

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

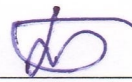
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 15 »

06

2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології

(назва освітньої програми)

на тему: «Система автоматизованого керування скребкового конвеєра
гірничого підприємства»

Виконав: студент IV курсу, групи 4311

Калініченко Дмитро Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

доц. каф. автоматики, к.т.н., доц. Васильєв О.Г.

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

Нормоконтроль

Ст. викладач каф. автоматики, Савченко О.В.

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

Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

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

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

Студент

(підпис)

м. Миколаїв – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми, к.т.н. доцент

О.Г. Васильєв

«12» 06 2026_ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

Студенту гр.4311

Калініченку Дмитру Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Система автоматизованого керування скребкового конвеєра гірничого підприємства»

керівник роботи Васильєв Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 р.

№ 286-УЧ.

2. Строк подання студентом роботи 16 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: скребковий конвеєр, продуктивність - 400 тонн/год;
потужність електродвигуна 55 кВт; основні показники якості перехідного процесу:
перерегулювання $\sigma < 15 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} \leq 2$ с; $N \leq 2$, похибка $\varepsilon = 0$.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Опис та робота скребкового конвеєра гірничого підприємства. 2 Вибір типу електродвигуна та комплектного електропривода. 3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода скребкового конвеєра. 4 Охорона праці при експлуатації електропривода скребкового конвеєра

5. Перелік графічного матеріалу

1 Скребковий, пересувний, шахтний конвеєр СПЦ163. 2 Функціональна схема замкнутої системи ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням. 3 Схеми системи керування електропривода. 4 Аналіз динаміки САК

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Васильєв О.Г., к.т.н., доцент	06.05.26 <i>Васильєв</i>	08.06.26 <i>Васильєв</i>

7. Дата видачі завдання «06» лютого 2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис та робота скребкового конвеєра гірничого підприємства	17.03.2026	
2	Вибір типу електродвигуна та комплектного електропривода	08.04.2026	
3	Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода скребкового конвеєра	06.05.2026	
4	Охорона праці при експлуатації електропривода скребкового конвеєра	09.06.2026	

Студент

Калініченко
(підпис)

Калініченко Д.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Васильєв
(підпис)

Васильєв О.Г.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 66 сторінок: з 59 сторінок тексту, 4 розділів, 6 таблиць, 14 рисунків, 16 літературних джерел, 1 додатку на 7 сторінках.

Ключові слова: аналіз динаміки, математична модель, скребковий конвеєр, тиристорний перетворювач, транспортуючі машини, система керування.

Об'єкт дослідження – система керування електропривода скребкового вибійного конвеєра типу СПЦ163.

Мета роботи – вибір найкращих параметрів налагодження регуляторів системи керування електропривода скребкового конвеєра та дослідження її динамічних властивостей.

У першому розділі розглянуті класифікація транспортуючих машин, устрій і принцип роботи скребкових конвеєрів.

У розділі 2 проведений вибір типу електродвигуна та комплектного електропривода. Зроблений огляд існуючих систем керування електропривода для конвеєрів, вибраний перетворювач серії VFD-VL з частотно-струмовою системою керування, наведені його технічні дані.

В розділі 3 зроблений математичний опис елементів системи керування, проведені розрахунки їх параметрів, складена розрахункова динамічна модель системи керування та проведений аналіз її динамічних властивостей.

В результаті досліджень отримані перехідні характеристики системи частотно-струмового керування асинхронним двигуном з такими показниками якості системи керування, які задовольняють вимогам до електроприводів транспортуючих механізмів.

В розділі 4 розглянуті питання з охорони праці при експлуатації електропривода скребкового конвеєра.

Додаток містить 7 слайдів мультимедійної презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОПИС ТА РОБОТА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА ГІРНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА	8
1.1 Класифікація транспортуючих машин, устрій і принцип роботи скребкових конвеєрів	8
1.2 Опис та основні технічні характеристики скребкового вибійного конвеєра типу СПЦ163.....	12
1.3 Існуюча система керування	14
2 ВИБІР ТИПУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА	17
2.1 Вибір електродвигуна	17
2.2 Огляд існуючих систем керування електропривода для конвеєрів...	20
2.3 Електропривод на базі перетворювача серії VFD-VL	27
3 АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА	31
3.1 Принцип роботи електропривода.....	31
3.1.1 Математичний опис структурної схеми електропривода з частотно- струмовим керуванням.....	33
3.2 Розрахунок параметрів регуляторів електропривода з частотно- струмовим керуванням.....	41
3.3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода скребкового конвеєра	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА	51
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації системи керування електропривода скребкового конвеєра	51
4.1.1 Дія та наслідки ураження електричним струмом.....	51
4.1.2 Шум та вібрації при експлуатації системи керування скребкового конвеєра	53

4.2 Захист від шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації системи керування скребкового конвеєра	54
ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	58
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація	60

ВСТУП

Мінерально-сировинна база України – одна з найбагатших у світі за номенклатурою корисних копалин (120 видів) – представлена паливними (вугілля, нафта, газ, горючі сланці, торф), металевими (залізо, марганець, нікель, титан, уран, хром, золото) і неметалевими (кам'яна сіль, каолін, вогнетривкі глини, цементна сировина, флюси, вапняки) корисними копалинами. Такого обсягу достатньо для розвитку в країні галузей промисловості, орієнтованих на використання власної сировини.

Автоматизація технологічного процесу видобутку вугілля є одним з основних напрямків розвитку сучасної вуглевидобувної промисловості. Від рівня розвитку засобів автоматизації й від загального науково-технічного рівня всієї галузі гірської промисловості залежить ефективність процесу видобутку вугілля та руди в шахтах, безпека обслуговуючого персоналу машин і механізмів, надійність і безаварійність експлуатації встаткування.

Інтенсифікація гірських робіт на вугільних шахтах за допомогою високопродуктивних вуглевидобувних комплексів по безупинній потоковій системі сприяє ефективному застосуванню шахтного транспорту: локомотивного, конвеєрного, самохідного.

Одним з основних технологічних процесів гірничого підприємства є транспортування корисних копалин. При цьому головним засобом доставки вугілля до шахтного стовбура залишаються конвеєри, які найбільш адаптовані до умов функціонування очисного механізованого комплексу.

Скребкові конвеєри є складовою, невід'ємною частиною сучасного гірничо-технологічного процесу, вони встановлюють і регулюють темп виробництва, забезпечують його ритмічність, сприяють підвищенню продуктивності праці й збільшенню випуску продукції, а головне скребковий конвеєр є основним засобом транспортування гірської маси в очисному забої шахти.

Для провідних вуглевидобувних шахт характерне підвищення ступеня концентрації гірських робіт, зростання навантаження на очисний забій при скороченні їх числа й одночасному збільшенні довжини й швидкості просування.

Усі ці причини обумовлюють підвищення навантаження на забійний скребковий конвеєр. Як наслідок, розробляються й впроваджуються у виробництво скребкові конвеєри все більшої довжини й з могутнішими приводами.

Електроприводи ряду гірських машин для відкритих гірських робіт, електроприводи шахтних електровозів і деякі інші будуються на базі регульованих двигунів постійного струму, однак більша частина електроприводів гірських машин будується на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором через їх більшу надійність, простоту обслуговування, менші габарити та інші переваги.

Особливістю роботи конвеєрів є нерівномірність режимів роботи й навантажень. Підтримка рівномірності навантажень двигуна й швидкостей стрічки повинна здійснюватися безперервним регулюванням, що можливо тільки у випадку застосування систем регульованого електропривода.

Застосування дистанційного автоматизованого керування конвеєрними лініями підвищує надійність і ефективність їхньої роботи і зменшує чисельність обслуговуючого персоналу, забезпечує раціональні режими роботи всіх вузлів конвеєрів, скорочення часу пуску й зупинки конвеєрної лінії, зниження витрати електроенергії й простоїв устаткування.

У цей час спостерігається інтенсифікація процесу впровадження частотно-регульованих асинхронних електроприводів у машини гірничодобувного виробництва.

Силові перетворювачі є найбільш специфічними елементами автоматизованого привода. В даний час застосовують електроприводи з керованими тиристорними випрямлячами або транзисторними широтно-імпульсними перетворювачами. Схеми керування і підсилювачі будуються з застосуванням мікроелектроніки, що дозволяє одержати порівняно малогабаритні приводи з розширеними технічними можливостями.

Метою даної кваліфікаційної роботи бакалавра є модернізація системи керування електропривода скребкового конвеєра гірничого підприємства.

РОЗДІЛ 1

ОПИС ТА РОБОТА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА ГІРНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Класифікація транспортуючих машин, устрій і принцип роботи скребкових конвеєрів

Транспортуючими машинами називають машини, які застосовують на підприємствах системи заготівки для переміщення сировини, напівфабрикатів, готової продукції й відходів виробництва.

Конвеєри класифікують по галузі застосування, по способу передачі переміщуваного вантажу рушійної сили, по характеру застосування рушійної сили, по роду переміщуваних вантажів, по призначенню й положенню на виробничому майданчику.

На гірничих підприємствах застосовують такі види конвеєрів:

- стрічкові;
- стрічково-канатні;
- скребкові;
- пластинчасті [7,8].

До скребкових конвеєрів відносяться різноманітні по конструкції транспортуючі машини, в яких вантаж переміщається волочінням по нерухомому відкритому або закритому жолобу або трубі прямокутного або круглого перерізу за допомогою скребків, що рухаються, прикріплених до тягового елемента.

По способу передачі рушійної сили вантажні конвеєри бувають: механічні; самопливні (гравітаційні), у яких вантаж переміщається під дією власної сили ваги та пневматичні, у яких рушійною силою є потік повітря.

По характеру прикладення рушійної сили – з тяговим елементом (стрічкою, ланцюгом, канатом і ін.) і без нього (гвинтові, інерційні, роликові та ін.).

По роду переміщуваних вантажів розрізняють конвеєри для транспортування:

- насипних матеріалів (стрічкові, пластинчасті, ковшові, скребкові, гвинтові

конвеєри, ковшові елеватори, транспортуючі труби);

- штучних (стрічкові, пластинчасті, візкові, колискові, підвісні, роликові, крокові конвеєри, колискові елеватори);

- людей (стрічкові й пластинчасті конвеєри, ескалатори).

Залежно від умов використовують конвеєри підлогові і підвісні. Підлогові конвеєри можуть бути стаціонарними, пересувними або переносними.

Класифікація скребкових конвеєрів відносно призначення наведена в таблиці 1.1 [2,7].

Таблиця 1.1 - Класифікація скребкових конвеєрів відносно призначення

Призначення	- для використання в рудних або вугільних шахтах використовуються підземні конвеєри; - застосовувані на навантажувальних гірських машинах, у бункерах – конвеєри скребкові спеціального призначення; - конвеєри загального призначення – на поверхні шахт
Спрямованість функцій, що виконуються	- застосовувані для спуска вугілля під посиленням похилим кутом – гальмові конвеєри; - доставочні скребкові конвеєри – призначені винятково для транспортування; - агрегатні конвеєри – використовуються разом з іншим устаткуванням і виконують додаткові функції
Тип тягового органа	- ланцюг із круглою ланкою; - ланцюг з роликовтулочною ланкою; - з розбірним ланцюгом
Вид привода	електричний; пневматичний; гідравлічний
Спосіб переміщення пристрою	- пересувні – переміщуються по всій довжині без необхідності розбирання ставу або частинами з можливістю вигину рештаків. Рештаки в такій конструкції кріпляться між собою стрижнями; - переносні – необхідне складання й розбирання конструкції. Кріплення рештаків виконане у вигляді легкорозбірного з'єднання

Скребкові конвеєри знайшли широке застосування на вугільних шахтах, що розробляють горизонтальні і похилі шари будь-якої потужності, для доставки

вугілля з очисних вибоїв. Вони застосовуються також для доставки вугілля по просіках і печам, по проміжних штреках і з вибоїв підготовчих вироблень. По них можна транспортувати також кріпильні матеріали в очисної вибій з вентиляційного і відкаточного штреків.

Транспортуючий механізм скребковий конвеєр (англ. flight conveyor) є пристроєм безперервної дії для переміщення навалочних вантажів, таких як вугілля, руда, пісок або зерно, вантажі можуть бути кускові або пилоподібні.

Рух у цих конвеєрах здійснюється за допомогою шкребків, укріплених на рухливих тягових ланцюгах і опущених у вантаж, який перебуває в жолобі-рештаку, закріпленому нерухомо. Основними елементами механізму скребкових конвеєрів є: приводна станція; тяговий орган (ланцюги); жолоби; кінцева головка; став; шкребки.

Рисунок 1.1 демонструє принцип дії скребкового конвеєра.

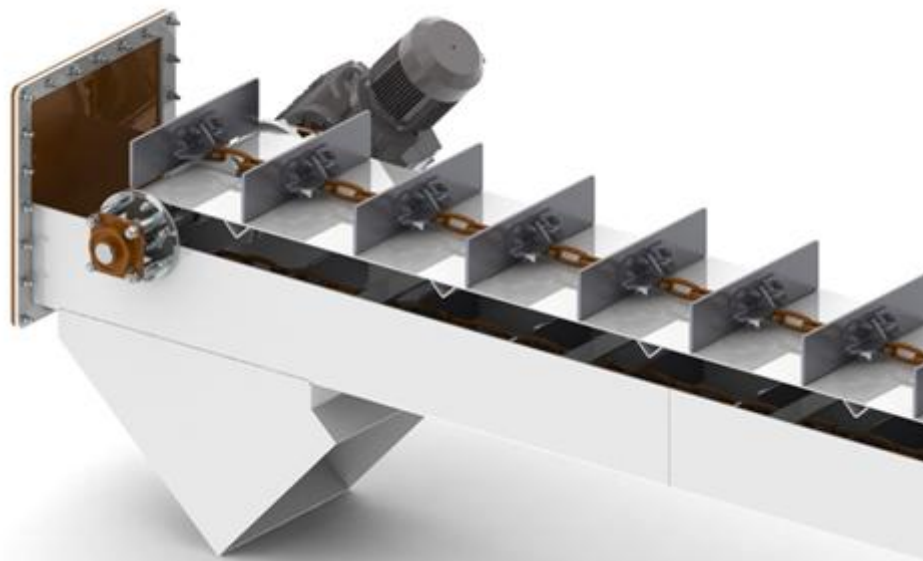
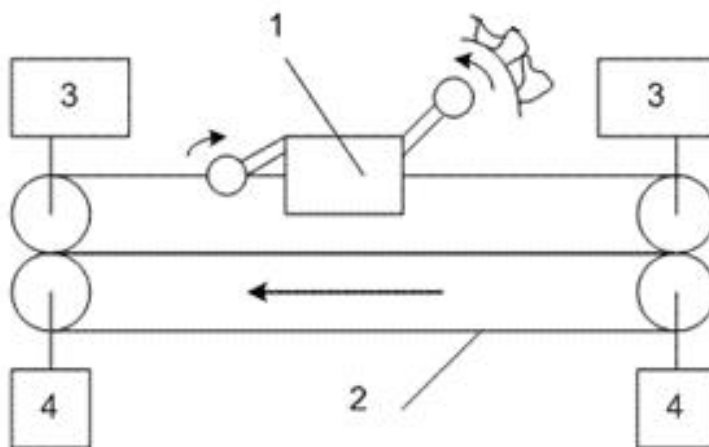


Рисунок 1.1 - Принцип дії скребкового конвеєра

На рисунку 1.2 показана спрощена структурна схема технологічного процесу транспортування вугілля по очисному забою. На ньому показаний очисний комбайн, що здійснює вилучення вугілля, яке потім попадає на скребковий конвеєр і переміщається на ньому до перевантажувача, що перебуває на штреку.



1 -очисний комбайн; 2 - скребковий конвеєр;

3 - приводи комбайна; 4 - приводи конвеєра

Рисунок 1.2 - Спрощена структурна схема технологічного процесу транспортування вугілля по очисному забою

Скребкові конвеєри транспортують насипні вантажі волочінням по нерухомому жолобу за допомогою тягового органу, що складається з однієї або декількох ланцюгів з закріпленими на них перегородками – скребками, зануреними в шар насипного вантажу. Занурившись, та рухаючись уздовж жолоба, скребки переміщують вантаж у потрібному напрямку.

Основне призначення скребкових конвеєрів – доставка корисних копалин по очисному вибою в вугільних шахтах.

Достоїнство скребкових конвеєрів: можливість швидкого переміщення конвеєра в міру просування вибою, простота конструкцій і висока механічна міцність, що допускає обвалення вугілля безпосередньо на конвеєр, можливість руху виймальної машини по конвеєрі, велика висота навалювання, надійна робота при різних кутах нахилу, можливість механізованої пересувки конвеєра без розбирання.

Недоліки: висока метало- й енергоємність, значне здрібнювання вугілля, швидкий знос ланцюгів і рештаків, можливість заклинювання ланцюгів на зірочках.

У порівнянні із пластинчастими або ковшовими конвеєрами, при однаковій

продуктивності, а також рівній висоті й довжині транспортувальної стрічки, скребкові конвеєри мають більш високе значення потужності привода, оскільки в даному типі транспортера існує опір тертя безпосередньо шкребка й самого вантажу по стінках та дну жолоба.

Основні параметри сучасних конвеєрів: максимальна продуктивність 300-990 т/год. при швидкості руху тягового органу 1-1,5 м/с; сумарна потужність приводів 220-330 кВт; довжина по горизонталі до 350 м; кут нахилу до 30°.

В Україні конвеєри випускають Дніпропетровський завод будівельних машин, Львівський конвеєробудівний завод, Харківський завод «Світло шахтаря» та інші підприємства.

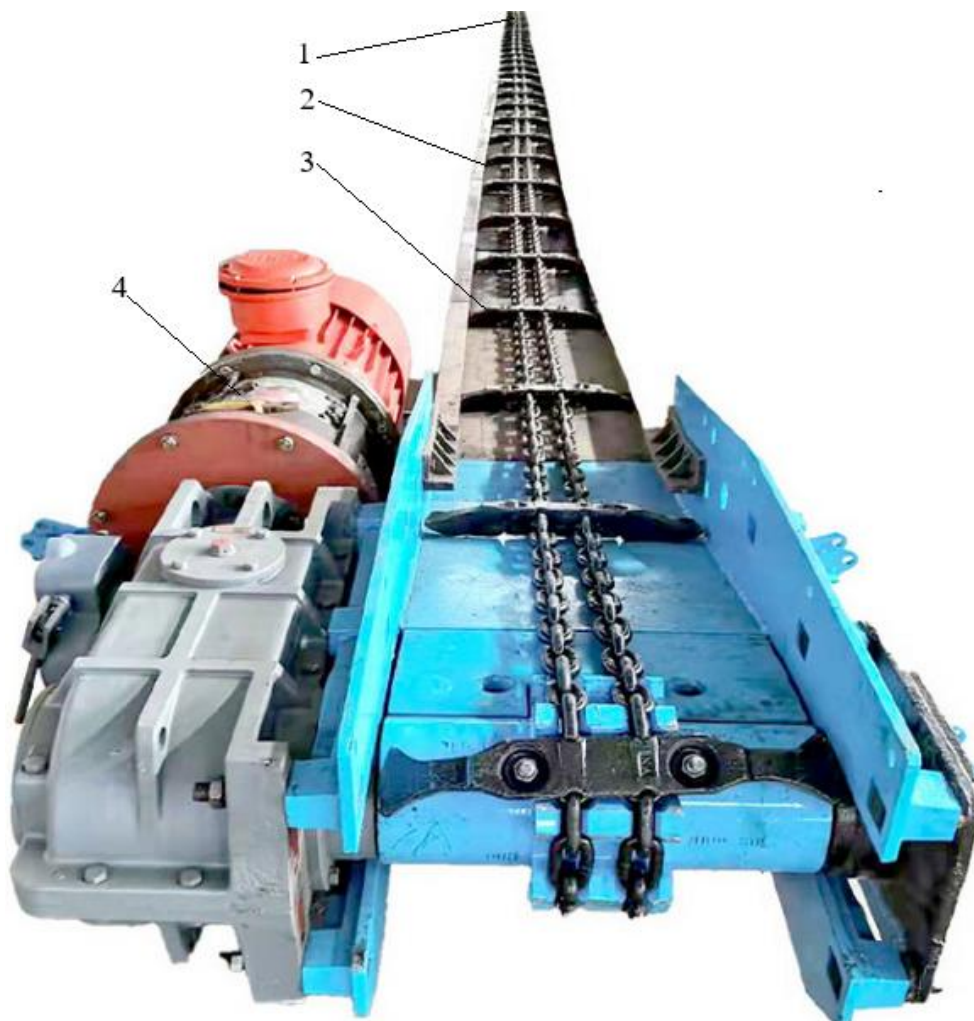
В якості об'єкту дослідження розглядається скребковий конвеєр типу СП202 від компанії "Лисичанський машинобудівний завод"

1.2 Опис та основні технічні характеристики скребкового вибійного конвеєра типу СПЦ163

В роботі розглядається конвеєр скребковий вибійний типу СПЦ163 [5].

Потужний скребковий, пересувний, шахтний конвеєр СПЦ163 (Рисунок 1.3) призначений для роботи у складі гірничодобувних комплексів для доставки вугілля, горючого сланцю, калійних руд з очисних вибоїв, що відпрацьовуються за простяганням при потужності пластів не менше 0,75 м і кутах падіння до 35° при доставці вниз, а також відпрацьовуваних за підняттям або падінням з кутом залягання пластів до 10° в шахтах будь-якої категорії небезпеки по газу і пилу.

Конвеєр призначений для роботи в шахтах, небезпечних газу метаном і вугільним пилом при температурі навколишнього середовища від мінус 10°C до +35°C; відносної вологості повітря до 98% за температури +35°C; запиленості до 1200мг/м³; атмосферному тиску від 0,084 МПа до 0,107 МПа; висоті над рівнем моря трохи більше 1000м; за відсутності у навколишньому середовищі вмісту значної кількості агресивних газів та парів у концентраціях руйнуючих метал та ізоляцію.



1 - кінцева головка; 2 - став; 3 - скребок; 4 - приводна станція

Рисунок 1.3 - Скребокний вибійний конвеєр типу СПЦ163

Риштачний постав збирають з уніфікованих секцій (риштаків) довжиною від 1 м до 2,5 м.

Тяговий орган конвеєра складаються з двох тягових ланцюгів, до яких болтами або спеціальними планками кріплять скребки.

Приводний пристрій скребкових конвеєрів складається з тягового блока, що містить у собі приводний вал із зірочками, редуктор і асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором.

Двигун з редуктором з'єднують за допомогою сполучних або запобіжних муфт. Всі частини привода конвеєра змонтовані на загальній рамі.

Конвеєр СПЦ163М може застосовуватися зі всіма типами кріплень і комбайнів, що виготовляються в Україні та за кордоном.

Технічна характеристика скребкового конвеєра типу СПЦ163 наведена в таблиці 1.2 [5].

Таблиця 1.2 - Технічна характеристика скребкового конвеєра типу СПЦ163

Найменування	Значення
Продуктивність, т/хв	6,1
Довжина конвеєра в поставці, м	207
Швидкість руху тягового органа, м/с	1,0±0,05
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	55
Частота обертання ротора, об/хв	1480
Тяговий орган: - тип ланцюга (калібр, крок, клас міцності)	24x 86-C
Риштачні поставки: - висота боковини риштака, мм - довжина риштака по боковинах, мм - ширина риштака, мм	192 1500; 1350 642
Тип подачі комбайна	ланцюговий

1.3 Існуюча система керування

Електрообладнання конвеєра складається з електродвигунів, пускорегулювальної та захисної апаратури, кінцевих вимикачів, освітлювальної та сигнальної апаратури. кабелів і проводів.

Живлення електрообладнання здійснюється від 3 -х фазної мережі змінного струму напругою 380 В.

Система автоматичного керування електроприводом забійного скребкового конвеєра забезпечує:

- роздільне включення верхньої й нижньої приводних станцій;
- подачу по всій довжині конвеєра автоматичного попереджувального сигналу перед пуском;
- підвищений пусковий момент;
- обмеження часу втримання зусилля при неуспішному запуску (6 - 8 секунд) для запобігання перегріву електроприводів;
- автоматичне відключення конвеєра при обриві тягового ланцюга;
- автоматичний захист приводів і тягового ланцюга конвеєра від динамічних перевантажень при заклинюванні ланцюга;

Привод конвеєра СПЦ163 обладнаний пристроєм для його закріплення й пересування.

Конвеєр СПЦ163 комплектується апаратурою контролю скребкового конвеєра (АКСК), яка, крім функції відключення електродвигунів при пориві тягового органу, має ряд додаткових діагностичних функцій, у т.ч. контроль навантаження на кожний електродвигун, контроль зміни швидкості, світлову індикацію відмови зі збереженням інформації в пам'яті, контроль справності електричних кіл та ін [5,8].

На рисунку 1.4 показана типова схема підключення асинхронного двигуна конвеєра.

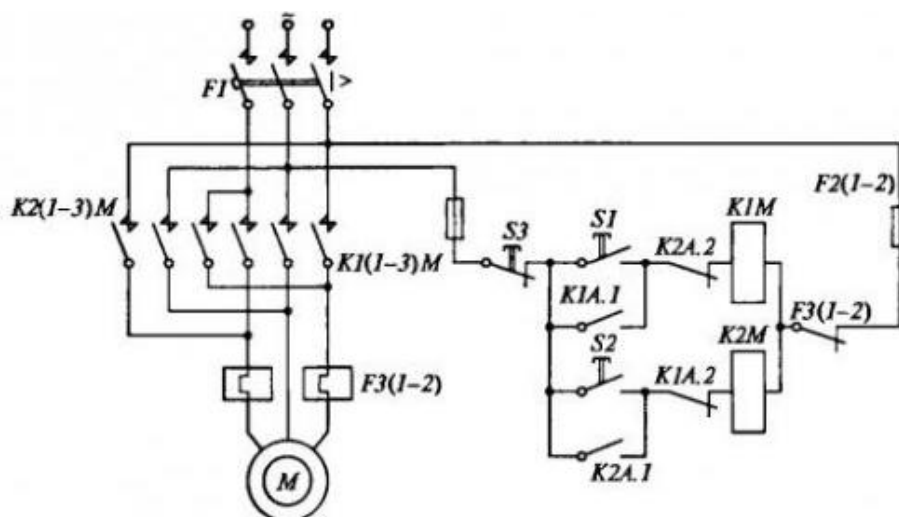


Рисунок 1.4 - Схема підключення асинхронного двигуна конвеєра з реверсивним пускачем

Ця схема застосовується у випадках, коли необхідно змінювати напрямки обертання електропривода, наприклад у приводі електролебідок, рольгангів,

механізмів подачі верстатів і т.п. Керування двигунами здійснюється реверсивним магнітним пускачем. Включення двигуна для обертання «уперед» здійснюється натисканням кнопки S1. Котушка контактора K1M буде під напругою, головні контакти K1(1-3)M, що замикають, приєднують електродвигун до мережі. Для перемикавання електродвигуна необхідно натиснути на кнопку S3 («стоп»), а потім на кнопку S2 («назад»), що викличе відключення контактора K1M і включення контактора K2M. При цьому, як видно зі схеми, дві фази на статорі перемкнуться, тобто відбудеться реверс обертання електродвигуна.

Щоб уникнути короткого замикання в ланцюзі статора між першою й третьою фазою внаслідок помилкового одночасного натискання на обидві пускові кнопки S1 і S2 реверсивні магнітні пускачі мають важільне механічне блокування (на схемі не показане), яке перешкоджає втягуванню одного контактора, якщо включений інший. Для підвищення надійності крім механічного блокування в схемі передбачене електричне блокування, яке здійснюється за допомогою розмикальних допоміжних контактів K1A.2 і K2A.2. Звичайно реверсивний магнітний пускач складається із двох контакторів, укладених в один корпус.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР ТИПУ ДВИГУНА ТА КОМПЛЕКТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Вибір електродвигуна

Привод скребкового конвеєра призначений для передачі ланцюгу тягового зусилля, повідомлення йому необхідної швидкості й забезпечення режимів пуску й останову. Привод скребкового конвеєра складається з електродвигуна, редуктора, муфти й гальма. До складу привода конвеєра може бути введена гідравлічна або електромагнітна муфта.

Режим роботи конвеєра характеризується:

- тривалою роботою протягом значного проміжку часу, тому що завантаження, транспортування й розвантаження здійснюються безупинно, без зупинок;
- рідкими пусками й остановами, що пояснюється тривалим режимом роботи конвеєра;
- сталістю напрямку руху тягового органа конвеєра, що обумовлює застосування неререверсивної схеми керування електродвигуном;
- нерівномірністю навантаження. Це в першу чергу стосується скребкових конвеєрів, що працюють у комплексі з очисними комбайнами або стругами;
- порівняно важкими умовами пуску. Важкий пуск - це пуск конвеєра під навантаженням, що пояснюється наявністю вантажу на стрічці або ставі скребкового конвеєра після аварійної його зупинки.

Умови, у яких експлуатуються шахтні конвеєри, характеризуються великою скрутністю робочого місця і його мінливістю, різним нахилом і довжиною гірських виробітків, наявністю пилу, вологістю навколишнього середовища, хімічною активністю шахтних вод, механічним впливом від шматків гірських порід, що відколюються, вибухонебезпечністю рудничної атмосфери, раптовістю викидів вугілля й газу.

Конвеєри, установлені на поверхні шахт і рудників або на збагачувальних фабриках, не піддані перерахованим вище впливам і тому умови їх експлуатації

значно кращі.

Умови експлуатації, режими роботи й конструктивні виконання приводних станцій скребкових і стрічкових конвеєрів формують наступні вимоги, пропоновані до їхніх електроприводів:

- використання в якості електропривода рудничних і вибухозахищених електродвигунів підвищеної надійності під землею й захищених або нормального виконання електродвигунів на поверхні. Ті ж вимоги пред'являються й до апаратури керування електродвигунами;
- забезпечення високої перевантажувальної здатності при можливо менших пускових струмах;
- забезпечення плавності пуску;
- рівномірний розподіл навантаження між електродвигунами при багатодвигунному електроприводі.

Основним видом привода конвеєрів і живильників у цей час служить електропривод змінного струму. Застосування асинхронного короткозамкненого електродвигуна дозволяє ліквідувати колектор, наявний у двигуна постійного струму й щітки - в асинхронного двигуна з фазним ротором, спростити конструкцію, підвищити надійність і зменшити (для однакових потужностей) масо-габаритні показники електропривода [4].

Відомо, що переваги АД найбільш повно реалізуються при частотному керуванні, що обумовлює постійне витиснення регульованого електропривода постійного струму частотно-регульованим асинхронним електроприводом у всіх галузях промисловості [15].

В даний час біля половини виробленої електроенергії споживається нерегульованими двигунами перемінного струму, серед яких значну частину складають потужні високовольтні АД. Регулювання швидкості потужних високовольтних АД, виключення режимів прямих пусків - ефективні фактори підвищення продуктивності робочих механізмів, зниження експлуатаційних витрат, економії електроенергії. Робочими механізмами потужних високовольтних електроприводів є: підйомники гірської і металургійної промисловості, вентилятори, насоси, газодувки, компресори гірської, металургійної, хімічної

промисловості, атомної енергетики.

Відомо, що механічні і динамічні характеристики, енергетичні показники АД в частотно-регульованому електроприводі визначаються: прийнятим законом частотного керування, способом частотного керування, алгоритмічною й апаратною реалізацією автоматичної системи регулювання (АСР) електропривода.

В даній роботі зроблена заміна існуючого електродвигуна більш підходящий, найбільш розповсюджений тип АИУМ225М4.

Згідно з технічною характеристикою для існуючих потужності та частоти обертання по каталогу обираємо електродвигун асинхронний вибухозахищений серії АИУМ225М4 з наступними даними (таблиця 2.1) [16].

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики електродвигуна типу АИУМ225М4

Параметр	Значення
Тип	АИУМ225М4
Потужність, кВт	55,0
Частота обертання валу n , об./хв.	1500
ККД, %	92,5
Коефіцієнт потужності, $\cos\phi$	0,87
Струм I_H , А (при $U=380V$)	104
Ковзання S_H , %	1,6
Критичне ковзання S_{KP} , %	10
Кратність I_n / I_H	7,5
Кратність максимального моменту M_{max} / M_H	3,1
Кратність пускового моменту M_n / M_H	3,2
Момент інерції J_δ , кг·м ²	0,2
Маса, кг	525

Електродвигуни серії АИУМ225М4 мають наступні основні характеристики:

- АИУ - серія вибухозахищених електродвигунів для вугільного пилу;
- відповідність стандартам - ГОСТ 183-74, ГОСТ12.1.011-78;
- ступінь захисту IP54 ((від попадання пилу та водяних бризок));

- ізоляція класу нагрівостійкості F (максимальна температура 150°C);
- по способу монтажу, виконання: IM4001, M9701, M9702 ГОСТ2479-79;
- виконання з вибухозахисту 1ExdIIBT4, 1ExdeIIBT4 - рудничне вибухобезпечне обладнання;
- режим роботи S1 (тривалий, без частих зупинок).

З розробкою й освоєнням серійного виробництва потужних силових напівпровідникових приладів з'явилася можливість широкого застосування потужних високовольтних перетворювачів частоти (ПЧ) для живлення обмоток високовольтних АД. Таким чином, з'явилася можливість створення регульованих по швидкості потужних асинхронних електроприводів.

2.2 Огляд існуючих систем керування електропривода для конвеєрів

Вимоги до електропривода скребкового конвеєра. Усі системи електроприводів відрізняються між собою за такими основними показниками: діапазон регулювання швидкості; жорсткість механічної характеристики; плавність регулювання; стійкість електропривода; характер зміни моменту; допустима за умовами нагріву перевантажувальна здатність двигуна та економічність [16].

Вибір певної системи електропривода визначається зокрема тією чи іншою обставиною, коли потребується регулювання продуктивності конвеєра.

Продуктивність конвеєра можливо регулювати декількома способами:

- зміною частоти обертання приводного двигуна (електричний спосіб);
- за рахунок спеціальних пристроїв, що має сам механізм (направляючі лопатки та інше);
- комбінований спосіб.

Вибір того чи іншого способу визначається такими факторами:

- потребою в відношенні діапазону і економічності регулювання;
- потужністю та конструкцією механізму.

Для підвищення економічності та надійності функціонування конвеєра

пропонується регулювати частоту обертання приводного електродвигуна за рахунок системи керування при зміні навантаження.

При застосуванні електричного способу регулювання із застосуванням сучасної техніки (частотні перетворювачі) значно знижуються втрати електроенергії при регулюванні, оскільки ККД таких перетворювачів становить 0,97-0,98. У випадку реостатного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з фазним ротором, втрати енергії в роторному колі становлять 15 – 17% номінальної потужності на валу, і регулювання обертів відбувається ступінчасто. В поставленій задачі виникає необхідність регулювати швидкість обертання двигуна, і потрібно постійно підтримувати її сталою для визначеного режиму роботи установки. Тому варто застосовувати системи типу ТРН – АД, або ТПЧ – АД. Не виключено також застосування двигуна постійного струму, але ця схема дещо застаріла. З точки зору сучасних технологій та можливості програмування найбільш прийнятною є схема ПЧ – АД. В нашому випадку можна обирати АД з короткозамкненим ротором.

Одним з ефективних засобів енергозбереження є частотно-регульовані приводи з асинхронними електродвигунами, що підтвердили результати їхнього впровадження на промислових електроприводах: забезпечується економія електроенергії від 20% до 45% у залежності від потужності електропривода і режимів його роботи; значно менші затрати на ремонт обладнання; покращення якості вихідної продукції. Строк окупності системи частотного регулювання швидкості двигуна від 2 до 4 років в залежності від фонду часу роботи конвеєра, термін експлуатації - від 10 до 15 років. При цьому не потрібна заміна існуючих асинхронних електродвигунів, що особливо актуально при реконструкції об'єктів

З метою обмеження динамічних навантажень, забезпечення надійного зчеплення стрічки з барабаном та вантажу, що транспортується, зі стрічкою конвеєрних установок, особливо при їхній великій довжині, електропривод повинен обмежувати прискорення при пуску припустимою величиною й усувати коливальні динамічні навантаження.

На цей час все частіше використовують тиристорні схеми керування асинхронними двигунами як з фазним, так і з короткозамкненим ротором. Такі

схеми дозволяють автоматично змінювати жорсткість механічних характеристик, підтримуючи тим самим рівномірне завантаження кожного із приводних двигунів.

У випадку застосування регульованих електроприводів, що забезпечують процеси плавного пуску, регулювання швидкості конвеєрної установки, обмеження динамічних навантажень і вирівнювання навантажень між приводними двигунами, мінімальний діапазон регулювання швидкості повинен бути 10:1.

Застосовуються різні способи регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна [12,14]:

- параметричне регулювання;
- зміною частоти живильної напруги;
- переключенням числа полюсів;
- частотне регулювання;
- векторне керування.

Найбільш поширені два останніх способи.

При частотному керуванні замість безпосередньої подачі на двигун стандартної змінної напруги з мережі (одно або трифазної) напруга спочатку проходить процес перетворення. При цьому міняються деякі її ключові параметри, зокрема:

- амплітуда напруги й струму;
- частота напруги й струму;
- кутова різниця між окремими фазами;
- вектор магнітного потоку усередині обмоток ротора й статора.

Процес такого перетворення здійснюється в особливому пристрої, який прийнято коротко називати частотним перетворювачем або перетворювачем частоти (ПЧ).

Розрізняють два основних способи частотного керування:

- частотне керування, при якому як керуючі впливи прийняті частоти і напруги статора;
- частотне керування, при якому як керуючі впливи прийняті частота і струм статора.

Принципова можливість регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна зміною частоти живильної напруги впливає з формули

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$$

При регулюванні частоти також виникає необхідність регулювання амплітуди джерела напруги, що впливає з виразу

$$U_1 \approx E_1 = k \cdot \Phi \cdot f_1 .$$

Якщо при незмінній напрузі змінювати частоту, то потік буде змінюватися зворотно пропорційно частоті. Так, при зменшенні частоти потік зросте і це приведе до насичення сталі ротора машини і як наслідок до різкого збільшення струму і перевищенню температури двигуна; при збільшенні частоти потік буде зменшуватися і як наслідок буде зменшуватися припустимий момент.

Для найкращого використання асинхронного двигуна при регулюванні кутової швидкості зміною частоти необхідно регулювати напругу, одночасно у функції частоти і навантаження, що реалізовано тільки в замкнених системах електропривода.

Частотне регулювання кутової швидкості електроприводів змінного струму з двигунами з короткозамкненим ротором знаходить все більше застосування в різних галузях техніки. Наприклад, в установках текстильної промисловості, де за допомогою одного перетворювача частоти, що живить групу асинхронних двигунів, що знаходяться в однакових умовах, плавно і одночасно регулюються їх кутові швидкості. Прикладом іншої установки з частотно-регульованими асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором можуть служити транспортні рольганги в металургійній промисловості, деякі конвеєри та ін

Частотне регулювання кутової швидкості асинхронних двигунів широко застосовується в індивідуальних установках, коли потрібне отримання досить високих кутових швидкостей (для приводу електрошпінделем в металорізальних верстатах з частотою обертання до 20 000 об /хв).

Економічні вигоди частотного регулювання особливо істотні для приводів,

що працюють в повторно-короткочасному режимі, де має місце часта зміна напрямку обертання з інтенсивним гальмуванням.

Для здійснення частотного регулювання кутової швидкості знаходять застосування перетворювачі, на виході яких по необхідному співвідношенню або незалежно міняється як частота, так і амплітуда напруги.

Другий спосіб називається *частотно-струмовим керуванням*. Формування механічних характеристик асинхронних двигунів при частотному керуванні, як і при керуванні двигунами постійного струму, служить задачам забезпечення необхідної перевантажувальної здатності і жорсткості характеристик у всьому діапазоні регулювання швидкості.

Задана перевантажувальна здатність забезпечується шляхом виконання визначених співвідношень між частотою і напругою статора.

Жорсткість механічних характеристик може бути як завгодно високою при використанні зворотних зв'язків по швидкості. Варто підкреслити, що і без зворотних зв'язків по швидкості жорсткість механічних характеристик частотно-керованих електроприводів перемінного струму виявляється більш високою, ніж у приводів постійного струму. Ця обставина сприяє застосуванню простих систем керування асинхронними електроприводами, не оснащеними датчиками швидкості і контурами регулювання швидкості.

Крім вимог формування механічних характеристик двигунів, до систем керування можуть пред'являтися також вимоги відносного керування по енергетичних витратах, наприклад забезпечення необхідних моменту і швидкості при мінімумі струму статора чи мінімумі втрат, забезпечення максимального моменту при заданому струмі статора.

Такі задачі керування вирішуються при використанні екстремальних систем керування .

Система векторного керування. Роздільне керування швидкістю й потокозчепленням асинхронного короткозамкненого електродвигуна можна ефективно робити, використовуючи принцип векторного керування. Координати електропривода, обмірювані в нерухомій системі координат, можуть бути перетворені до обертової системи координат, і з них можуть бути виділені постійні

значення, пропорційні складовим векторам в обертовій системі координат. По цих координатах і виконується керування.

Вихідною інформацією для побудови системи векторного керування є інформація про миттєві значення й просторове положення вектора потокозчеплення в повітряному зазорі, миттєвих значеннях струмів або напруг статора й швидкості ротора двигуна. Обертова система координат приймається певним чином орієнтованою щодо вектора потокозчеплення двигуна. Зручні алгоритми керування мають місце при орієнтації координатної системи щодо вектора потокозчеплення ротора.

Переваги векторного регулювання:

- точне відпрацювання швидкості з компенсацією ковзання (навіть без зворотного зв'язку по швидкості);
- глибокий діапазон регулювання;
- в області малих частот двигун працює плавно й зберігає момент аж до нульової швидкості;
- швидка реакція на стрибки навантаження;
- при різких стрибках навантаження практично не відбувається стрибків швидкості, внаслідок високої динаміки регулювання;
- оптимізація ККД двигуна на низьких частотах;
- за рахунок регулювання струму намагнічування здійснюється оптимізація режиму роботи двигуна й зниження втрат.

Недоліком системи векторного керування є складність керуючих і функціональних пристроїв при реалізації перетворення координат і фаз, виконання компенсаційних зв'язків при широкому діапазоні регулювання швидкості й навантаження електропривода.

Серед чисельних способів регулювання швидкості асинхронного електродвигуна для безпечних механізмів з частим включенням виняткова роль належить частотному керуванню.

Частотне керування приводом стало свого роду технічним стандартом. Практично вийшли з використання такі способи регулювання асинхронного приводу: зміною числа пар полюсів, введенням додаткових опорів у коло ротора,

зміною напруги живлення двигуна тощо [14,15].

Таке широке розповсюдження частотно-керований привод отримав завдяки досягненням у області силової електроніки і мікропроцесорної техніки.

Саме на основі силових транзисторів з ізольованим затвором побудовані сучасні перетворювачі частоти (ПЧ) напругою до 1000 В.

Проаналізувавши наявні засоби і системи керування швидкістю обертання асинхронного електродвигуна, приходимо до висновку, що для керування електропривода конвеєра доцільно використати тиристорний перетворювач з частотною системою керування.

Застосування частотних перетворювачів вирішує проблеми, пов'язані з пуском електродвигунів. Виключаються високі пускові струми електродвигунів і ударні навантаження в керованих механічних і гідравлічних пристроях.

У приводі з частотним перетворювачем забезпечується надійний захист і електродвигуна, і самого перетворювача. Частотні перетворювачі прості в керуванні, можуть сполучатися з керуючими контролерами, іншими елементами і пристроями автоматики.

Отже, найбільш вигідним для застосування з економічної та технічної точки зору є система електричного приводу типу ПЧ-АД.

Більшість сучасних частотних перетворювачів підтримують роботу у режимі частотно-струмового керування асинхронним електродвигуном. Цей спосіб дозволяє змінювати швидкість обертання валу двигуна у широких межах.

На основі проведеного аналізу існуючих типів керування двигунів перемінного струму для керування електродвигуном скребкового конвеєра вибраний перетворювач типу VFD-VL з частотно-струмовим керуванням

2.3 Електропривод на базі перетворювача серії VFD-VL

Для реалізації структурної і функціональної схеми скористаємося готовим електроприводом, що серійно випускається, VFD-VL [13].

Даний електропривод структурно і функціонально рекомендований для використання асинхронного електродвигуна.

Перетворювачі частоти Delta Electronics серії VFD-VL є на сьогодні однією із самих досконалих і перспективних лінійок універсальних частотних перетворювачів для електродвигунів і не мають аналогів у номенклатурі більшості інших іменитих виробників.

Перетворювачі частоти даної серії оснащені широким спектром функцій і режимів керування, що дозволяє їх з успіхом використовувати не тільки як частотні перетворювачі для асинхронних двигунів, але й у якості частотних перетворювачів синхронних двигунів.

Така універсальність роботи перетворювача частоти VFD-VL для керування різними типами двигунів і вбудований режим позиціонування дозволяють створювати економічні за ціною системи під різні вимоги до точності переміщення.

У перетворювачі частоти для синхронних і асинхронних двигунів VFD-VL були закладені всі самі останні розробки в області частотного регулювання електропривода. Конструкція даної серії частотних перетворювачів ретельно продумана й перелічена за допомогою комп'ютерного моделювання теплових режимів роботи класичних частин частотних перетворювачів, результатом чого став поділ силової і керуючої частин і зниження загального тепловиділення.

Серія VFD-VL використовує Фос-Векторне керування як базову технологію керування двигуном, за рахунок чого досягаються безпрецедентно високі характеристики привода, такі як пусковий момент, точність підтримки швидкості й моменту в широкому діапазоні регулювання.

Великий експлуатаційний ресурс у сукупності з контролем часу наробітку найбільш важливих компонентів забезпечують тривалу й надійну експлуатацію виробу.

Особливості перетворювача частоти VFD-VL

Високоєфективний алгоритм векторного управління – управління орієнтацією поля (FOC – field oriented control).

Управління синхронними двигунами змінного струму, проведення автоматичного тестування двигуна під час старту.

Можливість живлення від резервного джерела живлення 48/96 VDC.

Наявність автоматичного налаштування та функції компенсації пускового моменту.

Вбудоване управління процесом пуску та зупинки ліфтових завдань.

Вбудована настройка роботи вихідного гальмівного реле для керування зовнішнім електромагнітним гальмом.

Підтримка керування зовнішнього цифрового пульта управління.

Автоматичне налаштування статичних та динамічних параметрів двигуна.

Усі перетворювачі цієї серії мають вбудований гальмівний ключ (для зовнішніх гальмівних резисторів).

Можливість роботи з енкодерами, які мають вихід "Line Drive", а також "Sin, Cos".

Вбудований порт RS485 із підтримкою стандартного протоколу Modbus.

Програмне забезпечення для комп'ютера, що забезпечує моніторинг, керування, завантаження та збереження параметрів.

Повний комплекс захисних функцій Високоточне вимірювання струму, багаторівневий захист від перевантаження (oL , $oL1$, $oL2$), захист від перенапруги та надструму, від короткого замикання, функція пошуку швидкості, підключення термістора двигуна та інше.

Області застосування частотного перетворювача VFD-VL: пасажирські та вантажні ліфти, крани, лебідки та ін. вантажопідйомні механізми, а також палетоукладачі, транспортерні та конвеєрні стрічки, ескалатори тощо.

Технічні характеристики частотного перетворювача моделі VFD-VL для вибраного електродвигуна наведені в таблиці 2.2 [13].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики перетворювача частоти VFD-VL

Модель VFD550VL43A	
Ном. потужність двигуна, кВт	55
Ном. вихідний струм, А	110
Напруга живлення	3 фази (380 ... 480), 50-60 Гц
Спосіб управління	1: V/F, 2: V/F+PG, 3: SVC, 4: FOC+PG, 5: TQR+PG, 6: FOC+PG (PM)
Пусковий момент	150% при 0,5 Гц; для FOC+PG на 0 Гц
Діапазон регулювання швидкості	1:100 для SVC; 1:1000 разом із PG
Точність підтримки швидкості	± 0,5% для SVC; ± 0,02 % разом із PG
Смуга пропускання швидкості	5 Гц (до 30 Гц при векторному управлінні)
Діапазон вихідної частоти	0,00. 120,00 Гц
Точність вихідної частоти	Цифрове завдання - ± 0,005%, Аналогове завдання - ± 0,5%
Точність завдання частоти	Цифрове завдання - ± 0,01 Гц, аналогове завдання - 1/4096 (12 біт) від макс вихідної частоти
Обмеження моменту	200% максимум (від номінального струму)
Точність за моментом	± 5%
Час розгону/уповільнення	0,00. 600,00 сек / 0,0. 6000,0 секунд
V/f характеристика	Налаштовується за 4-ма незалежними точками, а також квадратична характеристика
Сигнал завдання частоти	0 . 10, ± 10, 4 . 20 мА, імпульсний вхід
Гальмівний момент	20%
Захист двигуна	Електронне теплове реле
Перевищення струму	220 % за перевищенням струму та 300 % від номінального струму
Замикання на землю	Більш ніж 50% від номінального струму
Перевантажувальна здатність	При постійному моменті – 150 % 60 сек., при змінному моменті – 200 % 10 сек.
Захист від перенапруги	Перенапруга VDC > 400/800 В За низькою напругою VDC
Захист від перенапруги на вході живлення	Варистор на вході

На рисунку 2.1 показана загальна схема підключення перетворювача частоти лінійки VFD-VL.

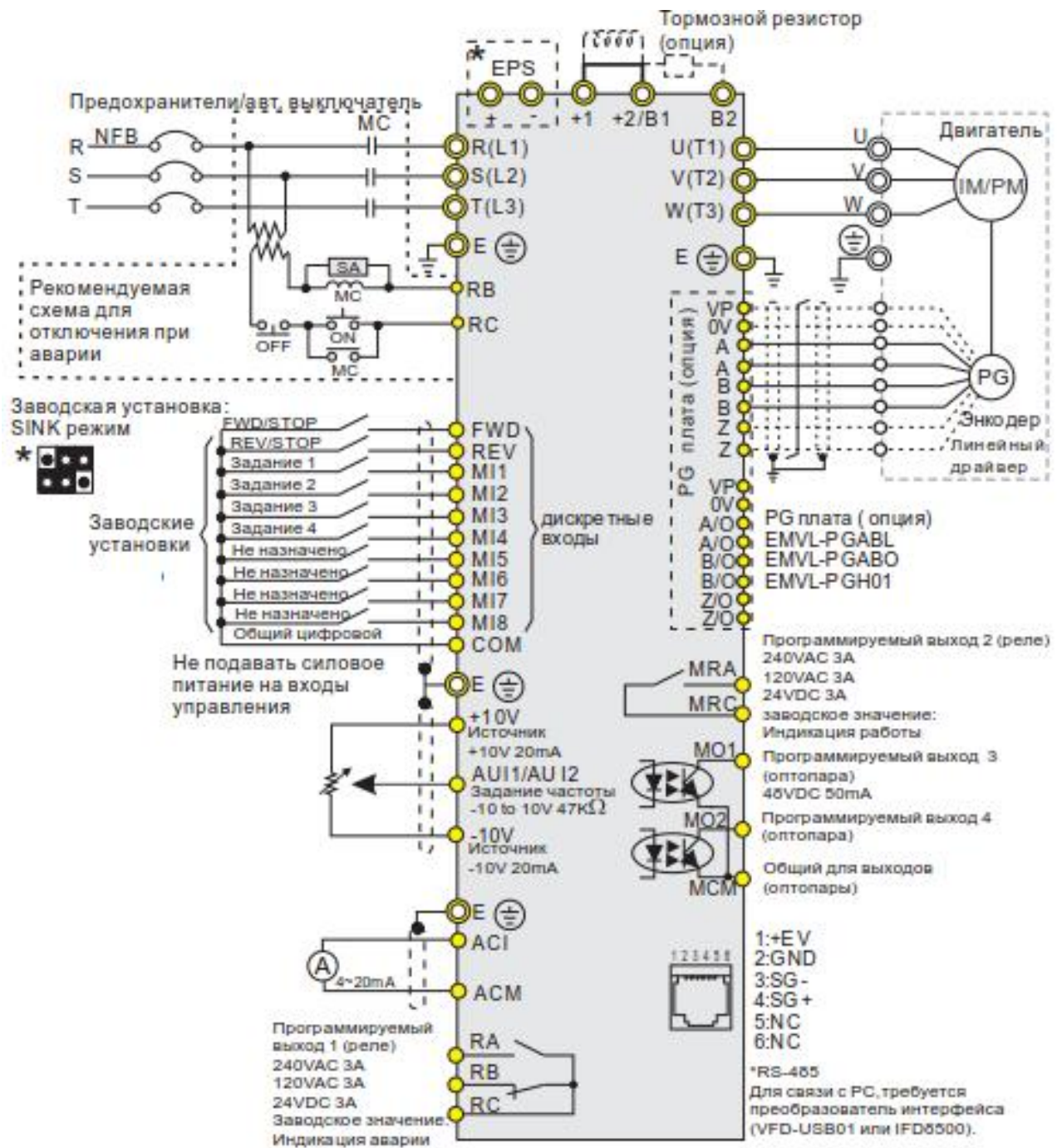


Рисунок 2.1 - Блок-схема перетворювача частоти лінійки VFD-VL

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

3.1 Принцип роботи електропривода

При частотно-струмовому керуванні АД живиться від перетворювача частоти струму (ПЧС), працюючого в режимі джерела струму.

Подібний перетворювач може бути реалізований на основі автономного інвертора струму (рисунок 3.1), до складу якого входять керований випрямляч, що забезпечує за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму навантаження (датчик струму ДС і регулятор струму РС) разом з фільтруючим дроселем Др режим керованого і джерела постійного струму, та інвертор струму ІС, що виконує функцію формування необхідної частоти вихідного струму.

Керуючими впливами u_K на вході регуляторів можуть бути сигнали завдання будь-яких координат електропривода - швидкості, кута повороту ротора АД, струму статора, магнітного потоку й т.п.

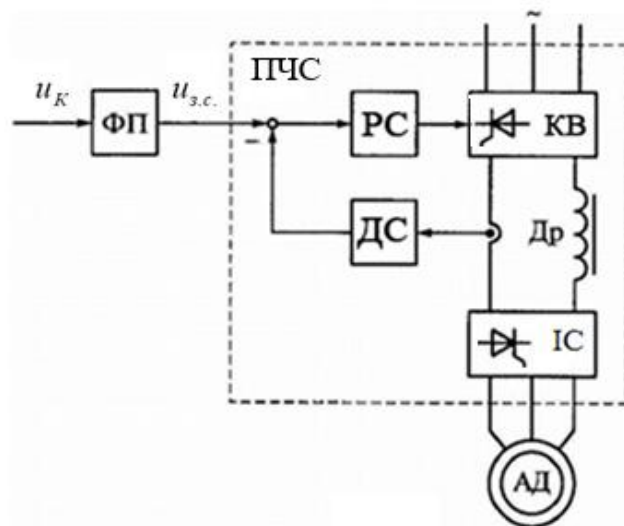


Рисунок 3.1 – Функціональні схеми систем ПЧ-АД при живленні від джерела

На рисунку 3.3 представлена функціональна схема системи частотно-струмового керування АД. Джерело струму реалізовано на основі керуючого випрямляча КВ, струм навантаження I_n якого задається вихідною напругою u_{PC}

регулятора струму РС, пропорційним різниці напруг $u_{3.C.}$ на виході функціонального перетворювача (ФП) і $u_{3.3.C.}$ датчика струму ДС. Стабілізація швидкості АД забезпечується за рахунок регулятора швидкості РШ, на вході якого порівнюються напруги завдання швидкості $u_{3.ш.}$ і зворотного зв'язку $u_{3.3.ш.}$ з вихода тахогенератора ТГ. Особливість схеми в тому, що тут автоматично формуються сигнали, пропорційні абсолютному ковзанню і завданню синхронної швидкості АД [14,15].

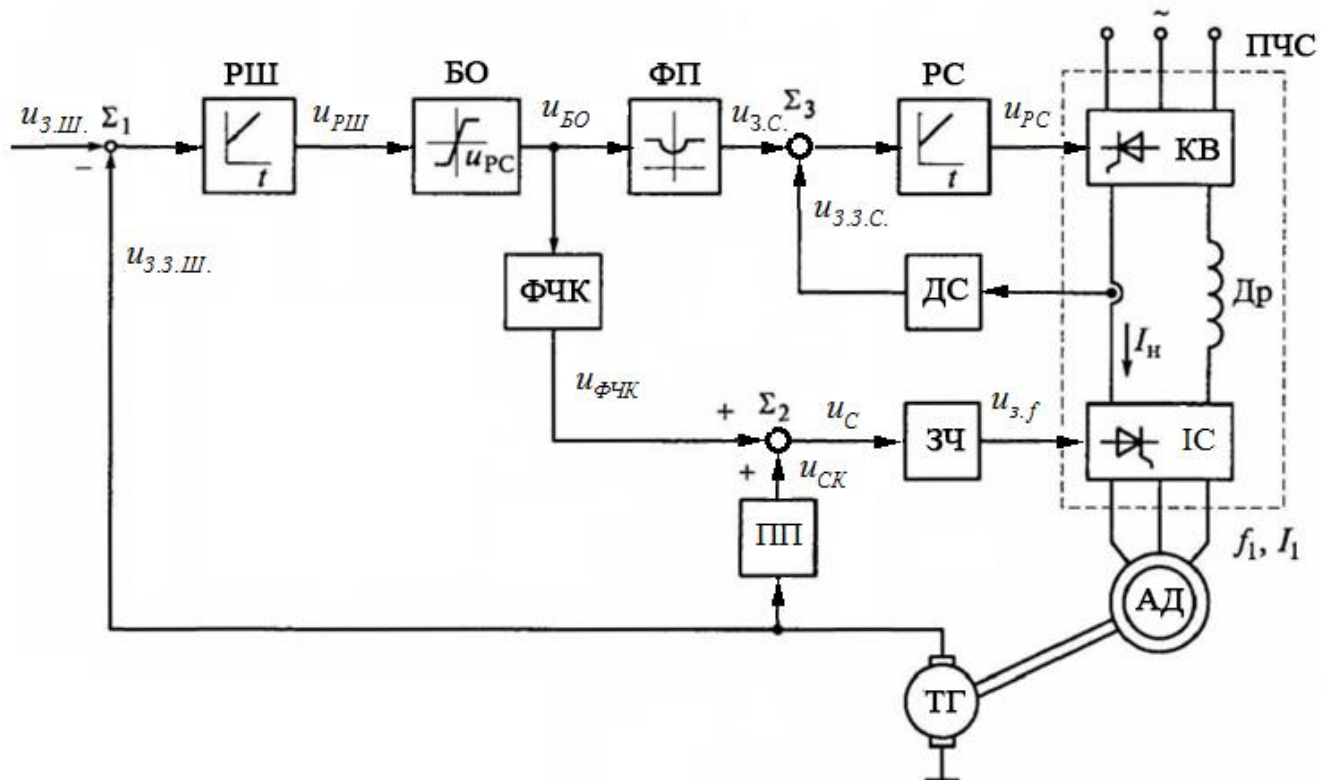


Рисунок 3.2 – Функціональна схема замкнутої системи керування ПЧ-АД з частотно-струмовим керуванням

Сигнал, пропорційний s_a , формується на виході РШ, оскільки $u_{3.ш.}$ пропорційно завданням швидкості ω_{03} ідеального холостого ходу АД, а $u_{3.3.ш.}$ – поточної швидкості ротора ω , тобто $u_{РШ} = (u_{3.ш.} - u_{3.3.ш.}) = (\omega_{03} - \omega) = s_a \cdot \omega_{0ном}$. Якщо передатний коефіцієнт формувача частоти ковзання ФЧК вибрати таким чином, щоб з урахуванням $\omega_{0ном}$ його вихідний сигнал $u_{ФЧК}$ був пропорційний $(\omega_{03} - \omega)$, то після сумовування цього сигналу з вихідним сигналом $u_{ПП}$ погоджувачого пристрою ПП, пропорційний поточному значенню ω , на виході

суматора Σ_2 пристрою завдання частоти ЗЧ інвертора струму ІС перетворювача ПЧС буде сформований сигнал

$$u_C = u_{\Phi CK} + u_{III} \cong (\omega_{03} - \omega) + \omega = \omega_{03}.$$

В результаті на вихід ЗЧ буде сигнал завдання частоти вихідного струму ПЧТ $u_{3.f} \cong u_{3.III} \cong \omega_{03}$, що визначає завдання синхронної швидкості АД.

Оскільки електромагнітний момент двигуна пропорційний квадрату струму статорної обмотки ($M \cong I_1^2$), який, у свою чергу, пропорційний абсолютному ковзанню ($I_1^2 \cong s_a$), вихідний сигнал РШ пропорційний s_a і є сигналом завдання електромагнітного моменту АД. Тому вихідна напруга u_{BO} блоку обмеження БО на виході РШ можна впливати і на обмеження максимального моменту АД.

Перед пуском двигуна ($u_{3.III} = 0$, $u_{PШ} = 0$) сигнал завдання частоти перетворювача $u_{3.f} = 0$ і за рахунок характеристики ФП ($u_{3.III.min} \neq 0$) в АД задається постійний струм, який забезпечує потік намагнічення і режим динамічного гальмування АД. Зі збільшенням $u_{3.III}$ зростає сигнал завдання частоти, струм статора стає змінним із заданою частотою і двигун починає обертання під дією максимального моменту, встановленого сигналом $u_{3.III}$. Збільшення швидкості буде відбуватися до тих пір, поки не зрівняються сигнали завдання і зворотного зв'язку по швидкості двигуна. Після цього вихідний сигнал РШ при відсутності статичного навантаження на валу АД знову встановиться рівним нулю, але за рахунок позитивного зворотного зв'язку по швидкості вже при $u_{3.f} \neq 0$. Потік холостого ходу АД буде при цьому створюватися змінним струмом I_{1min} [14,15].

3.1.1 Математичний опис структурної схеми електропривода з частотно-струмовим керуванням

Комплектний електропривод VFD-VL [13] має штатні складові, а тому розрахунку та вибору основних елементів не потребує. Але корегуюча ланка

заводом-виробником не передбачується, бо вона розраховується під конкретний двигун. Окрім того, при налагодженні привода потрібно встановити значення регулюючих параметрів, що забезпечують необхідні динамічні якості системи. Це потребує проведення аналізу динаміки системи на основі її математичної моделі.

При розгляданні перехідних процесів досліджується ідеалізований асинхронний двигун, у якому магнітна рушійна сила (МРС) і індукція розподілені по окружності синусоїдально, втрати в сталі відсутні, ланцюг, що намагнічує, є лінійним.

Диференційні рівняння ідеалізованого асинхронного двигуна у системі координат $x - y$, що обертається з синхронною швидкістю ω_0 :

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + j\omega_0\psi_1; \\ 0 &= I_2 \cdot r_2' + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_0 - z_p\omega_2)\psi_2; \\ \psi_1 &= L_1 I_1 + L_0 I_2'; \\ \psi_2 &= L_2' I_2' + L_0 I_1, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де U_1, I_1, ψ_1 – вектори напруги, струму і потокозчеплення статора;

I_2', ψ_2 – ті ж параметри для ротора, приведені до статора;

L_0 – повна результуюча взаємна індуктивність обмотки статора і ротора;

L_2', L_1' – повні результуючі індуктивності обмотки статора і ротора (приведені до статора), що складаються з індуктивності від головного потоку і індуктивностей від полів розсіювання;

r_1, r_2' – активні опори обмоток статора і ротора (приведені до статора);

ω_2 – кутова швидкість обертання ротора;

z_p – число пар полюсів двигуна.

Обертовий момент двигуна M ,

$$M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot I_m(\psi_1^* \cdot I_1) = \frac{3}{2} \cdot z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_m(\psi_2^* \cdot I_1). \quad (3.2)$$

Рівняння руху двигуна:

$$M - M_c = I \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.3)$$

При живленні від АІС, коли заданий струм статора двигуна, доцільно перейти до рівнянь, що містять U_1 , I_1 , ψ_2 .

З третього і четвертого рівнянь системи (3.1):

$$\psi_1 = \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_2,$$

де $\Delta^* = L_1 L_2' - L_0^2$; $I_2' = \frac{1}{L_2'} \cdot \psi_2 - \frac{L_0}{L_2'} \cdot I_1$.

Підставимо дані вирази в перші два рівняння системи (3.1) і одержимо:

$$U_{1x} = R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt} \quad (3.4)$$

$$0 = -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + j(\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_2 \quad (3.5)$$

Спроекуємо вирази (3.5) на осі x и y , а також введемо в якості незалежної перемінної I_1 , що спрямована уздовж осі x , при цьому $I_{1x} = I_1$:

$$\left. \begin{aligned} U_{1x} &= R_1 I_{1x} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1y} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1x}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\ U_{1y} &= R_1 I_{1y} - \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_{1x} + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_{1y}}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1x} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\ 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_{1y} + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}. \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

$$\left. \begin{aligned}
 U_{1x} &= R_1 I_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot \frac{dI_1}{dt} - \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2x}}{dt}; \\
 U_{1y} &= \omega_0 \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} \cdot I_1 + \omega_0 \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{L_0}{L_2'} \cdot \frac{d\psi_{2y}}{dt}; \\
 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1 + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x} + \frac{d\psi_{2x}}{dt} - (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2y}; \\
 0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y} + \frac{d\psi_{2y}}{dt} + (\omega_0 - z_p \omega_2) \cdot \psi_{2x}.
 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Знайдемо момент двигуна з виразу (3.3):

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} I_m \cdot \psi_2^* I_1, \quad (3.8)$$

де $\psi_2^* = \psi_{2x} - j\psi_{2y};$

$$I_1 = I_{1x} + jI_{1y}.$$

Підставимо значення ψ_2^* і I_1 у (3.8) і одержимо:

$$M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} (\psi_{2x} I_{1y} - \psi_{2y} I_{1x}).$$

Так як при $I_{1x} = I_1$, $I_{1y} = 0$, то попередній вираз перетвориться в такий:

$$M = -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y} I_1. \quad (3.9)$$

Запишемо систему рівнянь (3.7) і рівняння (3.9) в операторній формі:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{1x}(p) &= (R_1 + \frac{\Delta^*}{L_2'} p) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2x}(p); \\
 U_{1y}(p) &= \omega_0(p) \cdot \frac{\Delta^*}{L_2'} I_1(p) + \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \psi_{2x}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p \psi_{2y}(p);
 \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
0 &= -\frac{R_2'}{L_2'} \cdot L_0 I_1(p) + \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2x}(p) + p\psi_{2x}(p) - (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\
0 &= \frac{R_2'}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + p\psi_{2y}(p) + (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\
M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p).
\end{aligned}
\tag{3.11}$$

При живленні двигуна від АІС, нас буде цікавити тільки активна складова напруги $U_{1x}(p)$, тому при побудові структурної схеми асинхронного двигуна, друге рівняння системи (3.10) використовуватися не буде.

$$\begin{aligned}
U_{1x}(p) &= R_1 \left(1 + \frac{\Delta^*}{L_2' R_1} p\right) \cdot I_1(p) - \omega_0(p) \cdot \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) + \frac{L_0}{L_2'} p\psi_{2x}(p); \\
\psi_{2x}(p) &= \frac{L_0}{\left(1 + \frac{L_2'}{R_2'} p\right)} \cdot I_1(p) + \left[-\frac{L_2'}{R_2'} / \left(1 + \frac{L_2'}{R_2'} p\right) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2y}(p); \\
\psi_{2y}(p) &= \left[-\frac{L_2'}{R_2'} / \left(1 + \frac{L_2'}{R_2'} p\right) \right] \cdot (\omega_0(p) - z_p \omega_2(p)) \cdot \psi_{2x}(p); \\
M &= -\frac{3}{2} z_p \frac{L_0}{L_2'} \cdot \psi_{2y}(p) I_1(p).
\end{aligned}
\tag{3.12}$$

На підставі системи диференційних рівнянь ідеалізованого асинхронного двигуна у системі координат $x - y$, що обертається з синхронною швидкістю ω_0 (3.12), і рівняння (3.3) складемо структурну схему асинхронного двигуна, що представлена на рисунку 3.3 [1,14].

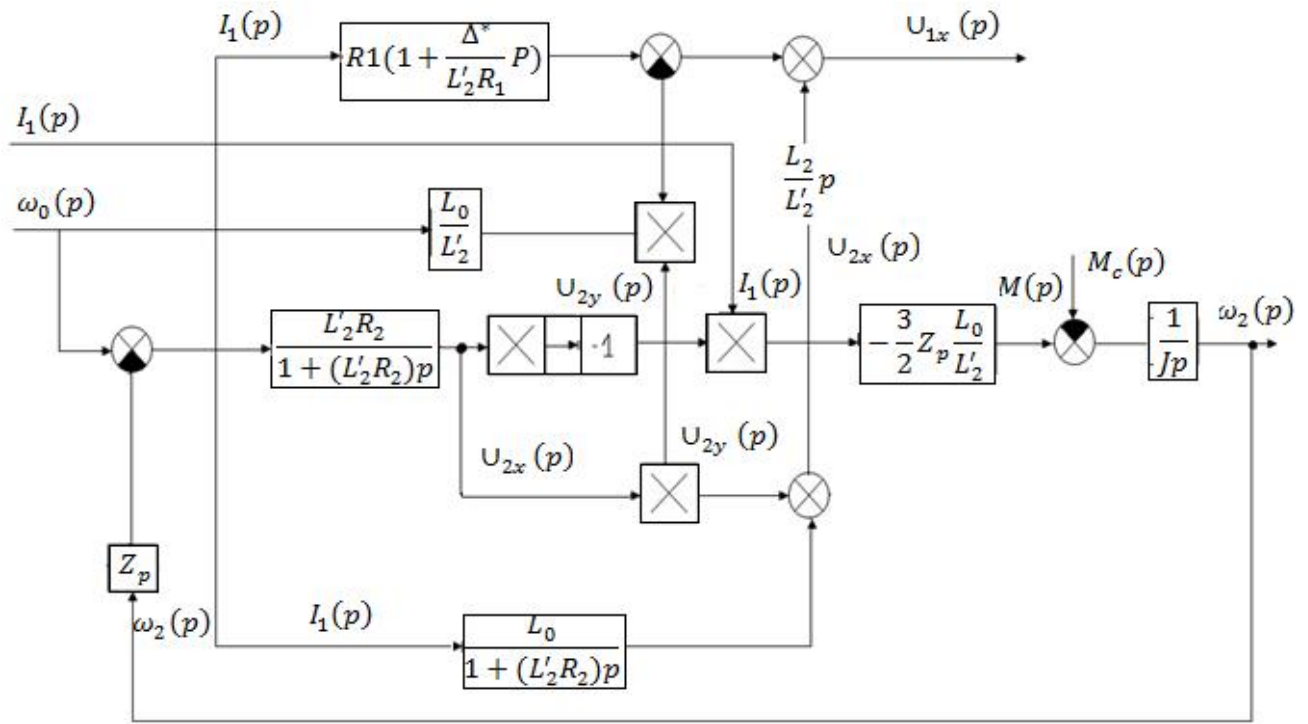


Рисунок 3.3 - Структурна схема асинхронного електродвигуна

Складену структурну схему асинхронного двигуна при керуванні кутовою частотою напруги статора й за умови сталості потокозчеплення статора зручніше побудувати, якщо представити координати двигуна у в.о.

Здійснимо перехід до умовних одиниць, прийнявши за базові значення координат їх значення у номінальному режимі: $M_{нфн}$; $\omega_{1н}$; $U_{1аH}$; $\omega_{0н}$,

$$\omega_{0н} = \frac{\omega_{1н}}{p_i},$$

де $\omega_{0н}$ - синхронна кутова швидкість двигуна.

$$\text{Тоді } \left[\frac{\Delta \omega}{\omega_{0н}} \right] = \Delta \bar{\omega}, \left[\frac{\Delta \omega_1}{\omega_{1н}} \right] = \Delta \bar{\omega}_1, \left[\frac{\Delta M}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta \bar{M}, \left[\frac{\Delta M_o}{M_{п.ф.н}} \right] = \Delta \bar{M}_o, \left[\frac{\Delta u_{1a}}{U_{1aH}} \right] = \Delta u_{1a}.$$

Передатна функція двигуна згідно запишеться так

$$\frac{\Delta \overline{M}(p)}{\Delta \overline{\omega}_1(p) - \Delta \overline{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{(T_{el}p + 1) - \frac{(\frac{S}{S_{kp}})^2}{1 + (\frac{S}{S_{kp}})^2} (T_{el}p + 2)}{(T_{el}p + 1)^2 + (\frac{S}{S_{kp}})^2}, \quad (3.13)$$

де $\gamma = \frac{U_{1a}}{U_{1aH}}$ - відносна напруга статора;

$\nu = \frac{\omega_1}{\omega_{1H}}$ - відносна частота напруги статора. $\nu = 0,8$.

Або в спрощеному виді

$$\frac{\Delta \overline{M}(p)}{\Delta \overline{\omega}_1(p) - \Delta \overline{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_{el}p + 1}. \quad (3.14)$$

Відповідно на підставі рівняння (3.1) маємо

$$\frac{\Delta \overline{M}(p)}{\Delta \overline{\omega}_1(p) - \Delta \overline{\omega}(p)} = \left(\frac{\gamma}{\nu} \right)^2 \frac{1}{T_M p}, \quad (3.15)$$

де $T_M = \frac{J \omega_{0H}}{M_{П.Ф.Н.}}$ - механічна постійна часу двигуна.

При розробці математичної моделі електропривода використано декілька допущень:

- частотний перетворювач, який працює у замкнутій системі керування по швидкості, здатен виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна таким чином, що двигун працює на практично лінійній частині характеристики (момент опору від 0 до номінального і ковзання від 0 до номінального);

- вважаємо, що датчик швидкості має дуже малу інерційність, яку можна не брати до розрахунків.

Складаємо структурну схему для подальшого моделювання, виходячи з припущень, що система керування з частотним перетворювачем у складі замкненої системи керування відповідає по структурі двоконтурній системі підлеглого керування із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром швидкості.

Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні, побудована на підставі виразів (3.14), (3.5), показана на рисунку 3.4. [1,15].

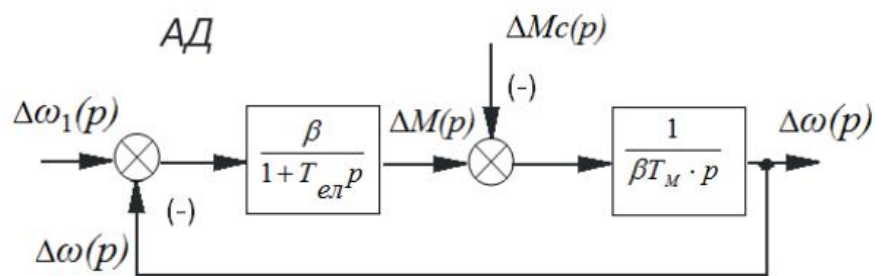


Рисунок 3.4 - Спрощена структурна схема асинхронного двигуна при частотно-струмовому керуванні

На рисунку 3.5 наведена структурна схема такого привода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна.

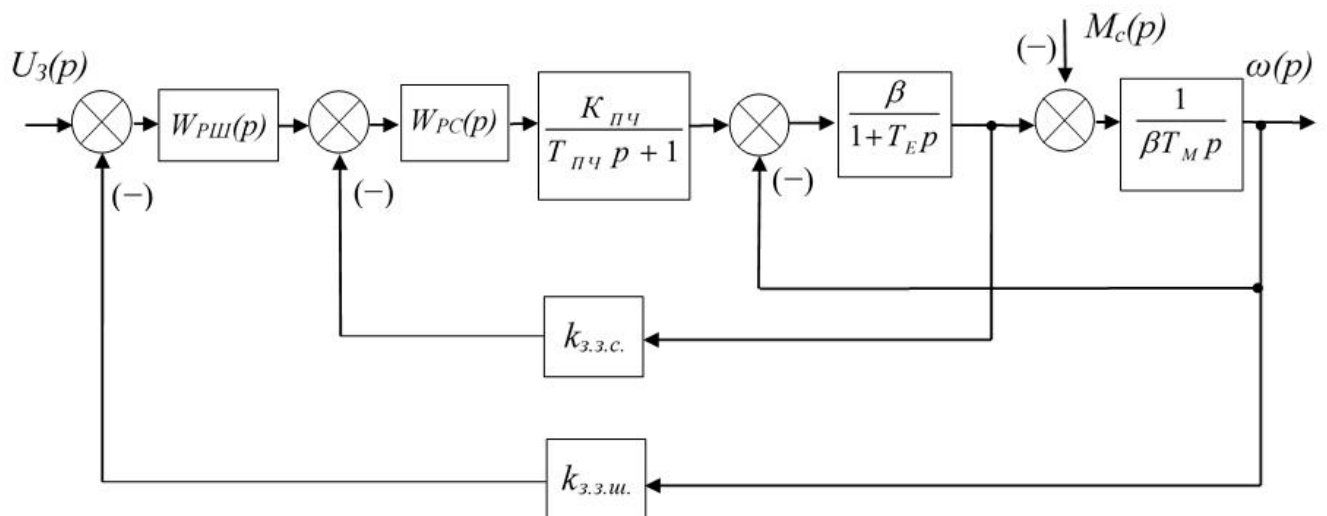


Рисунок 3.5 - Структурна схема електропривода зі спрощеною математичною моделлю електродвигуна

3.2 Розрахунок параметрів регуляторів електропривода з частотно-струмовим керуванням

Розглянемо докладніше структурну схему зображену на рисунку 3.5.

На схемі (рисунк 3.4) прийняті наступні позначення:

$W_{PII}(p)$ – передатна функція регулятора швидкості;

$W_{PC}(p)$ – передатна функція регулятора струму;

β – модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики;

$k_{з.з.с}$ – еквівалентна електромагнітна постійна часу кіл статора і ротора АД;

$K_{ПЧ}$ – передатний коефіцієнт перетворювача частоти;

$T_{ПЧ}$ – постійна часу кола керування ПЧ, яка при високих частотах модуляції вихідної напруги промислових ЧП (2...50 кГц) не перевищує 0,001с.

Зворотні зв'язки за струмом та швидкістю виконаємо за допомогою пропорційних ланок з коефіцієнтами $K_{ДС}$ і $K_{ДШ}$ відповідно.

Регулятори швидкості і струму приймаємо як пропорційно-інтегральні ланки з коефіцієнтами передачі K_{PII} і K_{PC} та постійними часу T_{PII} і T_{PC} відповідно:

$$W_{PII}(p) = K_{PII} + \frac{1}{T_{PII} \cdot p};$$

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

Структурна схема системи керування електропривода з наведеними передатними функціями регуляторів зображена на рисунку 3.6.

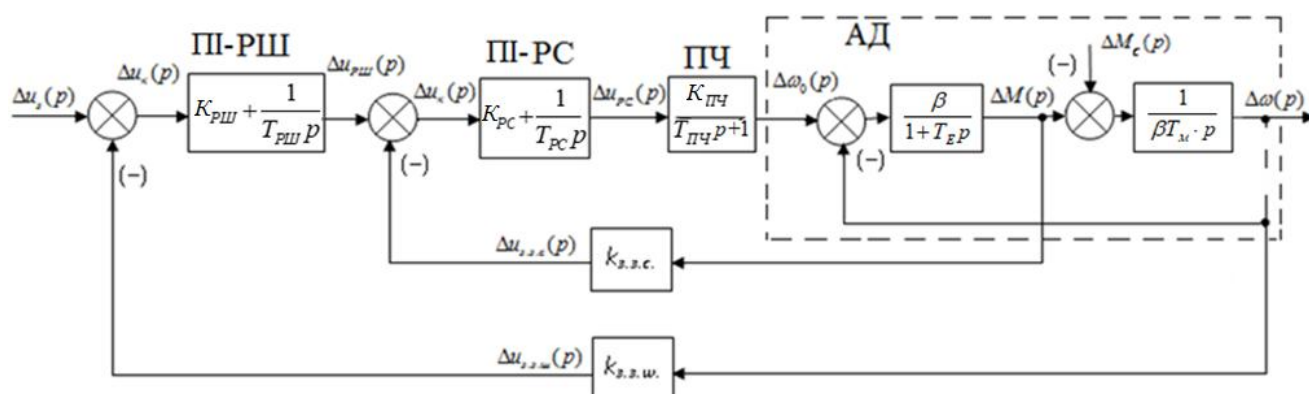


Рисунок 3.6 - Структурна схема системи керування електропривода

Розрахуємо параметри елементів структурної схеми, зображеної на рисунку 3.6.

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів взяті з таблиці 2.1(розділ 2) для електродвигуна типу АИУМ225М4. [16]

Параметр	Значення
Потужність електродвигуна P_H , кВт	55
Число пар полюсів	4
Частота обертання поля статора (умовна), об/хв.	1500
Швидкість обертання валу (фактична), об/хв.	1480
Номінальна частота мережі f , Гц	50
Номінальна напруга U , В	380
Струм при 380 В, I_H , А	110
Ковзання S_H , %	1,6
Критичне ковзання S_{KP} , %	10
ККД %	92,5
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$,	0,87
Кратність пускового моменту, $M_{ПВСК} / M_H$	3,2
Кратність максимального моменту, M_{MAX} / M_H	3,1
Кратність пускового струму, I_{II} / I_H	7,5
Момент інерції ротора J_o , кг·м ²	0,2

Виконуємо розрахунок чисельних даних для елементів структурної схеми.

Кутова швидкість холостого ходу електродвигуна, $\omega_{ДВ}$, с^{-1} ,

$$\omega_{ДВ} = \frac{\pi \cdot n_{ДВ}}{30}; \quad \omega_{ДВ} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальний момент двигуна M_H , $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_{ДВ}}; \quad M_H = \frac{55000}{157} = 350,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критичний момент електродвигуна M_K , $\text{Н} \cdot \text{м}$,

$$M_K = 3M_H; \quad M_K = 3 \cdot 350,3 = 1051 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кутова номінальна частота напруги, підведеної до статора при його номінальній частоті живлення ($f_{1ном} = 50 \text{ Гц}$) ω_{1H} , с^{-1} ,

$$\omega_{1H} = 2\pi \cdot f_H; \quad \omega_{1H} = 2\pi \cdot 50 = 314,15 \text{ с}^{-1}.$$

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики β , $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}}$,

$$\beta = \frac{2M_K}{\omega_{0H} \cdot S_K},$$

де $S_{KP} = 0,1$ - критичне ковзання, (з таблиці 3.1).

$$\beta = \frac{2 \cdot 1051}{157 \cdot 0,1} = 133,9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}}.$$

Електромагнітна постійна часу T_E , с,

$$T_E = \frac{1}{\omega_{1H} \cdot S_K};$$

$$T_E = \frac{1}{314,15 \cdot 0,1} = 0,032 \text{ с.}$$

Електромеханічна постійна часу двигуна T_M , с,

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta},$$

де J_Σ - сумарний момент інерції електропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$,

$$J_\Sigma = J_\partial + 0,6 \cdot J_\partial,$$

$$J_\Sigma = 0,2 + 0,6 \cdot 0,2 = 0,32 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тоді

$$T_M = \frac{0,32}{133,9} = 0,024 \text{ с.}$$

Постійна часу частотного перетворювача $T_{ПЧ}$, с,

$$T_{ПЧ} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f},$$

де f – частота живлення двигуна (номінальна), Гц.

У нашому випадку: $f = 50$ Гц,

тоді
$$T_{ПЧ} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0033 \text{ с.}$$

Коефіцієнт підсилення частотного перетворювача приймаємо $K_{ПЧ} = 10$.

Для первинних розрахунків приймаємо, що величина постійної часу регулятора швидкості T_{PII} дорівнює величині постійної часу двигуна $T_D = T_M$, а регулятора струму T_{PC} – постійній часу частотного перетворювача T_{CH} .

Коефіцієнти підсилення регуляторів приймаємо $K_{PII} = 10$, $K_{PC} = 10$.

У якості ланок, що відповідають датчикам струму і швидкості застосуємо пропорційні ланки з коефіцієнтами підсилення регуляторів:

$$K_{ДС} = k_{з.з.с} \text{ і } K_{ДШ} = k_{з.з.ш}.$$

Приймаємо вхідну напругу $U_3 = 10\text{В}$.

Таким чином, вважаючи у сталому режимі похибку рівною 0, маємо коефіцієнта підсилення зворотного зв'язку за швидкістю $k_{з.з.ш}$, В·с

$$k_{з.з.ш} = \frac{U_3}{\omega_{ДВ}};$$

$$k_{з.з.ш} = \frac{10}{157} = 0,063 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Аналогічно при розрахунку коефіцієнта підсилення зворотного зв'язку за струмом $k_{з.з.с}$, $\frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{Н} \cdot \text{м}}$,

$$k_{з.з.с} = \frac{U_{PC}}{M_H / I_H};$$

$$k_{з.з.с} = \frac{10}{350,3 / 110} = 3,14 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{Н} \cdot \text{м}}.$$

3.3 Аналіз динамічних властивостей системи керування електропривода скребкового конвеєра

Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики	$\frac{H \cdot m}{c^{-1}}$	$\beta = 133,9$
Електромагнітна стала часу	с	$T_E = 0,032$
Електромеханічна постійна часу	с	$T_M = 0,024$
Постійна часу регулятора швидкості	с	$T_{PII} = 0,024$
Постійна часу перетворювача	с	$T_{ПЧ} = 0,0033$
Постійна часу регулятора струму	с	$T_{PC} = 0,0033$
Коефіцієнт підсилення (передачі) перетворювача	-	$K_{ПЧ} = 10$
Передатний коефіцієнт по швидкості	В·с	$k_{з.з.ш} = 0,063$
Передатний коефіцієнт по струму	$\frac{B \cdot A}{H \cdot m}$	$k_{з.з.с} = 3,14$
Коефіцієнт підсилення регулятора швидкості	-	$K_{PII} = 10$
Коефіцієнт підсилення регулятора струму	-	$K_{PC} = 10$

Передатні функції ланок:

– асинхронного двигуна

$$W_{AD}(p) = \frac{\beta}{T_E \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{\beta \cdot T_M \cdot p};$$

$$W_{AD}(p) = \frac{133,9}{0,032 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{133,9 \cdot 0,024 \cdot p} = \frac{133,9}{0,032 \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{3,21 \cdot p};$$

– перетворювача частоти

$$W_{ПЧ}(p) = \frac{K_{ПЧ}}{T_{ПЧ} \cdot p + 1}; \quad W_{ПЧ}(p) = \frac{10}{0,0033 \cdot p + 1};$$

– регулятора струму

$$W_{PC}(p) = K_{PC} + \frac{1}{T_{PC} \cdot p}; \quad W_{PC}(p) = 10 + \frac{1}{0,0033 \cdot p};$$

– регулятора швидкості

$$W_{PII}(p) = K_{PII} + \frac{1}{T_{PII} \cdot p}; \quad W_{PII}(p) = 10 + \frac{1}{0,024 \cdot p};$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом

$$W_{3.3.c}(p) = k_{3.3.c} \quad k_{3.3.c} = 3,14$$

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за швидкістю

$$W_{3.3.ш}(p) = k_{3.3.ш} \quad k_{3.3.ш} = 0,063$$

Дослідження динамічних характеристик системи керування проводиться за наступних умов:

– напруга завдання швидкості є стрибкоподібною зі значенням:

$$u_{3.ш.} = k_{3.3.ш} \cdot \omega_H;$$

$$u_{3.3.ш.} = 0,063 \cdot 157 = 10 \text{ В};$$

– статичний момент, що прикладений до валу двигуна, складає:

$$M_C = 30\% \cdot M_H;$$

$$M_C = 0,30 \cdot 350 = 105 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Після розрахунків усіх величин, що входять у структурну схему, вони були внесені у розрахункову модель для дослідження динаміки системи керування електропривода скребкового конвеєра (рисунки 3.7).

Моделювання виконувалося у середовищі програми Simulink пакету «MATLAB» [3].

На схемі зображено: «Step» – джерело східчастого впливу величиною 10 В; «Gain1» та «Gain2» - реалізують пропорційну складову ПІ-регуляторів швидкості та струму відповідно;

«Transfer Fcn1» та «Transfer Fcn2» - реалізують інтегральну складову ПІ-регуляторів швидкості та струму відповідно.

«Transfer Fcn3» - реалізує передатну функцію частотного перетворювача;

«Transfer Fcn4» та «Transfer Fcn5» – реалізують лінеаризовану модель двигуна;

«Gain4» та «Gain5» - датчики струму та швидкості відповідно;

За допомогою блоків «Gain3» та «Gain6» виконується перерахування отриманих даних у відносні одиниці (для спрощення подальшого порівняння).

«Scope1» та «Scope2» – використовуються для отримання графіку перехідного процесу за швидкістю та струмом відповідно.

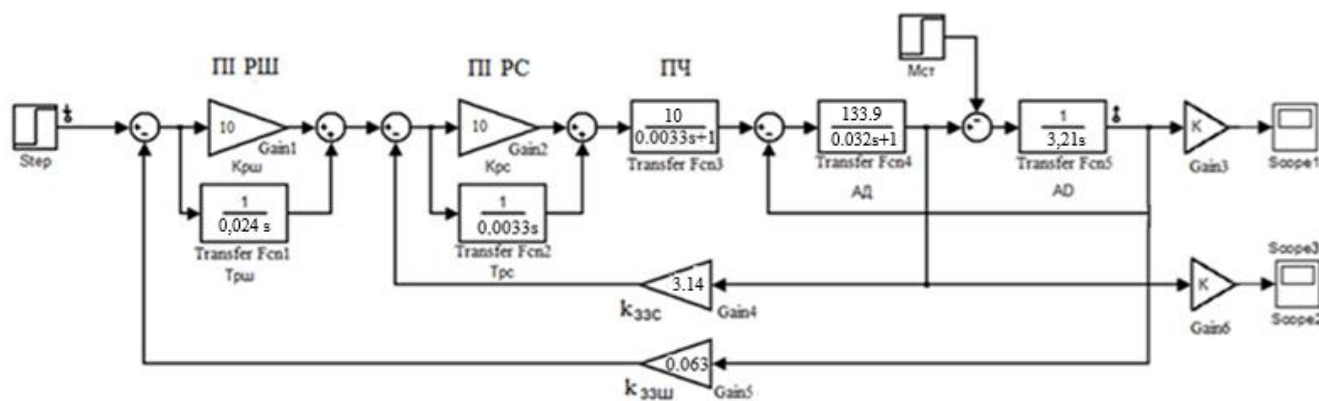


Рисунок 3.7 – Динамічна розрахункова модель системи керування

На рисунку 3.8 представлений перехідний процес системи з ПІ-регулятором швидкості.

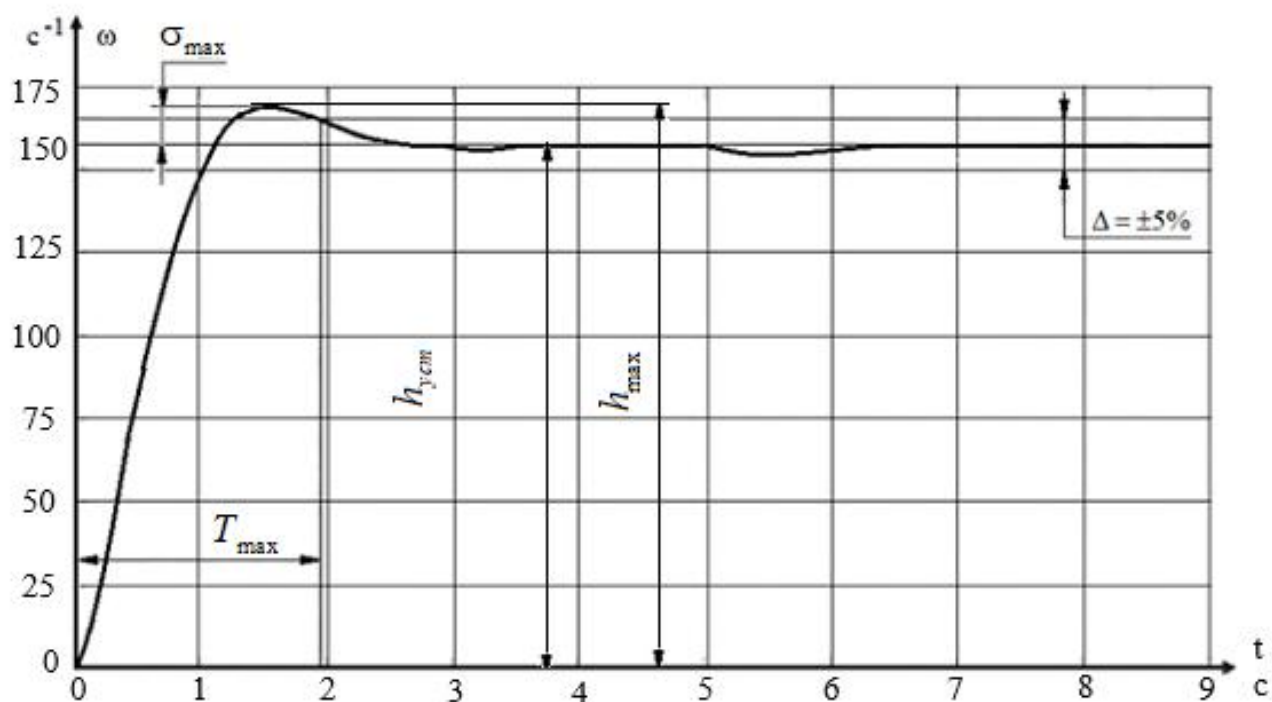


Рисунок 3.8 – Графік перехідного процесу по швидкості

На рисунку 3.9 наведений перехідний процес по струму.

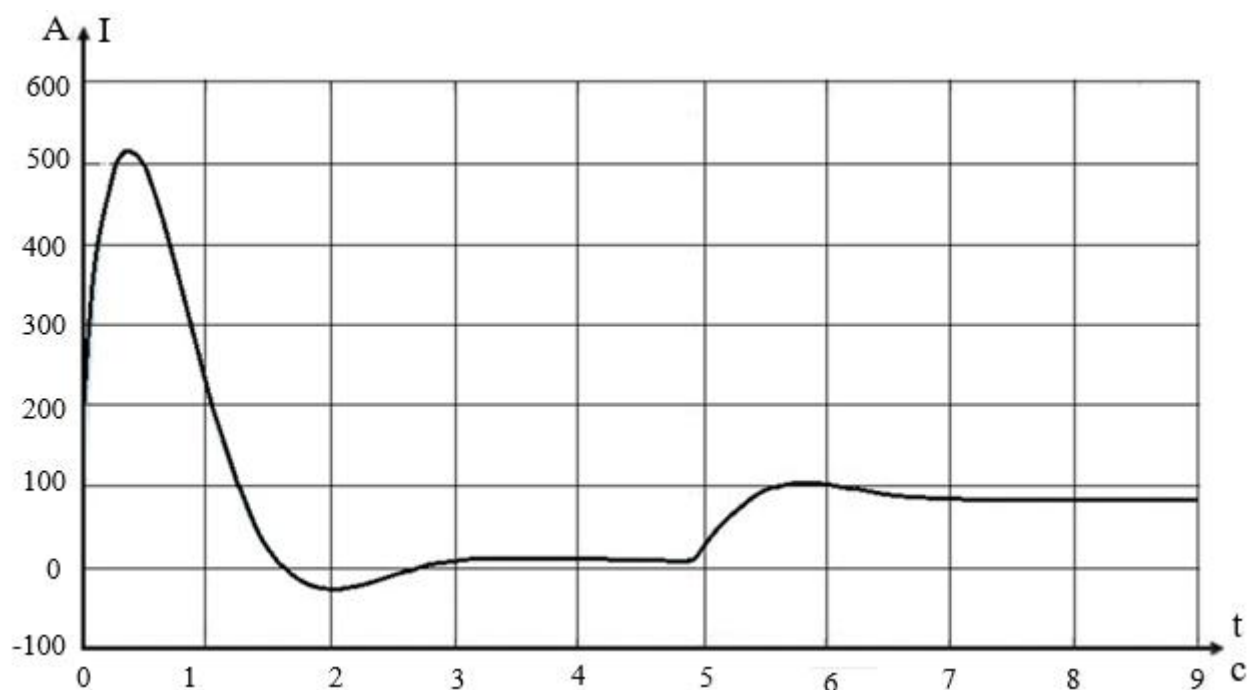


Рисунок 3.9 – Графік перехідного процесу по струму

З рисунку 3.8 визначені показники якості для перехідного процесу по швидкості.

З графіку видно, що система має наступні показники якості перехідного процесу: перегулювання $\sigma_{\max} = 7,4\%$; час перехідного процесу $T_{\max} = 1,97$ с; коливальність $N = 1$; статична похибка – похибка в сталому режимі роботи системи при дії на неї постійного сигналу, $\varepsilon = 0 \%$.

Такі показники якості задовольняють вимогам до системи керування.

Крім того, з характеристики перехідного процесу по струму (Рисунок 3.9) видно, що система працює задовільно, тобто максимальний пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ не перевищує допустимий струм короткого замикання, який в десятки разів перевищує номінальний.

Після подання навантаження на вал двигуна струм виходить на номінальний режим.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СКРЕБКОВОГО КОНВЕЄРА

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації системи керування електропривода скребкового конвеєра

Небезпечними факторами називають такі чинники життєвого середовища, які призводять до травм, опіків, обморожень, інших пошкоджень організму або окремих його органів і навіть до смерті [11].

Шкідливими факторами прийнято називати такі чинники життєвого середовища, які призводять до погіршення самопочуття, зниження працездатності, захворювання і навіть до смерті як наслідку захворювання.

До небезпечних та шкідливих факторів при експлуатації системи керування скребкового конвеєра можна віднести: 1) порушення цілісності, електричного кола; 2) шум та вібрація від роботи системи керування скребкового конвеєра.

Експлуатація електричних установок на підприємствах видобутку корисних копалин відноситься до розряду робіт, виконуваних в умовах підвищеної небезпеки. Сучасний стан у галузі охорони праці на підприємствах вугільної промисловості України є катастрофічним.

На сьогодні на більшій частині вугледобувних підприємств уже впроваджена нова система управління охороною праці, заснована на управлінні ризиками, відповідно до стандарту OHSAS 18001.

4.1.1 Дія та наслідки ураження електричним струмом

Порушення цілісності електричного кола може виникнути через коротке замкнення, перевантаження або механічні пошкодження. Це може привести до враження людини електричним струмом.

Електричний струм - це спрямоване переміщення електричних зарядів усередині провідної речовини (усередині металів, рідких провідників і т. д.).

Наслідок ураження людини електричним струмом залежить від багатьох факторів: опору тіла, тривалості протікання струму, шляху струму, роду і частоти струму, напруги.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, обумовлює перетворення електричної енергії в інші види і спричиняє термічну, електролітичну та біологічну дії.

Термічна дія полягає в тому, що струм, проходячи через тіло людини, нагріває його, як і будь-який провідник, через який він проходить, що може викликати опіки та обвуглювання тканин і всього тіла.

Електролітична дія полягає в тому, що електричний струм має властивість розщеплювати кислотні, лужні й інші провідні рідкі розчини на складові частини. Проходячи через тіло людини він справляє подібну електролітичну дію, розщеплюючи протоплазму і кров. У результаті клітини втрачають спроможність до нормального існування, обміну речовин і т. д.

Біологічна дія електричного струму полягає в тому, що при його входженні відбувається подразнення і збудження живих тканин організму і порушення внутрішніх біологічних процесів. У результаті можуть відбуватися мимовільні рухи кінцівок, голови, інших органів; може змінитися ритм биття серця; порушується робота легень.

Механічна дія електричного струму може призводити до розриву тканин внаслідок електродинамічного ефекту, а також миттєвого вибухоподібного утворення пари з тканинної рідини і крові; до вивихів, переломів. Дія електричного струму може призвести як до травм, так і до летальних наслідків.

Електротравми - опіки, електричні знаки (специфічне ураження тканин); металізація шкіри (частина розплавленого металу); електрофтальмія (запалення зовнішніх оболонок очей під дією ультрафіолетових променів електричної дуги); механічні ушкодження (розірвання шкіри, вивихи, переломи і т. д., викликані мимовільним скороченням м'язів).

Електричний удар. Розрізняють 4 ступені електричного удару: 1 ступінь — судорожне скорочення м'язів без утрати свідомості; 2 ступінь — судорожне скорочення м'язів з утратою свідомості, але зі збереженням дихання і роботи серця; 3 ступінь - втрата свідомості; порушення дихання або роботи серця; 4 ступінь - клінічна смерть.

4.1.2 Шум та вібрації при експлуатації системи керування скребкового конвеєра.

Система керування скребкового конвеєра є джерелом шуму та вібрації, що негативно впливає на здоров'я людини.

Шум, що виникає при роботі конвеєра, широкополосний постійний і при тривалому впливі на людину приводить до розвитку професійних захворювань, пов'язаних із втратою слуху, що приводить до втрати працездатності.

Шум відноситься до шкідливих факторів виробництва як і звук, виникає при механічних коливаннях у твердих, рідких і газоподібних середовищах. Шумом являються різні звуки, що заважають нормальній діяльності: людини і викликають неприємні відчуття. Звук являє собою коливальний рух пружного середовища, сприйманий людським органом слуху. Підвищення звукового тиску негативно впливає на орган слуху; для виміру голосності використовується двошкальний шумомір (у децибелах дБ). У цехах допускається рівень шуму близько 100 дБ. Рівень шуму вище 140 дБ може викликати болючий ефект.

Комплекс змін, що виникають в організмі під впливом шуму, останнім часом розглядається медиками як "шумова хвороба".

Вібрація - це коливання твердих тіл, яке виникає при зсуві центру ваги тіла, що рухається, обертається або при періодичній зміні форми тіла порівняно зі статичним станом цього тіла.

Вібрація викликає порушення фізіологічного і функціонального стану людини. Вплив вібрації не тільки погіршує самопочуття працюючого і знижує його продуктивність праці, але часто приводить до важкого професійного захворювання

- віброхвороби. Основним критерієм умов праці вібронезбезпечних професій є рівень впливу вібрації.

Розрізняють наступні умови праці і вібровпливу на людину: комфортні - не викликають дратівного впливу: нормальні - не знижують працездатності; вібробезпечні - не викликають несприятливого біологічного впливу; вібронезбезпечні - можливі патологічні зміни в організмі і віброхвороби.

4.2 Захист від шкідливих та небезпечних факторів при експлуатації системи керування скребкового конвеєра

Вимоги охорони праці працівників при експлуатації конвеєрів викладено в ПОТ Р М-029-2003.

Правила безпеки у вугільних шахтах наведені у НПАОП 10.0-1.01-10.

За умовами експлуатації транспортного електроустаткування існує ряд вимог і організаційних заходів.

Для запобігання впливу несприятливих факторів зовнішнього середовища електроустаткування повинно бути досить захищеним або розміщатися в кожухах і оболонках з необхідним ступенем захисту. Ступені захисту від впливу зовнішнього середовища встановлені ДСТ14254 - 80.

Важкі умови експлуатації в підземних виробках, особливо в шахтах, небезпечних за газом або пилом, вимагають застосування спеціального вибухозахищеного електрообладнання, в якому вжито заходів щодо забезпечення його придатності для використання у вибухонебезпечних умовах [5].

Заходи та засоби захисту людини від дії електричного струму. Установка і монтаж електроустаткування вантажопідіймальних машин, а також пристрої освітлення, заземлення і захисту повинні відповідати "Правилам улаштування електроустановок".

До технічних заходів, що забезпечують безпеку робіт, належать:

- відключення струмопровідних частин або устаткування, на яких будуть виконуватися ремонтні роботи або робіт из налагодження;

- встановлення попереджувальних, забороняючих плакатів і огорожень місця роботи;
- перевірка відсутності напруги;
- накладення переносних захисних заземлень на відключені струмопровідні частини з усіх боків, звідки може надходити напруга.

Перед включенням, розкриттям і ремонтом електрообладнання в шахті необхідно попередньо заміряти вміст метану в місці його розташування.

При експлуатації електроприводів найбільша кількість нещасних випадків відбувається при виявленні несправностей та наладці систем електропривода під струмом. При ремонті електропривода напруга попередньо знімається з головного розподільного щита шляхом відключення. На вимикачі вивішується плакат "Не вмикати! Працюють люди".

Для персоналу, обслуговуючого електроустановки і такого, що знаходиться в зоні впливу створюваного ними електричного поля, ДСН 3.3.6.096-2002. "Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів" установлює гранично припустимий рівень напруженості електричного поля частотою 50Гц 25кВ/м; перебування людини в електричному полі більшої напруженості без застосування засобів захисту заборонено.

Правилами безпеки дозволено застосування в підземних виробках шахт електричних мереж тільки з ізолюваною нейтраллю трансформатора (мережі, у джерелах живлення яких нульова точка ізолювана від землі або приєднана до заземлюючого пристрою через великий опір).

Електромережі із заземленою нейтраллю (нульова точка джерела живлення приєднана до заземлюючого пристрою провідником з малим опором) знаходять застосування на поверхні шахт в основному через те, що в них джерела електроживлення можна використовувати як для живлення трифазних споживачів (зокрема, лінійною напругою 380 В), так і окремих однофазних споживачів (фазною напругою того ж джерела – 220 В).

При роботі з електричними ланцюгами напругою до 1000 В застосовуються наступні основні захисні засоби: діелектричні рукавички; вимірювальні оперативні штанги; покажчики напруги; слюсарно-монтажний інструмент.

Основні захисні засоби – це такі, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу електричної установки. За допомогою основних засобів можна торкатись струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. До них відносяться: оперативні і вимірювальні штанги; ізолюючі і струмовимірні кліщі; покажчики напруги; спеціальні пристрої для ремонтних робіт (ізолювання майданчика, східці, ланки телескопічних вишок і т. д.).

Ізоляцію відкритих струмоведучих частин, установку захисних електричних і механічних блокувань; установок приборів автомагнітного відключення, реагуючих на напругу або струм замикання на корпус (землю), виконувати згідно з ДНАОП 0.00-1.01-07. "Правила будови і безпечної експлуатації вантажопідйомних кранів".

На підприємствах гірничої промисловості від ураження електричним струмом служать індивідуальні засоби захисту: спеціальні діелектричні чоботи, боти і галоші [2].

Засоби захисту від шуму та вібрації.

Для усунування негативних наслідків шуму та вібрації потрібно використовувати колективні методи і засоби. Найефективнішими є заходи зниження шуму в джерелі його виникнення.

Необхідно дотримуватись правил ДСН 3.3.6.037-99. "Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку" та ДСН 3.3.6.039-99. "Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації".

До засобів індивідуального захисту від шуму належать протишумні навушники, вкладиші, шоломи, протишумні костюми.

Методи боротьби з вібрацією зводяться в основному до демпфірування установок, машин, механізмів, використання різноманітного роду амортизаторів, вібропоглинання.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра розглянута система керування автоматизованого електропривода скребкового конвеєра гірничого підприємства.

Результати даної кваліфікаційної роботи бакалавра:

- в роботі розглянутий скребковий вибійний конвеєр типу СПЦ163;
- проведене обґрунтування вибору асинхронного електродвигуна серії АИУМ225М4 потужністю 55 кВт;
- був проведений аналіз існуючих систем керування АД на основі якого для даного електродвигуна вибраний комплектний електропривод моделі VFD- VL з частотно-струмовим керуванням;
- на основі функціональної схеми обраного електропривода та проведених розрахунків всіх його елементів була складена структурна схема;
- на основі математичного опису та розрахунків елементів системи складена розрахункова динамічна модель системи керування та проведений аналіз її динамічних властивостей;
- в результаті розрахунків були отримані такі параметри настроювання регуляторів, які забезпечили необхідні динамічні властивості системи;
- аналіз показників якості перехідного процесу показав, що перегулювання $\sigma_{\max} = 7,4 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 1,97$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка $\varepsilon = 0 \%$. Такі показники якості задовольняють вимогам до систем керування електроприводів транспортуючих механізмів.

З характеристики перехідного процесу по струму видно, що система працює задовільно, тобто максимальний пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ не перевищує допустимий струм короткого замикання, який в десятки разів перевищує номінальний. Після подання навантаження на вал двигуна струм виходить на номінальний режим.

Крім того в роботі розглянуті питання охорони праці при роботі з електрообладнанням конвеєрів. На підставі аналізу небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації електронного устаткування наведені рекомендації для зменшення їх негативного впливу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. **Видмиш А. А.** Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
2. Вугільна шахта: підручник для вузів / В.І. Бондаренко, В.Ю. Медяник, М.К. Руденко, І.А. Ковалевська. — Дніпро: Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «ДП») ЛізуновПрес, 2020. – 357 с.: іл. 118.
3. **Гераїмчук М. Д.** Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум / М.Д. Гераїмчук, Ю.Ф. Лазарєв, Т.О. Толочко. – К.:, 2006. – 175с.
4. **Грабко В.В.** Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. / В.В. Грабко, М.П. Розводюк, С.М. Левицький, М.О. Казак – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
5. Довідник з гірничого обладнання дільниць вугільних і сланцевих шахт [Текст]: навч. посібник / М.М. Табаченко, Р.О. Дичковський, В.С. Фальштинський та ін. – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 432 с.
6. **Козуб Ю.Г., Маслійов С.В.** Підйомно-транспортні машини: Підручник / Ю.Г. Козуб, С.В. Маслійов – Старобільськ: вид-во ДЗ "ЛНУ імені Тараса Шевченка", 2018. – 277с.
7. Конвейеры: Справочник / Р. А. Волков, А. Н, Гнутов, В. К. Дьячков и др, Под общ. ред. Ю. А. Пертена. Л.; Машиностроение, Ленингр, отд-ние, 1984. 367с с ил.
8. **Лісовський В. С.** Автоматизація виробничих процесів в гірничій промисловості / В. С. Лісовський, О. М. Закладний, М. Г. Борисюк, Я. М Гуманюк, А. М. Ковальчук – Київ: Факт, 2001. – 164с.
9. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах.
10. **Організація і технологія вантажно-розвантажувальних робіт :** електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного)

використання [Електронний ресурс] / В. П. Кужель, А. А. Кашканов, В. А. Кашканов, О. П. Антонюк. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 152 с.

11. **Основи охорони праці:** Навч. посіб. / В. В. Березуцький, Т. С. Бондаренко, Г. Г. Валенко та ін.; За заг. ред. В. В. Березуцького. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Х.: Факт, 2007. – 480 с.

12. **Павленко Т. П.** Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій. / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

13. Перетворювачі частоти VFD-VL. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.rts.ua/rus/catshop/736/0/23546/delta-electronics/>

14. **Регульований електропривод:** Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с.: іл.

15. **Теорія автоматичного керування :** навчальний посібник / П. В. Леонтьєв та ін. ; за заг. ред. П. В. Леонтьєва. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – 296 с.

16. Електродвигуни асинхронні вибухозахищені серії АИУМ225М4. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://systemax.ua/elektrodivigateli/vzryvozashishennye-elektrodivigateli/aimm/aimm225m4-55-kvt-1500-ob-min.html>. © Системакс.

ДОДАТОК А

Мультимедійна презентація

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Калініченко Дмитро Олександрович

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:

"Система автоматизованого керування скребкового конвеєра
гірничого підприємства"

Керівник роботи – Васильєв О.Г.

Слайд 1 мультимедійної презентації

АКТУАЛЬНІСТЬ, МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Актуальність теми. Для освоєння багатой мінерально-сировинної бази України застосовуються високопродуктивні вуглевидобувні комплекси по безупинній потоковій системі. Це потребує вдосконалення процесу доставки сировини за допомогою конвеєрного транспорту.

Тому впровадження частотно-регульованих асинхронних електроприводів для автоматизованого керування конвеєрними лініями у гірничодобувному виробництві є актуальною задачею.

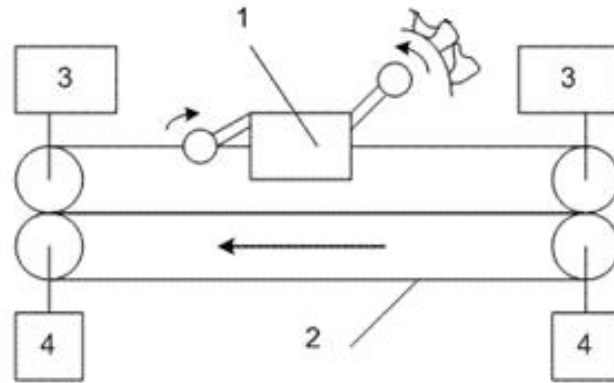
Мета роботи – удосконалення системи керування автоматизованого електропривода скребкового вибійного конвеєра типу СПЦ163.

Задачі роботи:

- розглянути автоматизовану систему керування електропривода конвеєра;
- провести вибір типу електродвигуна для привода конвеєра;
- провести аналіз існуючих, сучасних засобів та систем керування електродвигунами змінного струму і на базі цього аналізу вибрати найбільш підходящий електропривод для керування електродвигуном конвеєра;
- провести аналіз динамічних властивостей роботи системи керування;
- розглянути загальні положення по технічній експлуатації електрообладнання скребкового конвеєра.

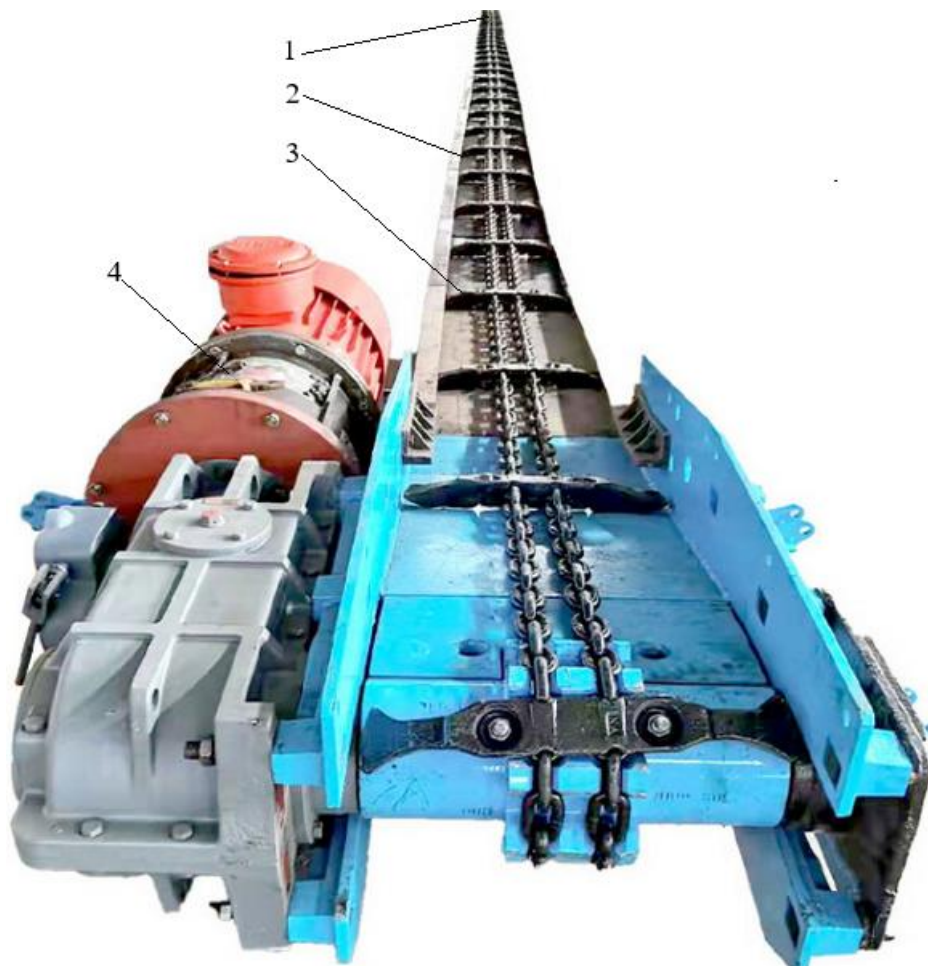
Слайд 2 мультимедійної презентації

СКРЕБКОВИЙ, ПЕРЕСУВНИЙ, ШАХТНИЙ КОНВЕЄР СПЦ163



1 - очисний комбайн; 2 - скребковий конвеєр; 3 - приводи комбайна;
4 - приводи конвеєра

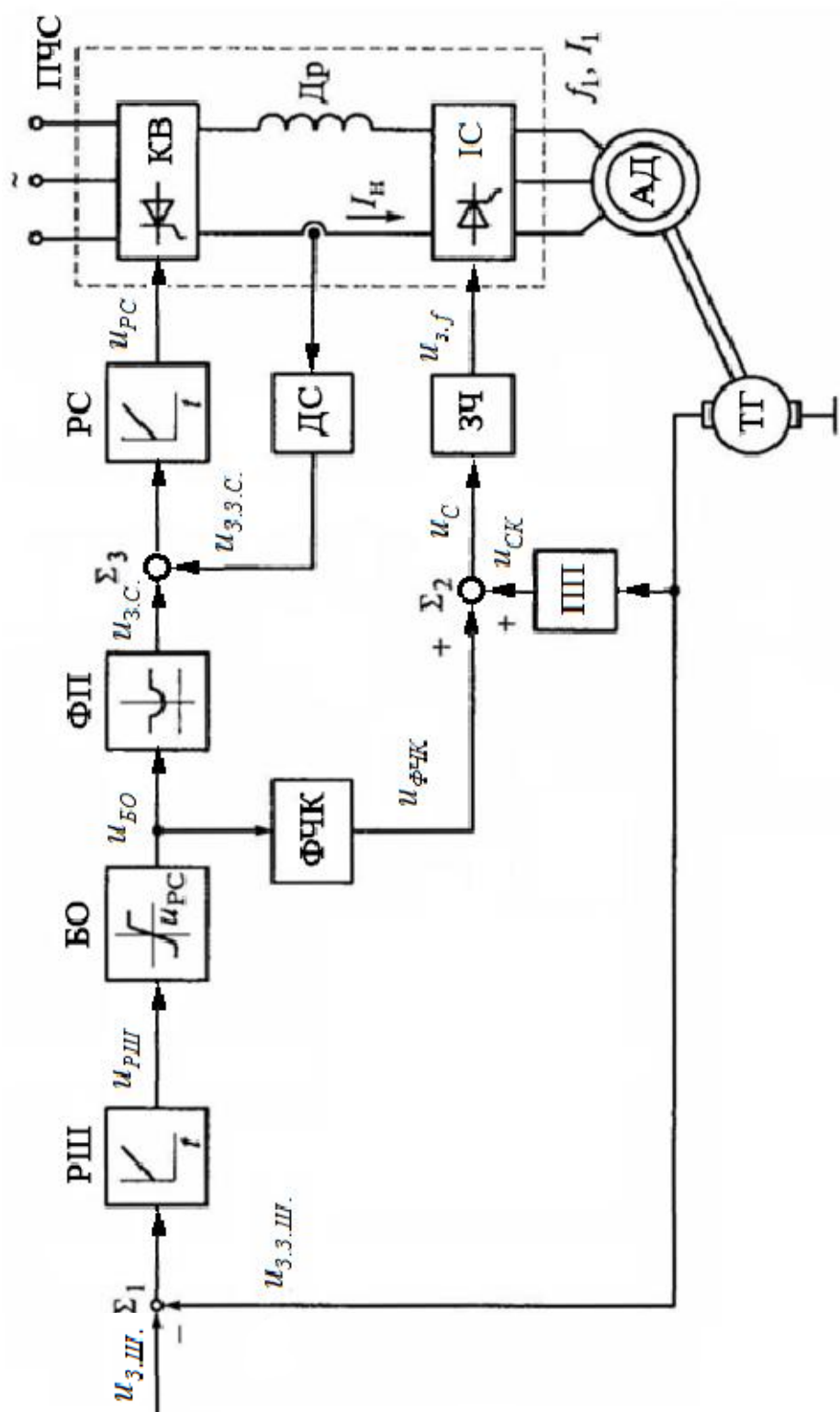
Спрощена структурна схема технологічного процесу транспортування вугілля по очисному забою



1 - кінцева головка; 2 - став; 3 - скребок; 4 - приводна станція
Загальний вид скребкового конвеєра

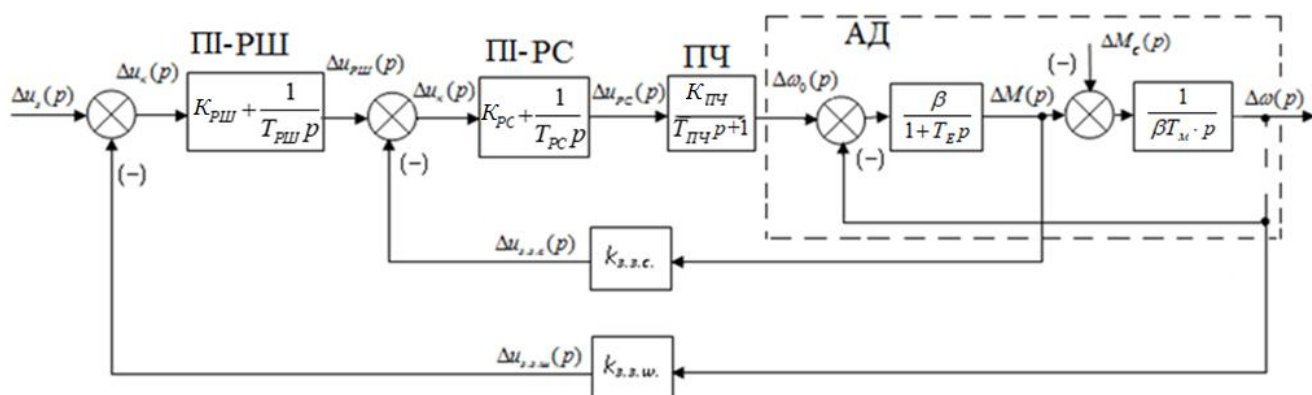
Слайд 3 мультимедійної презентації

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЗАМКНУТОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПЧ-АД З ЧАСТОТНО-СТРУМОВИМ КЕРУВАННЯМ

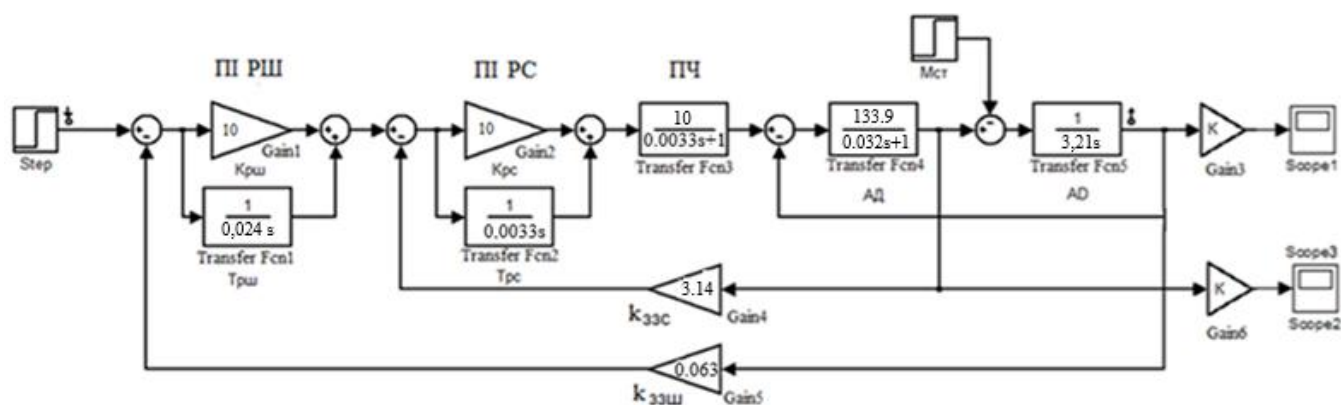


Слайд 4 мультимедійної презентації

СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

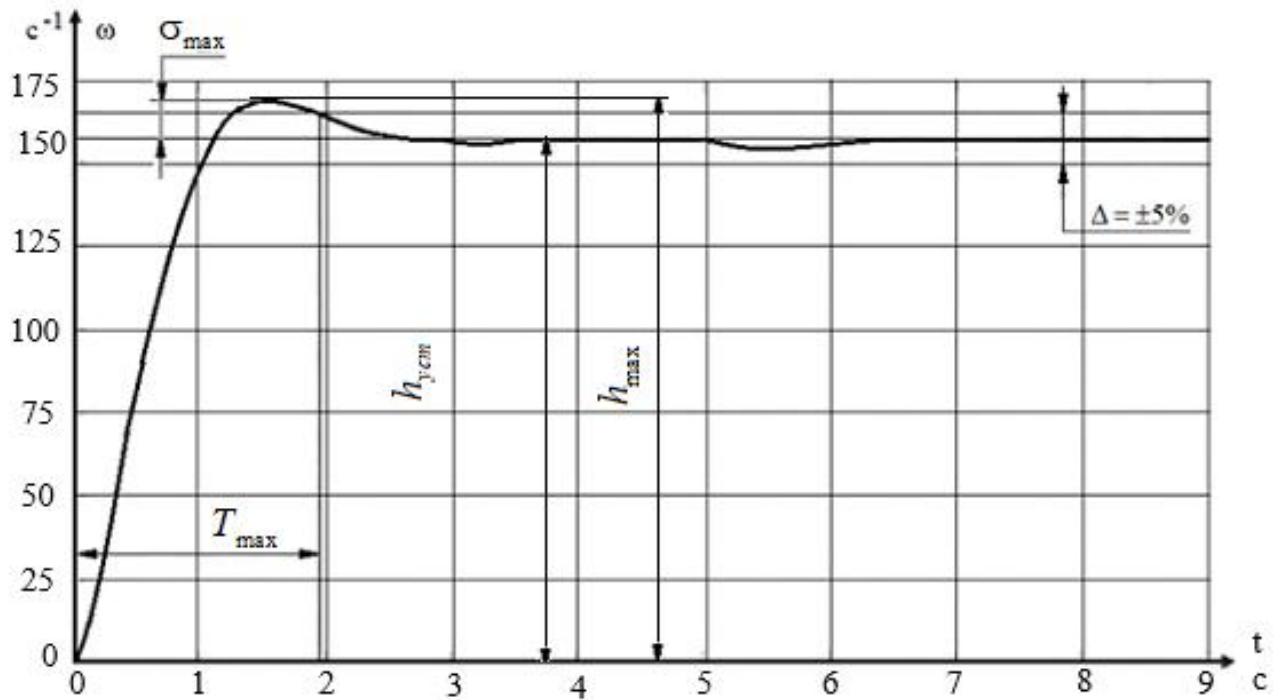


Структурна схема системи керування електропривода

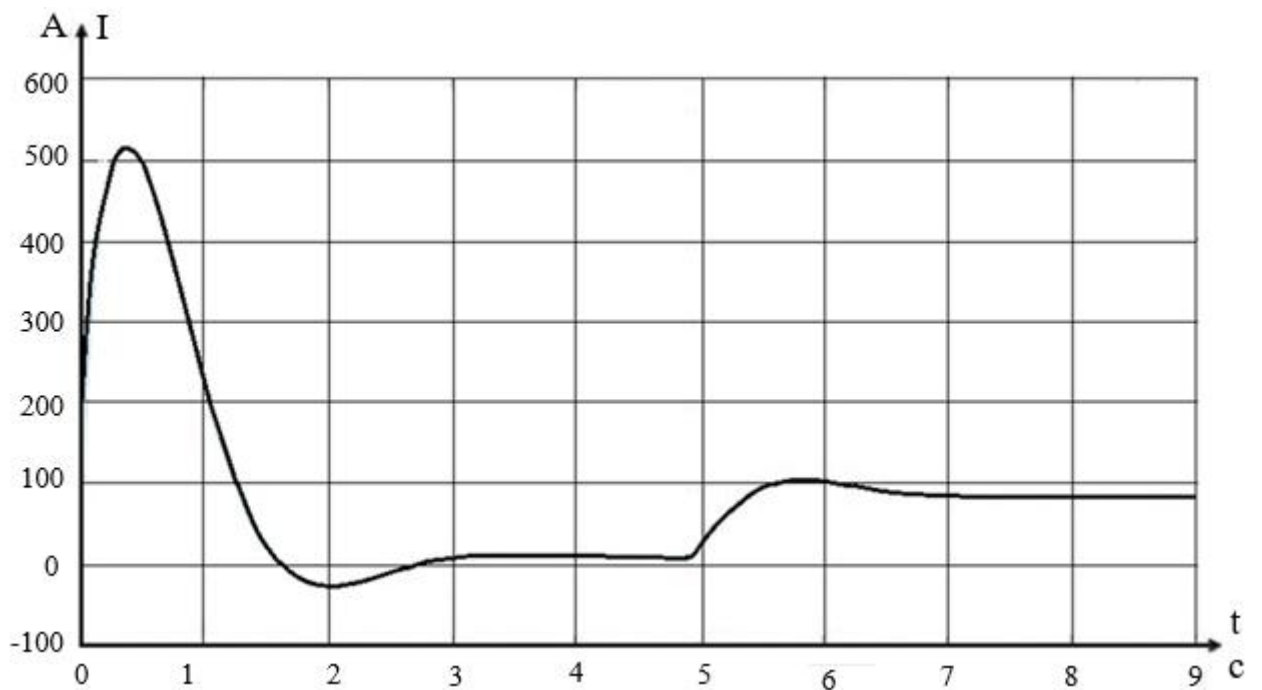


Розрахункова динамічна модель системи керування

АНАЛІЗ ДИНАМІКИ САК



Перехідна характеристика по швидкості



Графік перехідного процесу по струму

Слайд 6 мультимедійної презентації

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра розглядається система керування автоматизованого електропривода скребкового конвеєра гірничого підприємства.

Результати даної кваліфікаційної роботи бакалавра:

- в роботі розглянутий скребковий вибійний конвеєр типу СПЦ163;
- проведене обґрунтування вибору асинхронного електродвигуна серії АИУМ225М4 потужністю 55 кВт;
- був проведений аналіз існуючих систем керування АД на основі якого для даного електродвигуна вибраний комплектний електропривод моделі VFD- VL з частотно-струмовим керуванням;
- на основі функціональної схеми обраного електропривода та проведених розрахунків всіх його елементів була складена структурна схема;
- на основі математичного опису та розрахунків елементів системи складена розрахункова динамічна модель системи керування та проведений аналіз її динамічних властивостей;
- в результаті розрахунків були отримані такі параметри налаштування регулятора швидкості, які забезпечили необхідні динамічні властивості системи;
- аналіз показників якості перехідного процесу показав, що перегулювання $\sigma_{\max} = 7,4 \%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 1,97$ с, коливальність $N = 1$, статична похибка $\varepsilon = 0 \%$. Такі показники якості задовольняють вимогам до систем керування електроприводів транспортуючих механізмів.

З характеристики перехідного процесу по струму видно, що система працює задовільно, тобто максимальний пусковий струм $I_{\text{пуск}}$ не перевищує допустимий струм короткого замикання, який в десятки разів перевищує номінальний. Після подання навантаження на вал двигуна струм виходить на номінальний режим. Крім того в роботі розглянуті питання охорони праці при роботі з електрообладнанням конвеєрів.