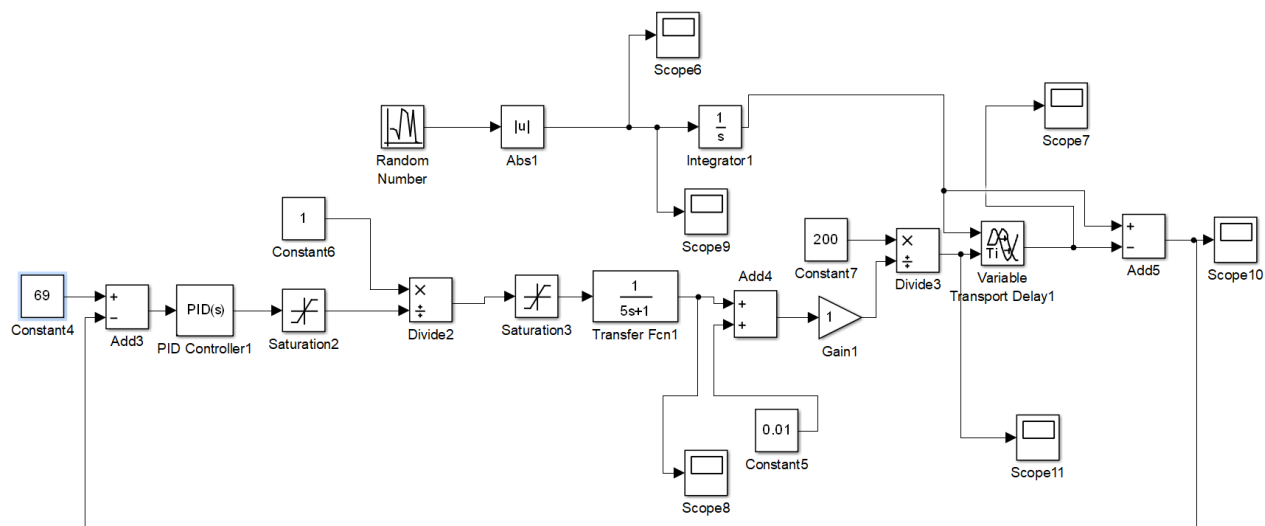
б)



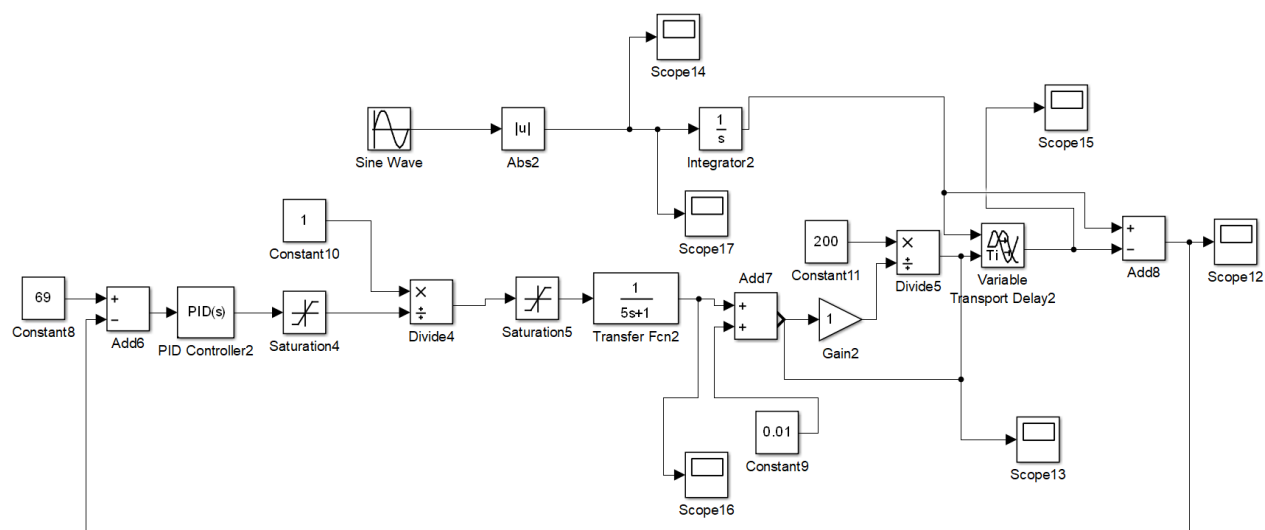
в)

Рисунок 4.25- Моделювання стабілізації погонного навантаження конвеєру з блоком завдання навантаження Band-Limited White Noise: а) структурна схема; б) залежність фактичного навантаження конвеєру; в) - завантаження стрічки конвеєру з регулюванням на стабілізацію погонного навантаження:

Загальний вигляд графіків змодельованого фактичного навантаження з блоком завдання навантаження Band-Limited White Noise наведено на рисунку 4.25 б), а завантаження стрічки конвеєру з регулюванням на стабілізацію погонного навантаження на рисунку 4.25 в).



a)



б)

Рисунок 4.26- Структурні схеми для моделювання стабілізації погонного навантаження конвеєру: а) – блок завдання навантаження Random Number; б) - блок завдання навантаження Sine Wave

Загальний вигляд графіків змодельованого фактичного навантаження з блоками завдання навантаження Random Number та Sine Wave наведено на рисунку 4.27 а) та в), а завантаження стрічки конвеєру з регулюванням на стабілізацію погонного навантаження для тих же блоків на рисунку 4.25 б) та г).

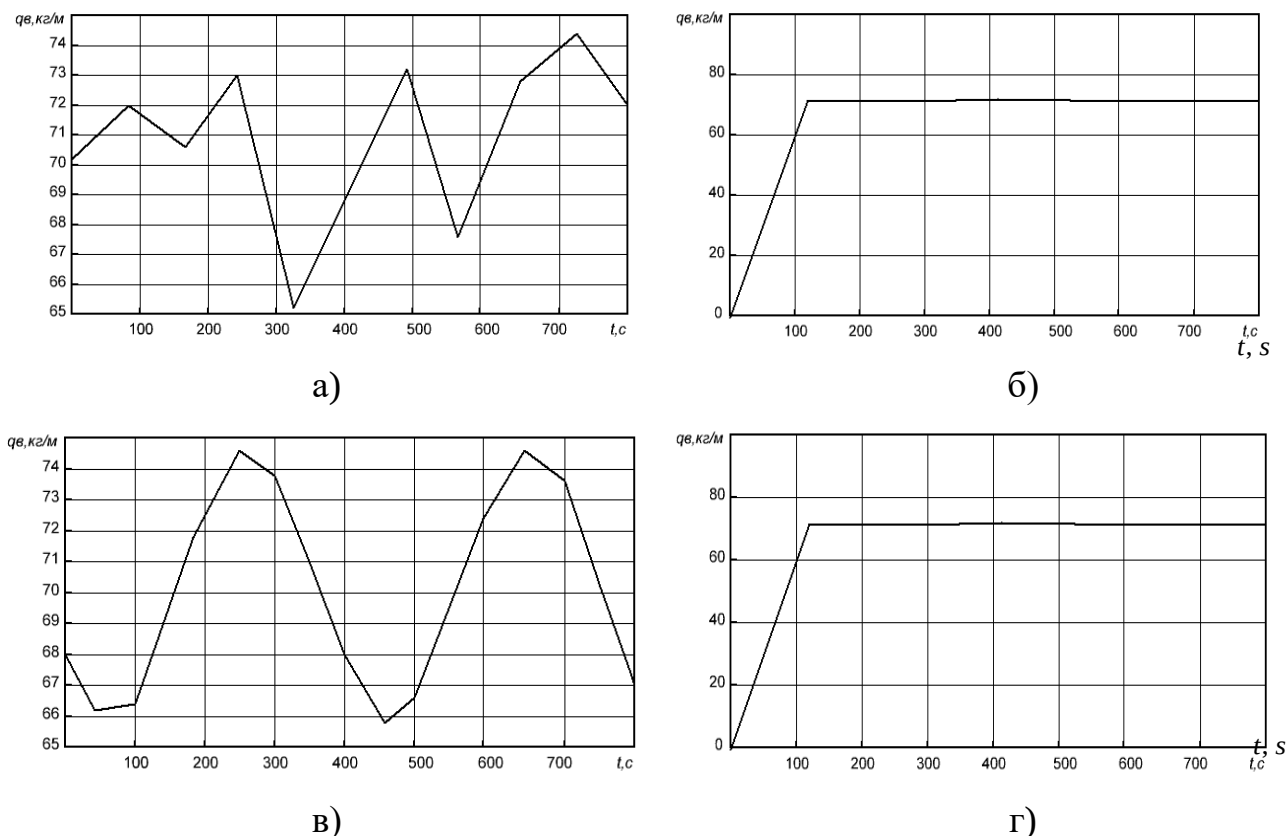


Рисунок 4.27 - Залежності фактичного навантаження конвеєру: а) - блок завдання навантаження Random Number; в) - блок завдання навантаження Sine Wave; завантаження стрічки конвеєру з регулюванням на стабілізацію погонного навантаження: б) - блок завдання навантаження Random Number; г) - блок завдання навантаження Sine Wave

Наведені графіки імітують нерівномірність навантаження в межах певного інтервалу, тобто будуть існувати режими перевантаження або недовантаження конвеєрної установки, що призводить у першому випадку до підвищеного зносу робочих органів, а у другому випадку до зниження ефективності роботи системи.

Оцінимо роботу системи регулювання конвеєрної установки на постійне погонне навантаження конвеєру.

Результати моделювання для різних блоків завдання навантаження наведено на рисунках 4.25 в) та 4.27 б); г).

Аналіз графіків показує, що характер вхідного навантаження не впливає на кінцевий результат стабілізації погонного навантаження. У межах змодельованого часу завантаження конвеєру наближається до номінального. Такий режим роботи являється енергоефективним, підвищує термін роботи обладнання, зменшує споживання електроенергії.

Розроблений алгоритм керування продуктивністю конвеєрної установки забезпечує оптимальну якість керування.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення електробезпеки на підприємстві

Розглянемо питання захисного занулення та заземлення, яке виконується для захисту людей при дотику до ізольованих металевих частин у разі пошкодження ізоляції. Якщо виникло пошкодження ізоляції, ці частини можуть опинитися під напругою і привести до ураження людини електричним струмом.

Виконувати захисне занулення та заземлення потрібно на всіх металевих частинах електроустановок, до яких може доторкнутися людина, якщо відсутні інші захисти електробезпеки.

Виконання занулення та заземлення дещо відрізняється. Для виконання захисного заземлення з'єднуються металеві частини електричних установок з «землею» чи її еквівалентом. Для виконання занулення з'єднуються металеві частини електричних установок з заземленою точкою джерела живлення через нульовий захисний провідник.

Нормативними документами регламентується напруга електроустановок, коли захисне заземлення чи занулення потрібно виконувати для всіх випадків. Для змінного струму це номінальна напруга 380 В і вище та для постійного струму 440 В і вище.

Якщо проводяться роботи з підвищеною небезпекою та особливо небезпечні (ДСТУ Б А.3.2-13:2011 Система стандартів безпеки праці. Будівництво. Електробезпека.) обов'язкове виконання захисного заземлення чи занулення електричних установок при номінальній напрузі від 42 до 380 В змінного струму та від 110 до 440 В постійного струму.

При виконанні заземлення спочатку розглядається можливість застосування природних заземлювачів. У якості природних заземлювачів можуть бути використані залізобетонні фундаменти промислових будівель.

Потрібно, щоб заземлювальний пристрій, який використовується для заземлення електроустановок різних за призначенням і напругами живлення, задовільняв усім вимогам, які висуваються до заземлення цих електричних установок.

При виконанні захисного заземлення та занулення потрібно застосовувати спеціально призначені провідники, електромонтажні, металеві будівельні і виробничі конструкції. У якості нульових захисних провідників потрібно застосовувати робочі нульові провідники.

Висуваються вимоги до матеріалу, розмірів та конструкції заземлювачів, заземлюючих і нульових захисних провідників з точки зору стійкості до хімічних, термічних і механічних впливів протягом всього періоду експлуатації.

5.2 Електроустановки напругою до 1000 В в мережі із заземленою нейтраллю

Виконання захисного занулення стаціонарних електроустановок повинно передбачатися у наступних випадках:

- в мережах трифазного струму при заземленій нейтралі;
- в мережі із заземленим виводом однофазного джерела живлення електроенергією;
- в трипровідних мережах постійного струму із заземленою середньою точкою.

Вибір фазних та нульових захисних провідників потрібно виконувати так, щоб виникав струм короткого замикання, який при замиканні на корпус або на нульовий провідник, призведе до плавлення плавкої вставки найближчого запобіжника чи відключення автомату.

Роз'єднуючі пристрої та запобіжники не повинні встановлюватися у ланцюзі нульових захисних провідників.

Якщо нульові робочі провідники одночасно використовуються для занулення, то дозволяється встановлювати роз'єднувальні пристрої, такі, що відключають одночасно нульові робочі провідники та всі провідники, що підключені до напруги.

Нормується значення опору заземлюючого пристрою, до якого підключені нейтралі трансформаторів (генераторів) чи виводи однофазного джерела живлення електричною енергією (враховуються природні заземлювачі та повторні заземлювачі нульового проводу):

- для трифазного джерела живлення при міжфазних напругах 660, 380 та 220 В не більше 2,4 Ом;
- для однофазного джерела живлення 380, 220 і 127 В не більше 8 Ом.

Можливе підвищення зазначеної норми в $\rho/100$ разів, якщо питомий електричний опір «землі» вище 100 Ом·м.

У стаціонарних мережах опір заземлюючого пристрою повинен не перевищувати 10 Ом. Допускається вводити підвищуючі коефіцієнти, які залежать від ρ , при питомому опорі землі, що більше 500 Ом·м,

5.3 Безпека та охорона праці при експлуатації конвеєрного транспорту

Експлуатація конвеєрного транспорту є небезпечним видом робіт на виробництві. Найбільш важкі пошкодження можливі при роботі конвеєрної стрічки, при руху стрічки , навіть без завантаження, можуть виникнути пошкодження рухомих вузлів. Особливо небезпечна робота під навантаженням, або коли спостерігається перевантаження конвеєрної стрічки. Враховуючи , що навантаженням конвеєру на гірничо-збагачувальному виробництві є гірська маса, падіння шматків цієї маси є вкрай небезпечним. Виходячі з цього, дуже важливу роль відіграють огороження рухомих вузлів та стрічки.

Частина травм припадає на монтаж та демонтаж, ремонт конвеєру. При проведенні цих робіт потрібно дотримуватися загальних вимог та правил.

Найбільш складною та небезпечною аварією є розрив вантажної стрічки. Це пошкодження характерно для найбільшого завантаження конвеєрної стрічки, як правило, виникає на приводному барабані. Цей вид пошкодження є дуже небезпечним, тому що, гірська маса з прискоренням рухається вниз, зі швидкістю, що сягає сотен метрів за секунду.

Враховуючи види аварійних ситуацій, можна зробити висновок, що вони залежать від кута нахилу стрічки конвеєра. Цей показник регламентується і становить не більше 15° , якщо конвеєр працює на спуск та не більше 18° , якщо на підйом. Величина кута може бути збільшена, якщо застосовуються запобіжні пристрої та заходи від скочування каміння.

Одним з заходів безпеки є застосування гальм для унеможливлення зворотного ходу. Застосовувати їх потрібно для конвеєрів, що працюють в підземних виробленнях при кутах нахилу понад 6° , на всіх інших конвеєрах, якщо кут нахилу перевищує 8° . Крім того передбачаються на конвеєрах з кутом нахилу понад 10° спеціальні пристрої, що уловлюють стрічку конвеєру при її розриві.

З точки зору безпеки експлуатації має значення розташування конвеєрів відносно конструкції галереї. Нормуються наступні відстані (значення не менше, м): між конвеєрними стрічками – 1, відстань до стіни - 0,4 (з негабаритного боку), - 0,7 (з габаритного).

Обов'язково розглядається питання безпечного знаходження людей поряд з працюючим конвеєром. Перехід через працюючий конвеєр може знаходитися зверху або знизу. У першому випадку перехід здійснюється по спеціальним місткам, які обладнані поручнями з висотою не нижче 0,8 м. В другому випадку над переходом встановлюється навіс з кожного боку не менше 1м. Щоб не травмуватися при падінні вантажу зі стрічки, встановлюється спеціальна огорожуюча сітка, яка проходить на протязі всієї конвеєрної стрічки.

Потрібно передбачити освітлення всієї конвеєрної лінії у вечірній та нічний час. Окремі вимоги висуваються до проведення ремонтних робіт на конвеєрі. Їх можливо здійснювати тільки після відключення як окремого конвеєра, так і всієї лінії, з застосуванням попереджувального надпису «Не вмикати! Працюють люди». До ремонтної бригади входить не менше двох чоловік. Один обов'язково виконує нагляд. Додаткові заходи безпеки застосовуються при ремонті бункера, або перевантажувального вузла. При спусканні до бункера, у верхній його частині закріплюють канати та запобіжні пояси. Необхідно добре провітрити бункер, а при необхідності зробити експрес-аналіз повітря.

Дуже важливе питання організації пуску та зупинки конвеєрних ліній. Якщо розглядається окремо працююча конвеєрна лінія, то діють наступні вимоги: мінімум за 5 сек до запуску подається звуковий сигнал, який не вимикається поки швидкість руху стрічки конвеєра не досягне номінальної; потрібний обзор всього конвеєру і запуск з приводного пункту. Забороняється вмикати конвеєр дистанційно, якщо спрацювала система захисту. Виконується автоматичне вимикання конвеєру, якщо пробуксовує стрічка.

Якщо розглядається сукупність декільком конвеєрних ліній, що об'єднані в поточно-транспортну систему, накладаються додаткові вимоги на пуск та зупинку послідовно під'єднаних конвеєрів. Насамперед, пуск таких конвеєрів повинен починатися з останнього, а зупинка – навпаки з першого. Конвеєр запускається тільки тоді, коли наступний за ним конвеєр набере номінальну швидкість обертання. Виконується автоматична зупинка всієї системи, якщо зупинився хоча б один конвеєр.

Додатковим заходом безпеки є можливість зупинки конвеєра в будь-якому місці. Це досягається за рахунок тросів, що натягнуті по довжині конвеєру та з'єднані з кінцевими вимикачами.

5.4 Застосування залізобетонних фундаментів промислових будівель у якості заземлювачів

При використанні залізобетонних фундаментів промислових будівель, як заземлювачів опір розтіканню заземлюючого пристрою в Ом оцінюється за формулою:

$$R = 0,5 \frac{\rho_{\text{пит}}}{\sqrt{S}}, \quad (5.1)$$

де S – величина площі, яка обмежена периметром будівлі, м^2 , $\rho_{\text{пит}}$ — значення еквівалентного питомого електричного опору ґрунту, Ом·м.

Значення еквівалентного питомого електричного опору ґрунту знаходиться за формулою:

$$\rho_{\text{пит}} = \rho_1 \left(1 - e^{-\alpha \frac{h_1}{\sqrt{S}}} \right) + \rho_2 \left(1 - e^{-\beta \frac{\sqrt{S}}{h_1}} \right); \quad (5.2)$$

де ρ_1 – значення питомого електричного опору верхнього шару ґрунту, Ом·м; ρ_2 – значення питомого електричного опору нижнього шару ґрунту, Ом·м; h_1 – величина товщини верхнього шару ґрунту, м;

α , β - безрозмірні коефіцієнти, які визначаються співвідношенням питомих електричних опорів шарів ґрунту:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } \rho_1 > \rho_2, \text{ тоді: } \alpha &= 3,6; \beta = 0,1; \\ \text{якщо } \rho_1 \leq \rho_2, \text{ тоді: } \alpha &= 1,1 \cdot 10^2, \beta = 0,3 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

В розрахунках вводиться поняття верхнього та нижнього шару ґрунту. Різниця в питомому електричному опорі верхнього та нижнього шару ґрунту становить більше ніж 2 рази.

За виразом (5.3) можна оцінити необхідність прокладання вирівнюючих провідників в електроустановках напругою від 110 до 750 кВ. Якщо умова (5.3) виконується, то прокладання вирівнюючих провідників потрібно тільки в місцях

розміщення заземлення нейтралів силових трансформаторів, вентиляльних розрядників, короткозамикачів, і блискавковідводів.

$$I_{K.3} \leq (5,4 + 7 \cdot 10^{-3} \rho_1) \frac{\sqrt{S}}{\rho_{\text{пит}}}; \quad (5.3)$$

де $I_{K.3}$ - струм однофазного замикання, що проходить в «землю» з фундаментів будівлі, кА.

Оцінимо можливість використання залізобетонних фундаменту промислової будівлі в якості заземлювачів. Приймаємо, що з'єднання металевої колони з арматурою залізобетонного фундаменту виконані згідно норм.

В розрахунках приймаємо:

верхній шар ґрунту – суглинок, $\rho_1 = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

товщина верхнього шару ґрунту, $h_1 = 1,2 \text{ м}$

нижній шар ґрунту – глина, $\rho_2 = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;

розміри будівлі за планом $24 \times 60 \text{ м}$;

безрозмірний коефіцієнт питомого електричного опору верхнього шару ґрунту, $\alpha = 3,6$;

безрозмірний коефіцієнт питомого електричного опору нижнього шару ґрунту, $\beta = 0,1$.

Еквівалентний питомий електричний опір ґрунту:

$$\rho_{\text{пит}} = 100 \left(1 - e^{-3,6 \frac{1,2}{\sqrt{1440}}} \right) + 40 \left(1 - e^{-0,1 \frac{\sqrt{1440}}{1,2}} \right) = 107,7 + 38,4 = 146,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

При використанні залізобетонних фундаментів промислових будівель як опір заземлюючого пристрою в Ом:

$$R_{з.ф} = 0,5 \frac{146,1}{\sqrt{1440}} = 1,92 \text{ Ом},$$

де $S = 1440 \text{ м}^2$ - площа, обмежена периметром будівлі, $\rho_{\text{пит}} = 146,1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, питомий еквівалентний електричний опір ґрунту.

ПУЕ регламентують значення опору заземлюючого пристрою, яке не повинно перевищувати $R_з = 4 \text{ Ом}$.

$$R_{з.ф} = 1,92 \leq 4 = R_з; \text{ Умова виконується.}$$

Приєднання елементів контуру заземлення наведено на рис.5.1.

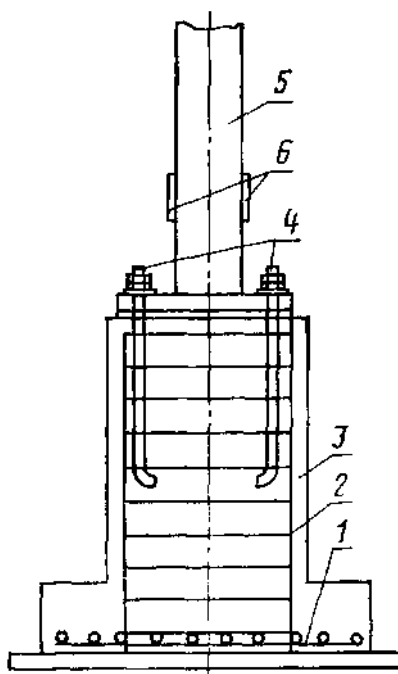


Рисунок 5.1 - З'єднання арматури залізобетонного фундаменту з металевою колоною: 1 – підшва з арматурою; 2 – фундамент з арматурою; 3 - фундамент; 4 - фундаментні болти, 5 - сталеві колони; 6 – пластини, до яких приварюються провідники заземлення.

Проведенні розрахунки свідчать про доцільність використання залізобетонного фундаменту промислової будівлі контуром заземлення.

6 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ЗАХОДІВ

6.1 Характеристика складових економічного ефекту

Основна сфера застосування конвеєрів у гірничо-збагачувальному виробництві – переміщення руди, що добувається в підземних виробленнях до стовбура. Після дроблення руда конвеєрами подається на збагачувальну фабрику через підземні виробки і наземні галереї.

До переваг конвеєрного транспорту порівняно з іншими його видами належать, перш за все:

- безперервний процес транспортування, який дозволяє отримати вищу продуктивність;
- висока надійність роботи конвеєра;
- технологічна пристосованість до роботи у складі систем автоматизованого управління технологічним процесом;
- низький рівень виробничого травматизму обслуговуючого персоналу.

До недоліків конвеєрів слід віднести високі питомі капітальні вкладення і значні експлуатаційні витрати, пов'язані з непостійністю вантажопотоків у гірничо-збагачувальному виробництві та, відповідно, неповною та періодичною завантаженістю конвеєру. Тому на повну потужність цей вид транспорту може працювати тільки час від часу, коли всі гірничодобувні комплекси працюють з повним навантаженням.

У зв'язку із цим, для підвищення ефективності роботи конвеєра в умовах номінального одиничного завантаження породи, необхідно зменшувати швидкість його руху до ступеня, який забезпечить потрібну працездатність конвеєра. Виконання даної вимоги досягається роботою приводу високої продуктивності та з високим показником потужності. Зменшення швидкості руху конвеєра в таких умовах забезпечує істотне зниження кількості оборотів

стрічки, зменшення зносу деталей механічної частини конвеєра, зокрема самої стрічки, а також економію електроенергії.

Датчик завантаження конвеєра генерує попереджувальний сигнал, що призводить до зміни швидкості обертання двигуна конвеєра. При малих обсягах подачі руди на конвеєр, регулювання дає можливість отримати номінальне одиничне (погонне) завантаження на 1 метр рухомої частини конвеєра. По мірі зростання обсягів подачі руди, частотний перетворювач відповідно до обраного закону регулювання збільшує швидкість руху стрічки для збереження постійного одиничного завантаження. Такий регулюючий процес залежить від кількості вантажу, що транспортується по стрічці, і відбувається автоматично.

Оскільки регулювання швидкості руху конвеєра забезпечує його рівномірне завантаження, опір руху практично залишається постійним. Таким чином, приводи конвеєрів мають забезпечувати регулювання швидкості руху вантажонесучого органу зберігаючи постійний момент на його валу, тобто при постійному натягненні незалежно від діапазону регулювання швидкості. Зниження швидкості руху тягового органу впливає на скорочення частоти огинання стрічкою барабана конвеєра, в результаті чого збільшується термін його служби. Збільшення ресурсу стрічки, при цьому, майже пропорційне зменшенню її швидкості, що дуже важливо, враховуючи, що вартість стрічки конвеєра становить від 40 до 70% вартості установки. У тій же мірі підвищується зносостійкість і механічної частини конвеєрного устаткування.

Завдяки регульованому приводу стало можливим усунення пробуксування стрічки на приводному барабані, яке також має негативний вплив на її знос. Крім того, виключається можливість спалаху стрічки через пробуксовування, в результаті чого підвищується безпека використання конвеєра.

Одним з головних критеріїв ефективності роботи конвеєрного транспорту є мінімальний час простоїв гірничодобувних комплексів унаслідок виходу з ладу конвеєрної лінії. Тому особливо актуальним є завдання забезпечення її тривалої безвідмовної роботи.

Ще одне важливе завдання пов'язане зі зниженням граничних експлуатаційних витрат, які припадають на одиницю ваги вантажу, що транспортується. У межах автоматизації процесів це завдання вирішується завдяки мінімізації величини витрат електроенергії та зносу матеріальної частини конвеєра на одиницю вантажу.

Регулювання швидкості стрічки (швидкості приводу) дозволяє стабілізувати на оптимальному рівні погонне навантаження за критеріями енергозбереження. Також з'являється можливість синхронізації моментів надходження вантажу на конвеєр та його пуску-зупинки. Важливою перевагою також є можливість здійснювати «м'який пуск», що дозволяє знизити динамічні навантаження в елементах конвеєра. Для забезпечення оптимальних параметрів роботи в цьому випадку важливо отримувати інформація про дійсне завантаження кожної конвеєрної лінії.

Величина погонного завантаження конвеєрної стрічки та її швидкість нелінійно залежать від моменту опору сил тертя конвеєра, що працює. Робота конвеєра супроводжується великими втратами неробочого ходу в механічній системі. Тоді маємо, що потужність неробочого ходу двигуна буде нижче, якщо зменшиться швидкість конвеєрної стрічки, навіть попри те, що тягове зусилля збільшується обернено пропорційно зниженню швидкості.

Приймаючи до уваги нелінійну залежність, що пов'язує момент опору сил тертя та значення погонного навантаження, можна зробити висновок, що загальні втрати тертя скорочуються при зменшенні швидкості стрічки.

Також слід прийняти до уваги ті переваги, які надає використання перетворювачів частоти. Головні з них: підвищення довговічності та надійності роботи, як самого двигуна, так і конвеєрної системи внаслідок усунення значних механічних моментів та струмів, що пов'язані з прямим запуском двигунів від мережі; зменшення електродинамічних зусиль та теплових ударних навантажень.

6.2 Економічне обґрунтування впровадження частотно-регульованого електроприводу конвеєрної лінії

Для регулювання швидкості та рівномірного завантаження конвеєра передбачається використання частотного перетворювача виробництва компанії Schneider Electric Altivar 61 типу ATV 61 HD55 N4.

6.2.1 Визначення величини капіталовкладень

Реальні інвестиції (капітальні вкладення) у даний проект включають вартість обладнання, витрати на його доставку, монтаж і пусконаладжувальні роботи та розраховуються за формулою:

$$K = B_{обл} + B_{д} + B_{м} + B_{пн} \quad (6.1)$$

де K – розмір капітальних вкладення у проект, грн.

$B_{обл}$ – вартість обладнання (частотного перетворювача), грн. За даними фірми-виробника, вартість пристрою складає 255600 грн.);

$B_{д}$ – вартість доставки (може прийматися у розмірі 10% від вартості обладнання), грн.;

$B_{м}$ – вартість монтажних робіт (може прийматися у розмірі 35% від вартості обладнання), грн.

$B_{пн}$ – вартість пусконаладжувальних робіт, грн. (може прийматися у розмірі 15% від вартості обладнання).

$$K = 255600 + 255600 \cdot (0,1 + 0,35 + 0,15) = 408960 \text{ грн} \quad (6.2)$$

6.2.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Розрахунок річних експлуатаційних витрат виконаємо для двох варіантів: базового, який передбачає роботу конвеєра без регулювання швидкості обертання двигуна, та нового - з використання частотнорегульованого електроприводу, призначеного для регулювання швидкості і рівномірного завантаження конвеєра. Розрахунку включає лише ті статті витрат, які відрізняються у порівнюваних варіантах.

Для розрахунку кошторису експлуатаційних річних витрат розглядаються наступні статті:

- величина додаткової та основної заробітних плат експлуатаційних робітників;
- поточні ремонти;
- величина витрат експлуатаційних матеріалів;
- аварійні ремонти;
- величина амортизаційних відрахувань;
- інші витрати.

Річна трудомісткість експлуатаційних робіт в базовому варіанті складає 620 нормо-год. В новому варіанті, за рахунок автоматизації процесів управління роботи електродвигунів, трудомісткість експлуатаційних робіт зменшується на 20% и складає 496 нормо-год. До неї необхідно додати трудомісткість обслуговування додаткового обладнання - частотного перетворювача, яка становить 48 нормо-год. Таким чином, значення загальної трудомісткості експлуатаційних робіт для оновленого варіанту становить 544 нормо-год. на рік.

Величина додаткової та основної заробітної плата експлуатаційних робітників з врахуванням відрахуваннями на соціальні потреби визначається за формулою:

$$Z_{\text{екс}} = Q_{\text{мо}} \cdot l_c \cdot K_{\text{д}} \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100}\right), \quad (6.3)$$

де $Q_{\text{мо}}$ – річна трудомісткість експлуатаційних робіт, нормо-год;

l_c – середньогодинне значення тарифної ставки для експлуатаційних робітників, грн/год;

K_o – коефіцієнт додаткової заробітної плати (можна прийняти $K_o = 1,1-1,2$);

H – процент єдиного соціального внеску.

$$Z_{\text{екс.баз}} = 620 \cdot 55,62 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 46278 \text{ грн};$$

$$Z_{\text{екс.нов}} = 544 \cdot 55,62 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 40605 \text{ грн}.$$

Значення вартості експлуатаційних матеріалів можна орієнтовно прийняти у розмірі 25% від заробітної плати експлуатаційних робітників:

$$Z_{\text{мат.баз}} = 0,25 \cdot 46278 = 11570 \text{ грн};$$

$$Z_{\text{мат.нов}} = 0,25 \cdot 40605 = 10151 \text{ грн}.$$

Витрати на поточний ремонт обладнання враховують основну та додаткову заробітну плату ремонтних робітників з відрахуваннями в соціальні потреби:

$$Z_p = 0,8 \cdot Q_p \cdot l_{cp} \cdot K_o \left(1 + \frac{H_{\text{соц}}}{100}\right) \quad (6.4)$$

де 0,8 – значення коефіцієнту, що показує, яку частину становлять поточні ремонти у загальній кількості ремонтних робіт;

Q_p – значення річної трудомісткості ремонтних робіт (береться за нормативами системи ПЗР (табл. 6.1)), нормо-год.;

l_{cp} – значення середньогодинної тарифної ставки ремонтних робітників, грн./год.

$$Z_{p.\text{баз}} = 0,8 \cdot 1543 \cdot 68,74 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 113872 \text{ грн}$$

$$Z_{p.\text{нов}} = 0,8 \cdot 745,4 \cdot 68,74 \cdot 1,1 \cdot \left(1 + \frac{22}{100}\right) = 50010 \text{ грн}$$

Вартість ремонтних матеріалів та запасних частин може бути прийняті в розмірі 60% від Z_p :

$$Z_{\text{рем матб}} = 0,6 \cdot 113872 = 68323 \text{ грн} \quad (6.5)$$

$$Z_{\text{рем матн}} = 0,6 \cdot 50010 = 30006 \text{ грн}$$

Таблиця 6.1 - Розрахунок трудомісткості ремонтних робіт

Назва елементів схеми	Кіль- кість, шт.	Тривалість, міс			Структура ремонтного циклу			Трудомісткість, нормо-год.							
								нормативна			за ремонтний цикл			річна	
		$T_{p.ц}$	$T_{p.n}$	$T_{o.n}$	n_k	n_m	n_o	Q_k^H	Q_m^H	Q_o^H	Q_k	Q_m	Q_o	Q^Σ	Q_p
Базовий варіант															
Асинхронний двигун 55 кВт АИР225S4	1	60	6	0	1	10	0	325,0	174,0	0,0	325,0	1740,0	0,0	2065,0	413,0
Конвеєрна установка 900м	1	24	4	0	1	5	0	560,0	340,0	0,0	560,0	1700,0	0,0	2260,0	1130,0
Всього															1543,0
Новий варіант*															
Асинхронний двигун 55 кВт	1	108	9	0	1	11	0	325,0	174,0	0,0	325,0	1914,0	0,0	2239,0	249,0
Конвеєрна установка 900м	1	60	12	0	1	4	0	560,0	340,0	0,0	560,0	1360,0	0,0	1920,0	384,0
Пристрій Altivar 61	1	120	24	6	1	4	16	295,0	148,0	14,8	295,0	592,0	236,8	1123,8	112,4
Всього															745,4

* В новому варіанті, за рахунок встановлення частотного перетворювача тривалість ремонтного циклу та міжремонтного періоду може бути збільшена без зміни рівня надійності системи.

Як показали виконані вище розрахунки, добове споживання електроенергії конвеєрною установкою в базовому варіанті складає 1178 кВт год., а при використанні частотно-регульованого електроприводу конвеєру воно зменшиться до 874 кВт год. Вартість спожитої електроенергії за рік може бути визначено за наступною формулою:

$$B_{ел.} = b \cdot Wh \cdot 250 \quad (6.6)$$

де b – діючий тариф на електроенергію, грн/кВт год ;

Wh – добове споживання електроенергії насосною установкою, кВт год;

$$B_{ел.баз} = 4,29 \cdot 1178 \cdot 250 = 1263405 \text{ грн} ;$$

$$B_{ел.баз} = 4,29 \cdot 874 \cdot 250 = 937365 \text{ грн} .$$

Амортизаційні відрахування визначають за капіталовкладеннями в елементи системи та річною нормою амортизації $H_{a\%}$ яка складає 15%.

$$A_{рн} = \frac{K \cdot H_{a\%}}{100} = \frac{408960 \cdot 15}{100} = 61344 \text{ грн} \quad (6.7)$$

Інші витрати на утримання системи можуть бути прийняті в розмірі 10% від $З_p$.

$$I_{нб} = 0,1 \cdot 113872 = 11387 \text{ грн}$$

$$I_{нн} = 0,1 \cdot 50010 = 5001 \text{ грн}$$

У табл.6.2. представлено кошторис експлуатаційних річних витрат за варіантами, що порівнюються.

Таблиця 6.2 - Кошторис експлуатаційних річних витрат

№ з/п	Стаття витрат	Витрати, грн	
		Базовий	Новий
1.	Основна та додаткова заробітна плата експлуатаційних робітників з відрахуваннями	46278	40605
2.	Вартість експлуатаційних матеріалів	11570	10151
3.	Поточні ремонти	182195	80016
4.	Вартість спожитої електроенергії	1263405	937365
5.	Амортизаційні відрахування	-	61344
6.	Інші витрати	11387	5001
	Всього	1514835	1134482

6.2.3 Розрахунок показників економічної ефективності

В основі оцінки ефективності проектних рішень та вибору кращого варіанту лежать такі принципи [36, с. 94]:

- зіставлення грошового потоку від реалізації проекту із вкладеннями, необхідними на його виконання;
- ставки дисконту, за якими здійснюється дисконтування грошових потоків, показують альтернативну вартість капіталу;
- здійснюється приведення потоку грошей та інвестиційного капіталу до єдиного року, що вибирається як розрахунковий.

Потім оцінюється додатковий потік грошей від впровадження проекту. Прийнято вважати інвестиційні вкладення доцільними, якщо грошовий потік забезпечує повернення початкової суми та необхідну віддачу на вкладений капітал.

На практиці, для прийняття інвестиційних рішень, прийнято користуватися показником ЧТВ (чиста теперішня вартість), який ще називають чистою дисконтованою вартістю.

Цей показник розраховується наступним чином [36, с. 96]:

$$ЧТВ = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - Z_t}{(1 + i / 100)^t} - K, \quad (6.8)$$

де B_t і Z_t – відповідно повні вигоди та експлуатаційні витрати за рік t ;

t – відповідний рік проекту (1, 2, 3, ... n);

n – строк служби проекту, років.

i – ставка дисконту ;

K – капіталовкладення в проект.

У зв'язку з тим, що в порівнюваних варіантах витрати за проектами можна легко визначити, а виразити вигоди в грошових одиницях досить складно критерій ЧТВ може бути обчислено дуже приблизно і неточно.

Тому, у якості критерію прийняття рішення, варто прийняти *показник еквівалентних річних витрат (EPB)*, який оцінює проекти лише за витратами. Користуватися цим показником доцільно, коли для прийняття рішення, буває вкрай складно або зовсім неможливо оцінити додаткові грошові надходження. Крім того, він застосовується, коли існуючі альтернативні підходи орієнтовані на отримання одного й того ж результату. З проектів, що мають однаковий бажаний результат, вибирається проект з найменшими витратами.

Еквівалентні річні витрати розраховуються за формулою [36, с. 106]:

$$EPB = \frac{K + \sum_{t=1}^n \frac{Z_t}{(1 + i / 100)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{1}{(1 + i / 100)^t}} \quad (6.9)$$

де $1/(1+i/100)^t$ – фактор теперішньої вартості для значень i й t (для його визначення можна скористатися його табличним значенням [36, с. 306]).

Строк служби порівнюваних проектів складає 10 років, а ставку дисконту може бути прийнято на рівні 9%.

Так еквівалентні річні витрати становлять:

$$EPB_{баз} = \frac{0 + 1514835 \cdot 6,416}{6,416} = 1514835 \text{ грн.};$$

$$EPB_{нов} = \frac{408960 + 1134482 \cdot 6,416}{6,416} = 1198223 \text{ грн.}$$

Показники приведених витрат за порівнюваними варіантами наведено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. – Приведені витрати за варіантами

Найменування	I (без регулювання базовий) варіант	II (з регулюванням новий) варіант
Капіталовкладення, грн	0	408960
Річні експлуатаційні витрати, грн	1514835	1134482
Еквівалентні річні витрати EPB , грн	1514835	1198223

Розрахунки показують, що зниження експлуатаційних витрат дозволило, в достатньо короткий термін, окупити додаткові капітальні вкладення. Цей термін розраховується за формулою (6.10):

$$T_{ок} = \frac{K}{B_{баз} - B_{нов}} = \frac{408960}{1514835 - 1190047} = 1,3 \text{ років} \quad (6.10)$$

Висновки: Як показали розрахунки, впровадження на підприємстві частотно-регульованого приводу асинхронних двигунів конвеєрної установки є економічно обґрунтованим. Величина річної економії експлуатаційних витрат від запропонованих заходів складає 316612 грн., а період окупності капіталовкладень 1,3 років.

Даний пристрій крім економії електроенергії, дозволяє зменшити механічні перенавантаження двигуна, збільшити строк служби конвеєрної стрічки і роликів опор, що позитивно вплине на надійність та продуктивність роботи обладнання.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено дослідження підвищення ефективності функціонування конвеєрних ліній гірничо-збагачувального виробництва.

Головну увагу приділено найбільш ефективному напрямку, а саме застосуванню регульованого електропривода, до основних переваг якого відноситься економія електроенергії при регулюванні швидкості руху стрічки при зміні навантаження та підвищення механічної міцності і довговічності, як самого двигуна, так і конвеєра в цілому.

Розроблено загальну схему системи безперервного регулювання швидкості стрічки конвеєра та узагальнену структурну схему системи автоматичного керування погонним навантаженням конвеєрної установки.

На підставі розробленої схеми системи стабілізації погонного навантаження конвеєра, проведено моделювання системи керування навантаженням стрічкового конвеєру в бібліотеці Simulink обчислювального середовища MATLAB.

Як видно з результатів моделювання, завантаження стрічкового конвеєра на усьому проміжку часу близьке до номінального. А це означає, що він працює в енергоефективному режимі, що дозволяє збільшити його продуктивність та довготривалість роботи.

Для конвеєра було виконано розрахунок економічного ефекту від впровадження частотного перетворювача. Як показали розрахунки, впровадження на підприємстві частотно-регульованого приводу асинхронних двигунів конвеєрної установки є економічно обґрунтованим. Величина річного економічного ефекту від запропонованих заходів складає 316,6 тис. грн., а період окупності капіталовкладень 1,3 роки.

Даний захід, крім економії електроенергії, дозволяє зменшити механічні перенавантаження двигуна, збільшити строк служби конвеєрної стрічки і роликів опор, що позитивно вплине на надійність та продуктивність роботи обладнання. Можна зробити загальний висновок по роботі: застосування регульованого електроприводу АД конвеєрів забезпечує виконання технологічних вимог та одночасно дозволяє вирішувати завдання енергозбереження.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок., видання третє, перероблене і доповнене. Мінпаливенерго 2010 р. -736 с.
2. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів / Державний нормативний акт про охорону праці, Київ 1998.
3. И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков Энергосберегающий асинхронный электропривод.-М.:Издательский центр „Академия”, 2004.
4. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник.-К:Кондор, .-408 с.2005
5. Папоян Р.Л. Регулирование скорости шахтных конвейеров. Горные машины и автоматика. “Недра”, 64,1965.
6. Папоян Р.Л. Повышение эффективности использования шахтных конвейерных линий автоматическим регулированием скорости и определением грузопотоков. Кандидатская диссертация, М., 1967, 213 с.
7. Полунин В. Т., Папоян Р. Л. Эффективность регулирования скорости шахтных конвейеров. Научные труды МГИ, № 5. – М. – 1965.
8. Солод Г.И. О технологических предпосылках автоматизации конвейеров и конвейерных линий в горнодобывающей промышленности. Сб. Транспорт горных предприятий. М., 1963.
9. Солод Г.И., Папоян Р.Л. Основные технические и технологические предпосылки автоматизации шахтных конвейеров с регулируемой скоростью. Сб. Механизация и автоматизация рудничного транспорта. Вып. 17, “Недра”, 1965.
10. А.И.Благодарый, О.З.Гусев, Автоматизированная система контроля и управления ленточными конвейерами на угольных шахтах, Журнал Горная промышленность No 26-2008. С 38-44.
11. Алотин Л.М. и др. Методы исследования и математическое описание подземных грузопотоков для расчета систем внутри- шахтного транспорта, КНИУИ, Караганда, 1971, 48 с.

12. Нгуен Монг Хунг. Исследование режимов работы забойных скребковых конвейеров и установление некоторых параметров их в зависимости от условий эксплуатации. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н., М. 1969.
13. Шаходжаев Д.М. Применение осредняющих бункеров и регулирование скорости конвейеров для повышения степени использования, Диссертация представленная на соискание ученой степени к.т.н. М., 1965.
14. Пономаренко В.А., Калюжная Н.В., Овчинникова И.К. Неравномерность подземных грузопотоков и их характеристика, Сб. "Рудничный транспорт", М., "Недра", 1968.
15. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г., Лобачева А.К. Динамика грузопотока и регулирование скорости ленточных конвейеров. УШ, 1972, 163 с.
16. Алотин Л.М., Мерцалов Р.В., Краус Э.Г. К вопросу о целесообразности регулирования скорости конвейеров в условиях шахт Карагандинского бассейна. Сб. "Механизация и автоматизация рудничного транспорта", вып. 17, КНИУИ, Недра, 1965.
17. Реутов А.А. Оптимизация приводов типовых ленточных конвейеров при неопределенности трассы [Текст]/ А.А.Реутов // Горный информационноаналитический бюл. – М.: Изд-во МГГУ, 2008. - №7. – С.338-341.
18. Лобачева А.К. Исследование и установление параметров и способов регулирования скорости ленточных конвейеров в зависимости от забойного грузопотока. Кандидатская диссертация, М., 1970, 249 с.
19. Мерцалов Р.В. Исследование подземных грузопотоков и установление способов повышения эффективности использования шахтных конвейеров. Диссертация, представленная на соискание ученой степени, к.т.н. Караганда, 1968.
20. Бишеле И.В., Нгуен Мояг Хунг, Выбор рациональных ступеней регулирования скорости конвейеров в зависимости от грузопотоков. Горные машины и автоматика, №2, 1969.

21. Масленко В. О., Оголобченко А. С. Устройство управления аккумулярующим бункером в системе автоматизации конвейерной линии/ Сборник научных статей межрегиональной молодежной научной конференции СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ- 2007. – Ухта: УГТИ, 21–23 марта 2007. – С. 43–46.
22. Глянь Д. В., Оголобченко А. С. Обоснование способа автоматического управления участковой конвейерной линией с накопительным бункером многопоточной конвейерной системы / Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных работ XV международной научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 20–22 мая 2015 г. – Донецк: ДонНТУ, 2015.
23. Овсянников Ю. А., Кораблев А. А., Топорков А. А., Автоматизация подземного оборудования: Справочник рабочего. – М.: Недра, 1990. – 287с.
24. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608с.
25. Нгуен Монг Хунг. Статистические исследования грузопотоков угля в лавах Донбасса. Сб. научных трудов МГИ, 1968
26. Вычислительная техника. Справочник, тт.1.2. Под редакцией Г.Д. Хаски и Г.А. Корна. Энергия, М.Л, 1964.
27. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. ГИФИЛ, М., 1960.
28. Пономаренко В.А. Научные основы определения резервов пропускной способности и оптимизация систем подземного транспорта угольных шахт. Докт. диссертация, Донецк, 1965, 326 с.
29. Романюха И.Е. Исследование грузопотоков карьерных ленточных конвейеров. канд. диссертация, Днепропетровск, 1971, 169 с.
30. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин. М., Машиностроение, 1983, 256 с.
31. Спиваковский А.О., Дмитриев В.Г. Теория ленточных конвейеров. М., Наука, 1982, 192 с
32. Кожубаев Ю.Н., Прокофьев О.В., Филимонов В.И. Моделирование поточно-транспортной системы ленточных конвейеров. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование 3, 2010. С.73-78

- 33.Волотковский В.С., Нохрин Е.Г., Герасимова М.Ф. Износ и долговечность конвейерных лент. М., "Недра", 1976
- 34.Енергозбереження. Методи визначення норм витрат електроенергії гірничими підприємствами: ДСТУ 3224-95 – Введ. 1997-07-01. – Київ: Мінвуглепром, 2006. – 88 с.
- 35.Шахмейстер Л.Г. Тяговые расчеты ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев – М. [МГИ], 1969. – 108 с. с.
- 36.Верба В.А, Загородніх О.А. Проектний аналіз: Підручник. Київ: КНЕУ, 2000. 332 с.
37. Ставицкий В.Н. Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера / В.Н. Ставицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк : [ДонНТУ], 2011. – Випуск 20 (182). – С. 58 – 65.
- 38.Разумний Ю.Т. Эффективное використання електроенергії та палива: Навчальний посібник / Ю.Т. Разумний, А.В. Рухлов, В.М. Прокуда, Н.Ю. Рухлова; м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д: [НГУ], 2014. – 223 с. 117.
- 39.Герман-Галкин С.Г. Matlab-Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА – Век, 2008. – 368 с.
- 40.Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.
- 41.Комплектный автоматизированный электропривод. Экономичность и производительность. [Электронный ресурс]; URL: <http://www.privodi.ru>
42. Типовой электропривод промышленных установок. – С.А.Волотковский, В.И. Емец, В.К.Козло и др. – Под общей редакцией С.А.Волотковского. – Киев.: – Вища школаю. Головное издательство, 1983.-312 с.
- 43.Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск 26. Выбор устройств плавного пуска Altistart и преобразователей частоты Altivar.
- 44.Киселев, Б.Р. Ленточный конвейер. Расчет и проектирование основных узлов: учеб. пособие/ Б.Р. Киселев, М.Ю. Колобов; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.– Иваново, 2019. – 179 с.

ДОДАТОК А
ЗВІТ ПОДІБНОСТІ