

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Сергій КОВБАСА

(підпис)

“ ” 20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи автоматизації,
електропривод та електромобільність»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

на тему: Автоматизований електропривод ліфтової підйомної установки

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ЕП-01
(шифр групи)

Коваленко Данііл Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник асистент Сергієнко Олег Вячеславович

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

(підпис)

Консультант

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

(підпис)

Рецензент асистент Вишневський Олег Володимирович

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

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка)

(підпис)

Київ – 2024 р.

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4				Завдання на дипломний проект	2		
2	A4	141. 0106.006.БР			Пояснювальна записка	115		
3	A1	141. 0106.006.БР			Креслення загального виду	1		
4	A1	141. 0106.006.БР			Схема електрична ...	1		
5	A1	141. 0106.006.БР			Результати досліджень ...	1		
					</			

Пояснювальна записка до дипломного проекту

на тему: Автоматизований електропривод ліфтової підйомної установк

Київ – 2024 р.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики
(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Освітньо-професійна програма – Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Сергій КОВБАСА
(підпис)
« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Коваленка Данііла Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Автоматизований електропривод ліфтової підйомної установки
керівник проекту: Сергієнко Олег Вячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту: 1. Асинхронний двигун 4A200M4У3 потужністю 37 кВт та на 1500 об/хв; 2. Вантажопідйомність: 2500 кг; 3. Максимальна швидкість руху 2.5 м/с; 4. Прискорення руху 1.5 м/с²; 5. Висота підйому ліфту 80 м.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Опис технологічного процесу та будови вантажної ЛПУ; 2. Актуальність теми дипломного проекту; 3. Вимоги до електроприводу вантажної ЛПУ; 4. Розрахунок потужності двигуна для вантажної ЛПУ; 5. Вибір електродвигуна та усіх елементів; 6. Математична модель та розробка системи векторного керування швидкості та потоку АД. 7. Моделювання та дослідження перехідних процесів та динамічних і статичних характеристик для вантажної ЛПУ.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Загальна схема структурна схема ЛПУ, структурна схема алгоритму векторного керування, схема керування ліфтом _____

6. Консультанти розділів проекту*

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

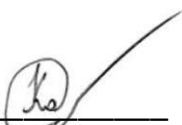
* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

7. Дата видачі завдання 15.04.2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	24.04.2024 р.	
2	Опис актуальності та новизни проекту	28.04.2024 р.	
3	Дослідження та розгляд вимог до елементів ЛПУ	10.05.2024 р.	
4	Розрахунок усіх потрібних даних для елементів ЛПУ	19.05.2024 р.	
5	Дослідження та вибір двигуна та елементів електроприводу	25.05.2024 р.	
6	Опис математичної моделі та векторного керування	01.06.2024 р.	
7	Моделювання різних дослідів та дослідження різних перехідних процесів та поведінки двигуна	06.06.2024 р.	
8	Розробка графічної частини та оформлення пояснювальної записки	10.06.2024 р.	
9	Підготовка доповіді на захист дипломного проекту	17.06.2024 р.	

Студент


(підпис)

Даніїл КОВАЛЕНКО

Керівник проекту
(підпис)

Олег СЕРГІЄНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить сторінок 95, рисунків 60, 3 листа графічної частини

Метою бакалаврської роботи є розробка автоматизованого електроприводу для вантажної ліфтової підйомної установки. Концепції дослідження систем керування електроприводу на базі перетворювача частоти ABB ACS 580. Об'єктом дослідження бакалаврської роботи є процеси автоматичного керування процесом електромеханічного перетворення енергії в асинхронному двигуні при живленні від перетворювача частоти. Предметом дослідження є закони векторного керування асинхронним двигуном при живленні від перетворювача частоти ABB ACS 580. У роботі систематизовано знання про функціональні та технічні можливості перетворювача ABB ACS 580. Проведено експериментальні дослідження асинхронного електроприводу на основі ABB ACS 580 при непрямому векторному керуванні, на основі чого було отримано перехідні процеси та графіки у середовищі MATLAB/Simulink. Аналітично розраховано параметри схеми заміщення асинхронного двигуна. Проведено моделювання режимів роботи, досліджених експериментально.

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, НЕПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИКА МОДЕЛЬ, АВТОМАТИЗОВАНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА

					141.0106.006.БР			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Коваленко Д.С.				Автоматизований електропривод для вантажної ЛПУ Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.	Сергієнко О.В.						6	5
Реценз.	Вишневський О.В.					КПІ ім.І.Сікорського, ФЕА, гр.ЕП-01		
Н. Контр.								
Затверд.	Ковбаса С.М.							

ABSTRACT

The bachelor thesis contains 95 pages, 60 figures, 3 plots, and appendices.

The objective of the thesis is development of a concept for research of electric drive control systems based on the frequency converter ABB ACS 55. The object of investigation of the thesis is processes of automatic control of electromechanical conversion in induction motor fed from the frequency converter. The subject of research is laws of the frequency control of induction motor fed from the ABB ACS 55. The thesis categorizes the knowledge about functional and technical possibilities of the converter ABB ACS 55. Experimental tests were carried out for the induction motor drive based on the ACS 55 under linear and quadratic frequency control laws. The research develops the methodology of experiments performance. The parameters of the induction motor were also identified. The block diagrams describing the control system were verified by simulations matching the experimental results.

FREQUENCY CONVERTER, INDUCTION MOTOR, VECTOR CONTROL,
INDIRECT VECTOR CONTROL, MATHEMATICAL MODEL, AUTOMATED
ELECTROMECHANICAL SYSTEM

Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.									Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.											7	6
Реценз.									КПІ ім.І.Сікорського, ФЕА, гр.ЕП-01			
Н. Контр.												
Затверд.												

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА БУДОВИ ЛІФТОВОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ.....	11
1.1 Коротка історія ЛПУ.....	11
1.2 Опис роботи ліфтової підйомної установки.....	13
1.2.1 Існуючі кінематичні схеми ЛПУ та вибір схеми для дипломного проекту.....	15
1.3 Детальний опис будови ЛПУ.....	19
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1.....	32
2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ.....	32
2.1 Актуальність теми.....	33
2.2 Наукова новизна.....	34
2.3 Практична значимість.....	35
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2.....	37
3. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ЛПУ.....	39
3.1 Технічне завдання для проектування.....	39
3.2 Вимоги до елементів ЛПУ.....	39
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3.....	45
4. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ДЛЯ ВАНТАЖНОЇ ЛПУ.....	47
4.1 Розрахунок швидкостей та часу для ЛПУ.....	47
4.2 Розрахунок рушійних зусиль та сил, що діють на ЛПУ.....	50
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4.....	57
5. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА УСІХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВАНТАЖНОЇ ЛПУ.....	58
5.1 Вибір електродвигуна для ЛПУ.....	58
5.2 Вибір перетворювача частоти для ЛПУ.....	64
5.3 Вибір редуктора для ЛПУ.....	66
5.4 Канати для ЛПУ.....	68
5.5 ПЛК для ЛПУ.....	70
5.6 Вибір кнопок керування ЛПУ.....	72

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5.....	73
6. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ТА ПОТОКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА.....	75
6.1 Математична модель АД	75
6.2 Синтез алгоритму векторного керування швидкістю та потоком.....	85
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 6.....	87
7. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАНТАЖНОЇ ЛПУ.....	89
7.1 Опис схеми непрямого векторного керування	89
7.2 Перехідні процеси при сталій швидкості та номінальному моменті	97
7.3 Перехідні процеси при сталій швидкості та моменті $0.8 \cdot M_n$	103
7.4 Перехідні процеси при сталій швидкості та номінальному моменті зі застосуванням трьох похідних	110
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 7.....	115
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	119

ВСТУП

Сучасні транспортні системи, зокрема метрополітени, є критично важливими елементами інфраструктури великих міст. Вони забезпечують щоденні перевезення мільйонів пасажирів, а також відіграють важливу роль у логістиці вантажних перевезень. Ефективність функціонування метрополітену значною мірою залежить від технологічного рівня його обладнання та систем керування. Він розпочав свою діяльність 6 листопада 1960 року, ставши третім метрополітеном у Радянському Союзі після московського та ленінградського. Перша лінія складалася з п'яти станцій і мала довжину 5,2 км, з'єднуючи центральну частину міста з його південно-західними районами. Відкриття першої лінії стало важливою подією для міста, оскільки метрополітен значно покращив транспортне сполучення та зменшив навантаження на наземний транспорт. З роками мережа метрополітену постійно розширювалася. Друга лінія, Оболонсько-Теремківська (синя лінія), була відкрита в 1976 році, а третя, Сирецько-Печерська (зелена лінія), – в 1989 році. Сьогодні метрополітен налічує 52 станції та має загальну довжину понад 67 км. Зараз на київський метрополітен припадає понад 50% загального обсягу міських пасажирських перевезень. Складається метро з трьох діючих ліній загальною довжиною майже 70 кілометрів та 52 діючі станції, платформи яких розраховані на п'ятивагонні поїзди. У центрі міста лінії мають три пересадочних вузли.

Структура підприємства складається з декількох департаментів та служб, кожен з яких виконує певні функції. Управління здійснюється генеральним директором та його заступниками, які приймають ключові рішення та керують адміністративними відділами, що займаються плануванням, економікою, фінансами та кадровими питаннями. Технічні служби відповідають за технічне обслуговування та ремонт поїздів, енергопостачання, обслуговування колій та систем сигналізації і зв'язку. Служби експлуатації забезпечують належне функціонування станцій, координують рух поїздів та підтримують безпеку

працівників і пасажирів. Служби забезпечення займаються закупівлями, управлінням персоналом та інформуванням громадськості про діяльність метрополітену.

Основні напрями роботи підприємства включають перевезення пасажирів, розширення мережі, технічне обслуговування та ремонт, енергозабезпечення, безпеку та інформаційне забезпечення. Щодня метрополітен обслуговує мільйони пасажирів, забезпечуючи їх перевезення на роботу, навчання та інші заходи. Підприємство постійно працює над розширенням мережі, впроваджуючи нові технології та інноваційні рішення для покращення якості обслуговування та підвищення ефективності роботи. Сучасні проекти включають модернізацію рухомого складу, автоматизацію систем управління, впровадження енергозберігаючих технологій та розробку інформаційних сервісів для пасажирів.

В рамках даного дипломного проекту пропонується розробка автоматизованого електроприводу для вантажної ЛПУ. Київський метрополітен, як один з найбільших та найважливіших транспортних вузлів України, постійно стикається з викликами, пов'язаними з необхідністю підвищення продуктивності, зниження енергоспоживання та забезпечення безпеки руху. Особливо актуальним є питання доставки обладнання та техніки на станції та в шахти метро. Підземне розташування метрополітену створює додаткові труднощі при виникненні аварійних ситуацій, таких як проривання шахт, затоплення водою, тріскання прольотів тощо. У таких випадках необхідно оперативно доставити на місце аварії відповідне обладнання та техніку для усунення проблеми. Одним із найефективніших рішень цієї проблеми є впровадження вантажних ліфтових підйомних установок (ЛПУ).

1. ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА БУДОВИ ЛІФТОВОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

Ліфтові підйомні установки (ліфти) є важливими елементами інфраструктури, що забезпечують вертикальне переміщення людей та вантажів між поверхами. Вони мають широке застосування в житлових, комерційних, офісних та промислових будівлях. Ліфти є чи не найпоширенішими з усіх підйомних механізмів.

Сучасні ліфти бувають різних типів: пасажирські ліфти для перевезення людей з комфортними кабінами, вантажні ліфти для транспортування важких предметів з міцними кабінами, панорамні ліфти з прозорими стінами для кращого виду, службові ліфти для персоналу та доставки, евакуаційні ліфти для екстреної евакуації. Також для різних ліфтів має бути різна вантажопідйомність, наприклад, для пасажирських ліфтів складає від 250 до 1500 кг, вантажних – 50 - 5000 кг. Основними компонентами ліфта є кабіна, шахта, лебідка, противага та двері. Нові ліфтові підйомні установки включають також в собі різні системи безпеки, такі як: систему аварійного гальмування, резервне живлення та сигналізацію з зв'язком для виклику допомоги. Сучасні інновації в ліфтах включають інтелектуальні системи управління для оптимізації руху, енергоефективні технології з рекуперацією енергії та використання Інтернету речей для віддаленого моніторингу та керування.

1.1 Коротка історія ЛПУ

Ліфтові підйомні установки мають багату історію, яка починається ще з давніх часів. У Давньому Єгипті, Греції та Римі використовували примітивні підйомні механізми для будівництва і транспортування важких вантажів. Грецький вчений Архімед у 3 столітті до н.е. винайшов шнек, що став основою для майбутніх підйомних механізмів. У середньовічних замках застосовували

прості ліфти для підйому людей і вантажів, які працювали на основі шківів і канатів.

У XVIII столітті король Франції Людовик XV встановив у Версалі ліфт, відомий як "літучий стілець", що працював на мускульній силі. З розвитком парових двигунів у 19 столітті з'явилися парові ліфти, наприклад, у Лондоні 1823 року для підйому туристів на оглядовий майданчик.

Револьюційним став винахід Еліші Отіса у 1852 році системи безпеки, яка запобігала падінню кабіни у разі обриву канатів. Перший пасажирський ліфт був встановлений у 1857 році в Нью-Йорку. У 1880 році німецький інженер Вернер фон Сіменс створив перший електричний ліфт, що значно збільшило швидкість і надійність ліфтів. Перший комерційний електричний ліфт був встановлений у Нью-Йорку у 1889 році.

З розвитком хмарочосів у XX столітті ліфтові технології зазнали значного розвитку. У 1903 році з'явився перший ліфт з автоматичними дверима. У 1920-х роках з'явилися автоматичні ліфти з кнопковим управлінням, що зробило їх більш зручними і доступними.

Сучасні ліфти оснащені інтелектуальними системами управління, що оптимізують їх роботу та зменшують час очікування. Енергоефективні технології, такі як рекуперація енергії і частотні перетворювачі, зменшують споживання електроенергії та підвищують комфорт. Панорамні ліфти з прозорими стінами використовуються в торгових центрах і готелях, а високошвидкісні ліфти, такі як у хмарочосі Burj Khalifa, забезпечують швидке переміщення на великі висоти.

Майбутнє ліфтів пов'язане з Інтернетом речей (IoT), що дозволяє віддалено моніторити стан ліфтів і проводити технічне обслуговування у реальному часі. Розробляються магнітно-левітаційні ліфти, які використовують магнітні поля для переміщення кабін без використання канатів. Інноваційні

технології дозволяють створювати ліфти для надвисоких будівель, таких як космічні ліфти, що можуть переміщуватися між Землею і орбітою.

Таким чином, ліфтові підйомні установки пройшли довгий шлях від примітивних механізмів до сучасних високотехнологічних систем, забезпечуючи комфорт, безпеку і ефективність у сучасних будівлях.

1.2 Опис роботи ліфтової підйомної установки

Для початку потрібно розібрати з яких основних компонентів складається ЛПУ, а далі можемо розглядати сам технологічний процес роботи. В загальному процес включає в себе декілька ключових компонентів та етапів. Основні компоненти ліфтової установки складаються з кабіни, шахти, лебідки, противаги, дверей, канатів, електродвигуна, пульта керування та системи безпеки.

Кабіна: Приміщення для перевезення пасажирів або вантажів, обладнане панеллю управління, освітленням, вентиляцією, а іноді й кондиціонером та дзеркалами. Двері кабіни можуть відкриватися і закриватися автоматично або вручну.

Шахта: Вертикальна конструкція, в якій переміщується кабіна ліфта, виготовлена з бетону, сталі або інших міцних матеріалів. Вона містить напрямні рейки для руху кабіни.

Лебідка: Механізм, що приводить у дію канати або інші підйомні пристрої кабіни. Лебідка може бути з редуктором або без редуктора і використовується для підйому та опускання кабіни за допомогою електродвигуна.

Противага: Механізм, що врівноважує вагу кабіни, знижуючи навантаження на двигун. Противага рухається у протилежному напрямку до кабіни, що зменшує споживання енергії.

Двері: Зовнішні двері на поверхах та внутрішні двері кабіни, оснащені автоматичними системами безпеки для запобігання травмам пасажирів.

Канати: Сталеві троси, які підтримують і піднімають кабіну. Вони міцні та надійні, здатні витримувати значні навантаження.

Електродвигун: Основний двигун, який приводить у дію лебідку. Зазвичай це асинхронний або синхронний двигун з частотним перетворювачем для плавного регулювання швидкості.

Пульт керування: Панель управління всередині кабіни, що дозволяє пасажирам обирати потрібний поверх, а також кнопки виклику на поверхах для виклику ліфта.

Система безпеки: Включає аварійні гальма, резервне живлення, датчики та сигналізацію, які запобігають аварійним ситуаціям і забезпечують безпеку пасажирів.

Технологічний процес роботи ЛПУ розподіляється на етапи. В першу чергу нам потрібно натиснути кнопку для виклику ліфта. Після натискання сигнал передається до центрального контролера, який визначає поточне місце розташування ліфта. Якщо кабіна перебуває на зупинці, з якої надійшов виклик, відкриваються двері кабіни і шахти на даній зупинці. Якщо кабіна знаходиться на іншому поверсі, то подається команда на рух і ліфт направляється до відповідного поверху. У обмотку електродвигуна лебідки та в котушку електромагніта гальма подається напруга, гальмо знімається, і ротор електродвигуна починає обертатися. Канато-ведучий шків за рахунок сил тертя захоплює тягові канати і приводить у рух кабіну і противагу. Далі ліфт зупиняється на зазначеному поверсі, відкриваючи зовнішні двері шахти та внутрішні двері кабіни. Після посадки пасажирів двері закриваються, а система безпеки перевіряє готовність ліфта до руху.

При натисканні кнопки на панелі управління у кабіні сигнал від панелі передається до контролера, який обробляє інформацію. Двері кабінки та шахти закриваються і ліфт відправляється на потрібний поверх, який задали пасажери.

Електродвигун приводить у дію лебідку, яка через систему шківів і канатів піднімає або опускає кабінку. Противага, яка врівноважує вагу кабінки, рухається у протилежному напрямку, знижуючи навантаження на двигун і зменшуючи енергоспоживання. Ліфт переміщується до вибраного поверху. Система датчиків (енкодери, тахогенератори) контролює швидкість і положення кабінки, забезпечуючи плавний рух. Контролери оптимізують маршрут ліфта, враховуючи кількість викликів і поточне навантаження, зменшуючи час очікування та споживання енергії. Слід зазначити, що рух кабінки можливий тільки при справності всіх блокувальних і запобіжних пристроїв. спрацювання будь-якого запобіжного пристрою призводить до розмикання ланцюга управління і до зупинки кабінки.

Щодо зупинки, то ліфт сповільнюється і точно зупиняється на вибраному поверсі завдяки системі плавного гальмування. Відкриваються двері кабінки та шахти за допомогою електромеханічних приводів, дозволяючи пасажирам вийти.

Для екстреного відкривання дверей в зоні зупинки панель керування ліфтом забезпечена спеціальною кнопкою "двері". Кнопка дозволяє відкрити двері і тримати їх відкритими до тих пір, поки не буде відпущена. Також слід зазначити що ліфти мають різні кінематичні схеми ЛПУ. Розглянемо їх нижче.

1.2.1 Існуючі кінематичні схеми ЛПУ та вибір схеми для дипломного проекту

Кінематичну схему ЛПУ обираються спираючись на усі технічні вимоги обладнання. В загальному ліфти розрізняють на 2 типи: врівноважені або нерівноважені. Різниця між ними полягає у наявності противаги, тобто у врівноважених ліфтах противага присутня та застосування електродвигунів з

підвищеною потужністю не потрібно. У неврівноважених ліфтах навпаки. У більшості такі ЛПУ використовують для малої вантажопідйомності. Також слід додати, що є різне розташування електроприводу.

На рисунку 1.1 показано, як виглядають різні кінематичні схеми.

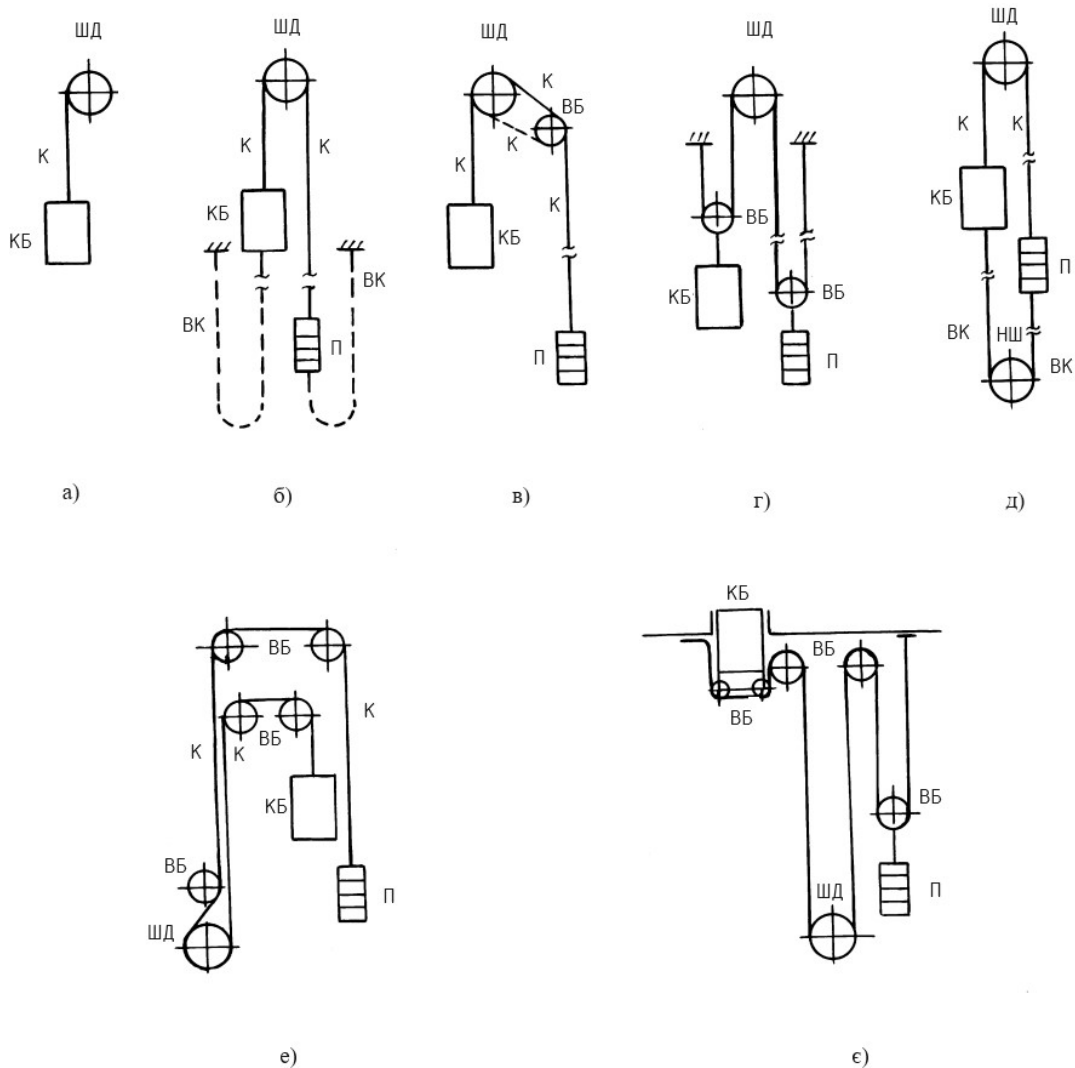


Рисунок 1.1. Приклади кінематичних схем ЛПУ:

- а) Прямий підйом без противаги; б) Гідравлічний підйом з врівноважуючим канатом; в) Прямий підйом з відхиляючим блоком; г) Прямий підйом з багатошківною системою; д) Прямий підйом з врівноважуючим канатом і напрямляючим шківом; е) Багатоблоковий підйом з відхиляючими блоками; є) Багатошківний механізм з відхиляючими блоками;

Де: ШД – шків-двигун; К – канат основний; КБ – кабіна; ВК – врівноважуючий канат; П – противага; ВБ – відхиляючі блоки; НШ – направляючий шків;

На рис. 1.1 (а) наведено приклад неврівноваженої ЛПУ, де відсутня противага. У даній схемі основний канат прикріплений до кабіни та проходить через шків-двигун та ліфт піднімається тільки за допомогою електродвигуна. Усі інші кінематичні схеми мають противаги, тобто врівноважені. В більшості варіанти з рис. 1.1 (б, в, г, д) – використовують для пасажирських ЛПУ, а з рис. 1.1 (а, б, г, д, є, ж) – для вантажних. На рис. 1.1 (ж) використовую в більшості на вулицях, адже тут кабіна може виїжджати за межі ліфтової шахти. Схеми, які на рис. 1.1 (а, б, в, г, д) відповідають варіанту, де електропривід має верхнє розміщення, а усі наступні схеми (е, є) – нижнє розміщення.

Розміщення електроприводу у верхній частині ліфтової установки зменшує кількість точок вигину каната та значно підвищує ефективність системи, а саме: збільшенню ККД та збільшенню терміну експлуатації. Крім того, зменшується навантаження на будівельну конструкцію та зменшується кількість необхідних дефлекторів, що знижує початкову вартість монтажу та обслуговування ліфтової системи.

Звертаючи увагу, що ЛПУ нам потрібна для метрополітену, то загальна висота підйому може сягати іноді більше 100 метрів. У додатку є те, що ліфт буде вантажний, тобто вантажопідйомність ліфту складатиме десь 2500 кг. Ліфт має бути швидкісний, бо при будь-яких аваріях на станціях або шахтах метро, обладнання та невелика техніка має бути переміщена з поверхні у низ. Тому будемо обираємо максимальну швидкість ліфту 2.5 м/с та прискорення 1.5 м/с². Для усіх цих обраних параметрів найкращою кінематичною схемою буде прямий підйом з врівноважувальним канатом і направляючим шківом. У цій схемі рис. 1.2 електропривод з верхнім розташуванням. Це дає змогу зменшити

навантаження на двигун за допомогою протиаги та дані схеми використовуються для ЛПУ з висотою підйому більше 50 м.

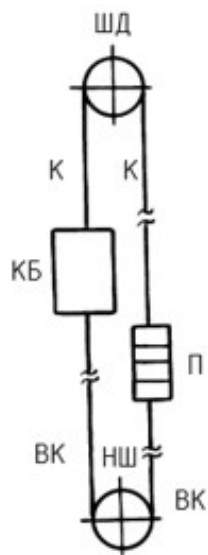


Рисунок 1.2. Обрана кінематична схема для ЛПУ

1.3 Детальний опис будови ЛПУ

Тепер пройдемося більш детально по всій будові ЛПУ. Загальний вигляд ЛПУ зображений нижче (Рис. 1.1).

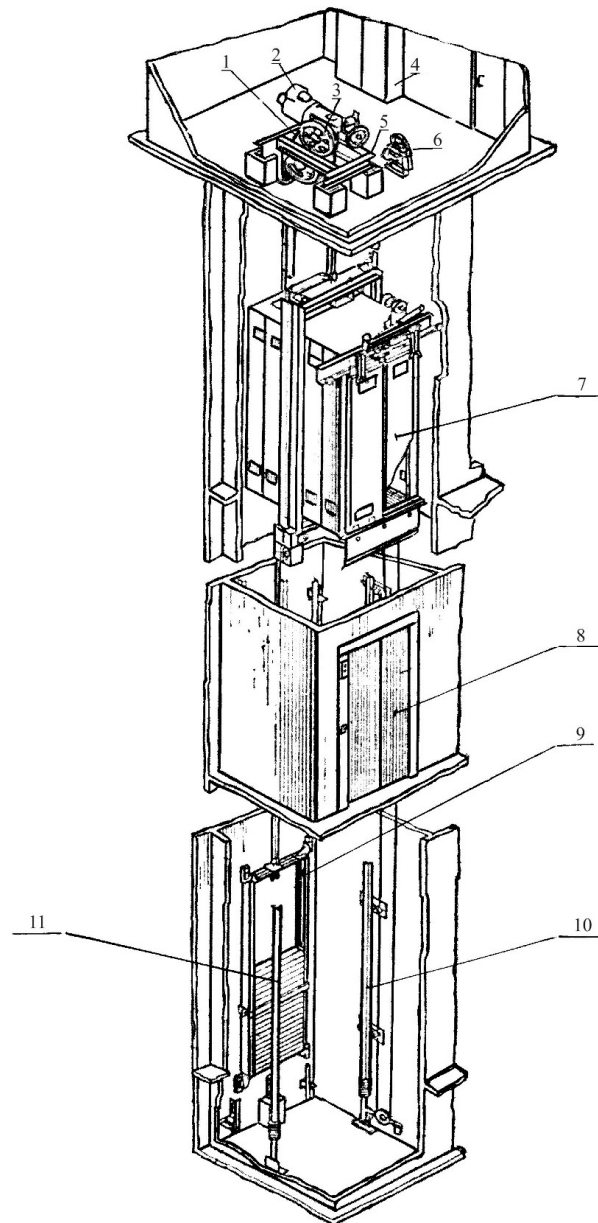


Рисунок 1.3. Загальний вигляд та будова ЛПУ

1 - шкіф; 2 – привідний електродвигун; 3 – підйомна лебідка; 4 – станція керування; 5 – редуктор; 6 – обмежувач швидкості; 7 – кабіна ліфту; 8 – двері шахти; 9 – направляючі протизаги; 10,11 - направляючі кабінки;

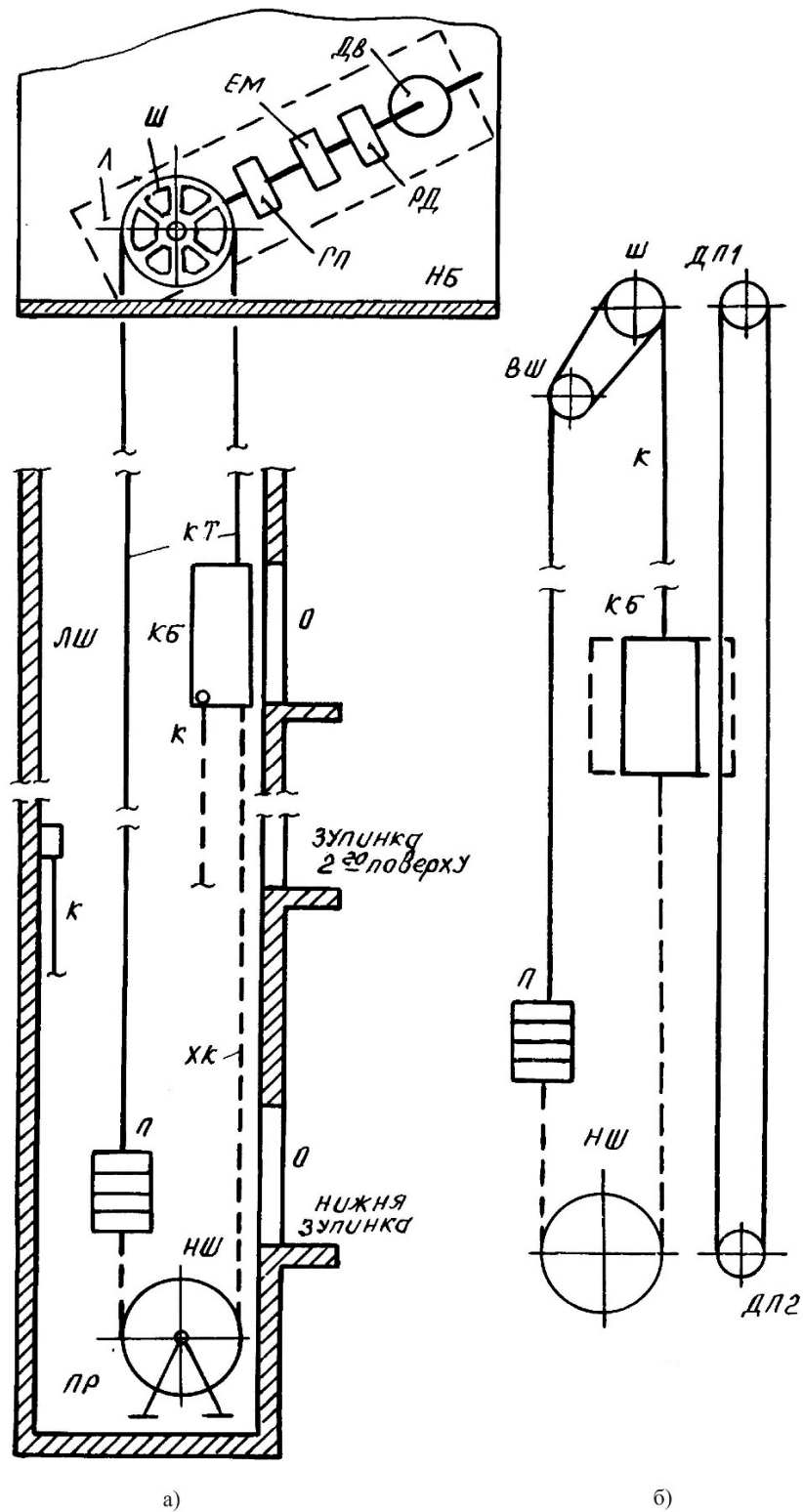


Рисунок 1.4. Схема будови та роботи елементів ЛПУ:

а) противага розміщена позаду кабіни; б) противага розміщена збоку кабіни

Л – підйомна лебідка; Ш – шків; ЕМ – гальмівний електромагніт; ДВ – привідний електродвигун; ГП – гальмівний пристрій; РД – редуктор; ЛШ – ліфтова шахта; К – гнучкий кабель; ПР – прਿਆмок для амортизаторів; НШ – натяжні шківів; П – противага; ХК – хвостовий канат; КБ – ліфтова кабіна; КТ – тяговий канат; О – дверні отвори; ДП1, ДП2 – допоміжні шківів;

Головними елементами ліфтової підйомної установки є: кабіна, підйомна посудина для перевезення пасажирів або вантажів. Електроживлення до кабіни підводиться за допомогою гнучкого кабелю, підключеного до мережі живлення в середині ліфтової шахти. Також вона обладнана панеллю управління з кнопками для вибору поверхів, освітленням, вентиляційною системою, а також додатковими елементами комфорту, такими як кондиціонер і дзеркала.

Ліфтова шахта — це вертикальна конструкція, що забезпечує рух кабіни. Шахта виготовлена з бетону, сталі або інших міцних матеріалів і містить жорсткі вертикальні напрямні рейки, по яких рухаються кабіна та противага. Противага забезпечує врівноваження статичного навантаження на підйомну лебідку. З метою безпеки шахта відокремлюється від сходів металевою сіткою або іншими захисними бар'єрами.

Лебідка розміщується в надшахтному машинному приміщенні на опорній рамі і складається з кількох основних компонентів: шківів, редуктор, гальмівний електромагніт, гальмівний пристрій та привідний електродвигун. Шків — це колесо, по якому переміщується тяговий канат. Редуктор — це механізм, що знижує швидкість обертання електродвигуна і збільшує крутний момент, переданий на шків. Гальмівний електромагніт та гальмівний пристрій забезпечують фіксацію положення кабіни при її підході до потрібного поверху або у разі аварійного стану, який потребує термінової зупинки. Привідний електродвигун — це асинхронний або синхронний електродвигун, який приводить у дію лебідку, забезпечуючи підйом і спуск кабіни.

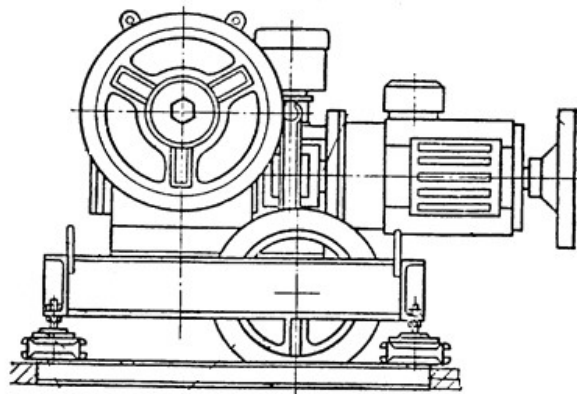
Система безпеки включає спеціальні вловлювачі, які активуються у разі обриву несучого канату, забезпечуючи миттєву зупинку кабіни. В нижній частині ліфтової шахти розміщується приємок, де знаходяться пружинні або гідравлічні амортизатори, що гальмують швидкість руху противаги або кабіни та пом'якшують зусилля у кінцевих точках шляху.

Натяжний шків використовується для натягу несучого канату, забезпечуючи його правильне натягнення та функціонування. Амортизатори гальмують швидкість руху противаги або кабіни, пом'якшуючи відповідні зусилля в кінцевих точках шляху при виникненні значних відхилень від рівня поверху при позиціюванні кабіни.

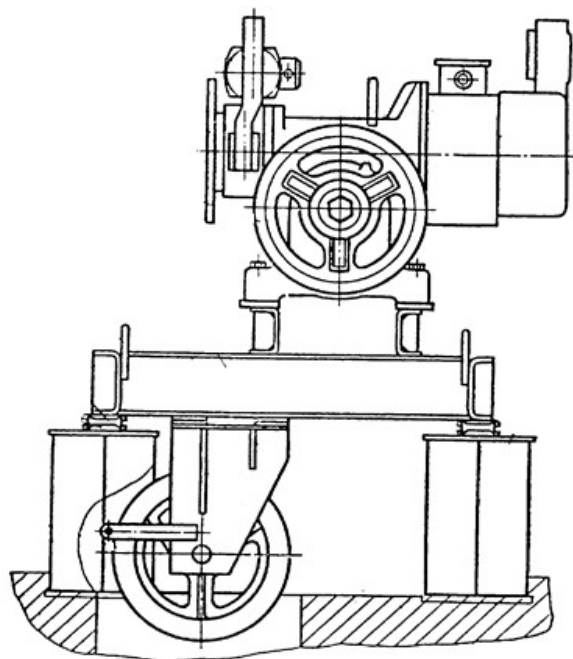
Дверні системи — це дверні отвори, розташовані на кожному поверсі ліфтової шахти та обладнані автоматичними або ручними дверима. Двері оснащені системами безпеки, які запобігають затисканню пасажирів під час закривання. Кількість даних отворів відповідає кількості, наприклад, поверхів у будинку або в загальному кількості зупинок ліфту. Шахтні двері зачиняються автоматичними замками, а двері кабіни за допомогою приводу, який знаходиться на балці двері у кабіні.

Розглянемо покроково кожний елемент ЛПУ:

Лебідка, один з найважливіших елементів ЛПУ, бо за допомогою неї приводиться у рух кабіна та противага ліфту. Вони є різних типів, усе залежить від призначення: з редуктором та без, барабанні або зі шківками, пасажирські або вантажні та за способом розміщення.



a)



б)

Рис. 1.5. Лебідка: а) з нижнім розміщенням редуктора; б) з верхнім розміщенням

Сама лебідка складається з: канатоведучого органу, редуктора, електродвигуна, який піднімає та опускає ліфт, гальмо, корпус, рама, вихідний вал. Все обладнання кріпиться на задній рамі, як розміщується в підрамнику та з використанням амортизаторів. Перейдемо по-етапово до кожного елементу.

Редуктор – їх загальна особливість полягає у перетворенні обертового руху двигуна в поступальний. Також від зменшує обертання вихідного валу електродвигуна з метою забезпечення необхідної швидкості руху кабіни.

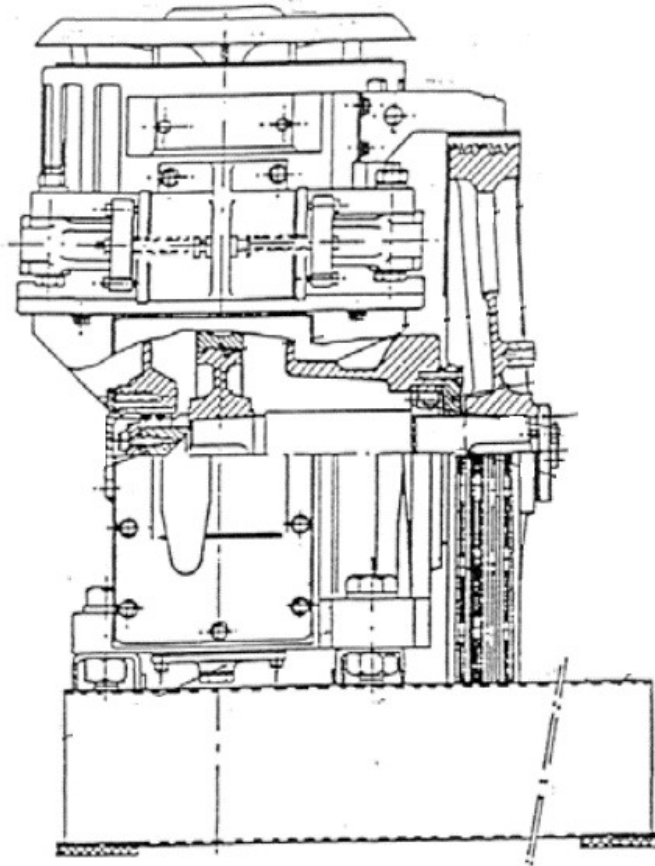


Рисунок 1.6. Загальний вигляд редуктора

Гальмо – потрібне для повної зупинки та утримання в нерухомому стані кабіну при робочому двигуні. В загальному воно складається з електромагніту, важелями, які кріпляться до корпусу ел.двигуна. На самих важелях є термостійкі фрикційні накладки. Пружини, які знаходяться у гальмі забезпечують необхідний гальмівний момент.

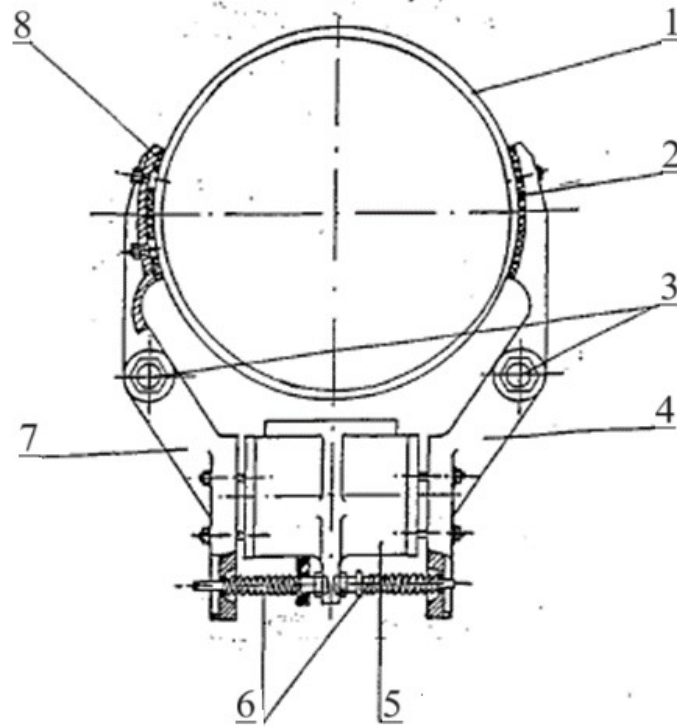


Рисунок 1.7. Загальний вигляд гальма ЛПУ

1 – гальмівний шків; 2, 8 – фрикційні накладки; 3 – осі; 4, 7 – важелі; 5 – електромагніт; 6 – пружини;

Слід зазначити, що лебідка має і ручне розгальмовування. Це рукоятка, яка знаходиться в самій лебідці та розтискає важелі 4, 7 на рисунку 1.7. Схематичний вигляд цієї рукоятки наведено на рисунку 1.8.

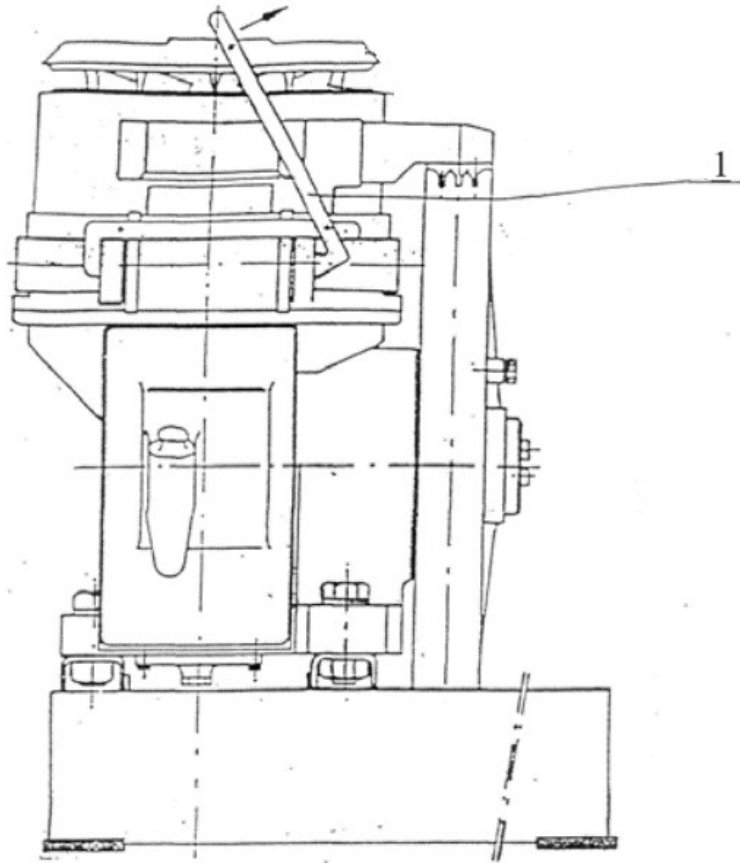


Рисунок 1.8. Вигляд пристрою ручного розгальмовування

1 – рукоятка для ручного розгальмовування;

Ще один не менш важливий елемент лебідки є **канатоведучий шків** рисунок 1.9. Він за рахунок сил тертя та сил тяжіння кабіни та противаги перетворює свій обертальний рух на поступальний рух тягових канатів. Також при ситуації, коли ослаблюється натяг канатів, над шківом встановлюється захисний кожух, який кріплять до корпусу двигуна лебідки. Шків може витримувати великі навантаження, адже зроблений з матеріалів високої стійкості. Перейдемо до наступного елементу ЛПУ.

Кабіна – головними елементами є каркас, підлога, огороження, двері, пристрій для закріплення, несучих канатів, пульт керування ліфтом (кнопки на панелі), система допоміжного електроприводу для дверей (відкриття та закриття). Також кабіна має направляючі башмаки, які забезпечують рух кабіни

по направляючим. Системою безпеки є вловлювачі, які спрацюють при обриві несучого канату.

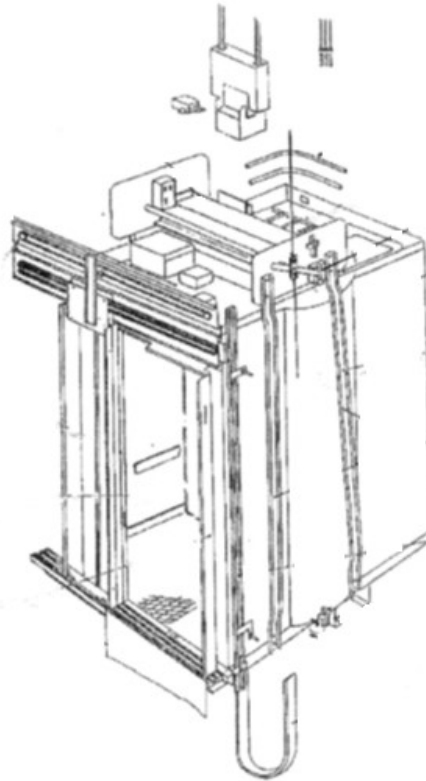


Рисунок 1.9. Кабіна ЛПУ

Основний каркас кабіни на якого кріпляться бокові панелі, підлога та стеля, складається з верхньої балки, рами та стояків. Між собою вони скріплюються болтами, також між рамою та підлогою є гумові амортизатори, які забезпечують зниження вібрації. На верхній балці встановлені уповільнювачі, на нижній частині рами за допомогою кронштейна кріпиться плоский підвісний кабель. Верхня балка в загальному це зварена металева конструкція.

Підлога кабіни – одна з важливих частин кабіни, яка може бути двох видів:

рухома (має пружинні амортизатори або кінцеві електричні вимикачі) або нерухома. Перша, розрахована на замикання електричних контактів підлоги при знаходженні в середині кабіни вантажу більше ніж 15 кг. Завдяки цьому забезпечується подання керуючого сигналу тільки з кабіни.

Двері кабіни – бувають розпашні або роздвижні. Багато різних кабін мають різну кількість створок дверей з ручним та автоматичним приводом. Зазвичай сучасні ліфти мають роздвижні двері, що мають автоматичний привод і переміщуються за допомогою роликів. Сам привід розташовується у верхній частині самої кабіни. У розпашних дверях привід є ручний. Крім того, привід дверей має асинхронний двигун з валом у вертикальному положенні і потужністю приблизно 0,2-0,4 кВт, а також клинопасову передачу, черв'ячну передачу і литі шайби, що забезпечують відкриття замка кабіни і рух дверного полотна, несучої та кулачкової шайби.

Пристрій слабини та підтягування канатів – потрібен для Пристрій слабини і підтягування канатів СПК. служить для відключення ланцюгів управління ліфтом у випадку нерівномірного витяжці тягових канатів, а так само при ослабленні натягнення всіх тягових канатів, яке може статися при підтягуванні противаги.

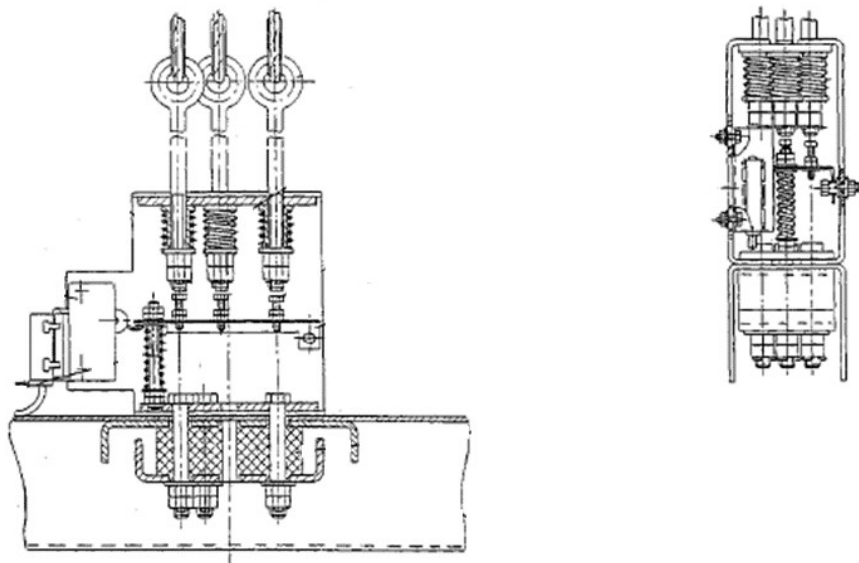


Рисунок 1.10. Загальний вигляд пристрою слабини та підтягування

Уловлювачі є одним з ключових елементів безпеки ліфта. М'які гальмівні плафони з гальмівними колодками і підпружиненими роликами надійно зупиняють ліфт при перевищенні швидкості спуску на 15-40% від номінальної і утримують кабінку на напрямних. Їх включення здійснюється обмежувачем швидкості, розташованим у машинному відділенні, який по тросу обмежувача подає сигнал на привід уловлювача. Уловлювачі встановлюються по одному з кожного боку на щічках основної балки під верхнім башмаком і закріплюються болтами з гайками та шайбами.

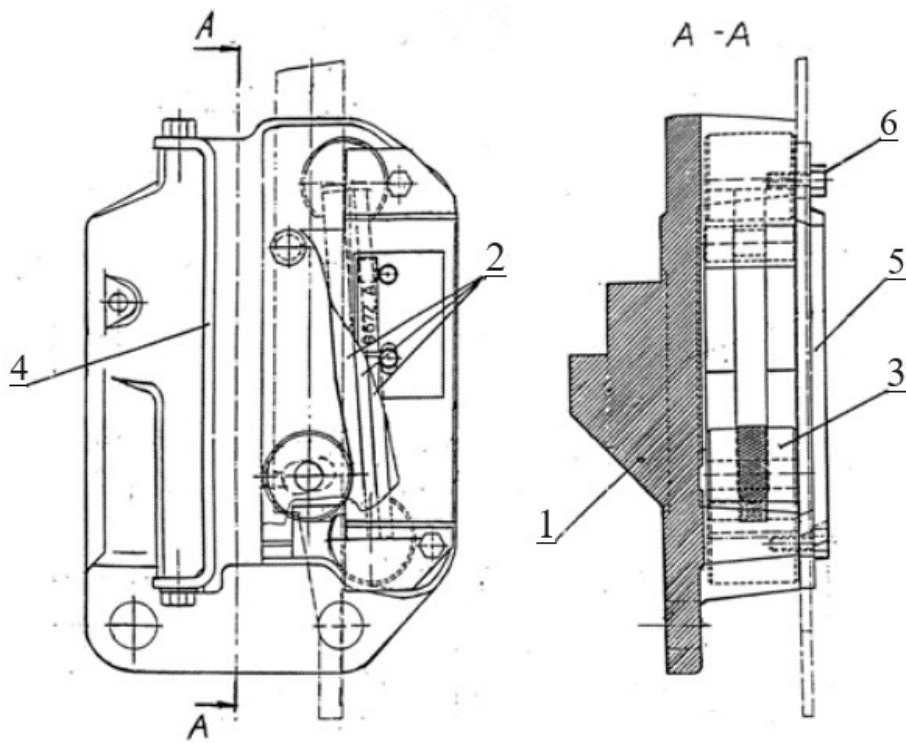


Рисунок 1.11. Уповільнювачі

1 – корпус; 2 - пружина пластинчаста; 3 - ролик; 4 - черевик; 5 - кришка; 6 - болт з шайбою;

Противага – це каркас в якому закріплюється залізобетонні блоки. Ці блоки і служать основною противагою для кабіни в ЛПУ. Вона розміщується в шахті ліфта.

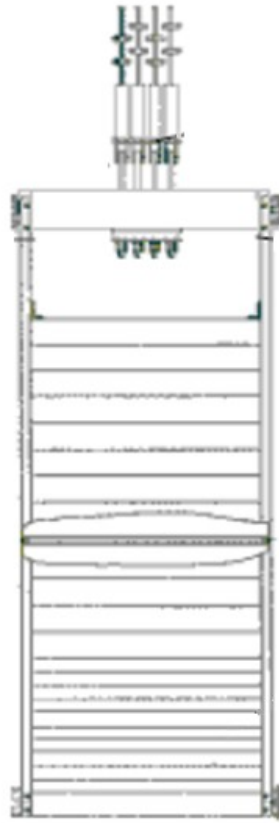


Рисунок 1.12. Загальний вигляд противаги

Противага та кабіна ліфта рухається по направляючим за допомогою башмаків, які водночас фіксують їх у шахті ліфту. Башмаки є двох типів – це роликові та ковзні. Перші частіше використовують для швидкостей більше ніж 1.5 м/с, інші – навпаки.

Напрямні – це пристрої, які визначають положення кабіни та противаги відносно один одного. Слід додати що напрямні виготовлені з міцного таврового профілю. Окремі відрізки, з'єднуються між собою за допомогою шпильки на одному кінці, яка направляє і паза на іншому. Напрямні є на різних типах кронштейна у шахті ліфту.

Канати – бувають різних діаметрів в залежності від схеми підвіски. Кріпляться вони, якщо за прямої підвіски, то на підвісках kabіни, якщо за поліспадної – в машинному приміщені. Також за допомогою них підвішують kabіну та противагу та приводять їх у рух при роботі лебідки. Канат обмежника швидкості закріплений на важелі приводу уловлювачів, покладений ушків обмежувача швидкості і при спрацьовуванні приводить в дію уловлювачі.

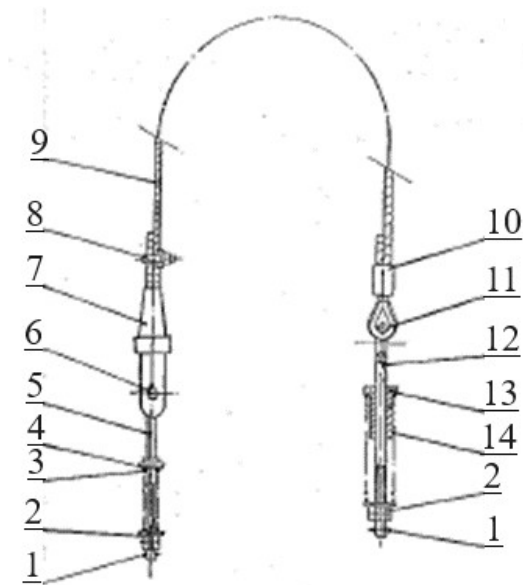


Рисунок 1.13. Тягові канати ЛПУ

1 – шплінт; 2 – гайки з шайбою; 3,14 – пружини; 4 – шайба; 5,12 – болти Ушкова; 6 – вісь; 7 – втулка клинова; 8 – затиск; 9 – канат тяговий; 10 – втулка обтискна; 11 – коуш; 13 – втулка.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

Перший розділ дипломного проекту надає ґрунтовний огляд будови та технологічного процесу роботи ліфтових підйомних установок. Описані історичні аспекти розвитку ліфтів та сучасні інновації демонструють еволюцію цих систем від простих механізмів до високотехнологічних установок, що забезпечують комфорт і безпеку пасажирів.

Детальний аналіз роботи та будови ЛПУ підкреслює важливість кожного компонента у забезпеченні ефективної і надійної роботи ліфта. Особлива увага приділена системам безпеки та сучасним технологіям, що дозволяють оптимізувати роботу ліфтів, знизити енергоспоживання та підвищити комфорт пасажирів.

Обрані кінематичні схеми для ЛПУ в метрополітені враховують специфічні вимоги до висоти підйому та вантажопідйомності, що забезпечує надійну і ефективну роботу ліфтів у складних умовах експлуатації.

Таким чином, перший розділ закладає міцну основу для подальшого детального розгляду аспектів проектування, експлуатації та вдосконалення ліфтових підйомних установок у наступних розділах дипломного проекту.

2. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

Як було сказано вище Київський метрополітен, як один з найбільших та найважливіших транспортних вузлів України. У зв'язку з цим підприємство

стикається з багатьма питаннями в плані обслуговування та ремонту. Тому на мою думку в умовах зростаючого попиту на пасажирські та вантажні перевезення, впровадження інноваційних рішень є нагальною потребою.

2.1 Актуальність теми

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю модернізації вантажної інфраструктури Київського метрополітену. Метрополітен є надзвичайно складною технічною системою, де безпека та надійність є ключовими параметрами. Наявність застарілих механічних систем приводів та їх обладнання призводить до значних витрат енергії та збільшення витрат на технічне обслуговування. Крім того, традиційні системи мають обмежені можливості для інтеграції з сучасними автоматизованими системами керування, що значно ускладнює процеси оперативного реагування на аварійні ситуації. Слід додати, що часто виникають проблеми не тільки з механізмами, а й з інфраструктурою самого метрополітену. Наприклад, це затоплення шахти або самої станції через помилки у проектуванні або застарілі матеріали, які вимагають повної реставрації.

Дані показують, що середній час реагування на аварійні ситуації у метрополітенах значно збільшується через труднощі в доставці необхідного обладнання. Наприклад, за останні 5 років було зареєстровано понад 50 випадків аварійних ситуацій у Київському метрополітені, кожен з яких вимагав швидкого реагування та доставки техніки на місце події. Це призвело до значних затримок у роботі системи та додаткових витрат. Гарним прикладом ситуації є шахта між станціями метро “Либідська” та “Деміївська”, де у зв’язку зі швидкою подачею техніки можна було уникнути затоплення. Також за допомогою ЛПУ можна скоротити затрати на пересування техніки, адже ліфти мають знаходитись на кожній станції метро.

Впровадження вантажних ліфтових підйомних установок дозволить забезпечити більш точне і ефективне керування процесами переміщення обладнання та техніки, зменшить ризики аварійних ситуацій, а також сприятиме підвищенню енергоефективності метрополітену. Сучасні технології автоматизації та електроприводів дозволяють досягти високої точності керування, знизити витрати на обслуговування та експлуатацію, а також підвищити надійність системи.

2.2 Наукова новизна

Наукова новизна проекту полягає в комплексному підході до розробки автоматизованої системи електроприводу для вантажної ліфтової підйомної установки, що враховує специфіку функціонування Київського метрополітену. Проект передбачає використання новітніх методів моделювання та аналізу, що дозволить створити ефективну систему керування з високими показниками надійності та енергоефективності.

Особливу увагу буде приділено розробці алгоритмів автоматизованого керування, які дозволять оперативно реагувати на зміни умов експлуатації та забезпечать високу точність керування. Впровадження інноваційних технологій у сфері автоматизації та електроприводів дозволить створити нову якість вантажних перевезень у метрополітені, підвищити їх ефективність та надійність.

Проект також передбачає проведення моделювання та тестування розробленої системи в реальних умовах, що дозволить оцінити її працездатність та ефективність. Це забезпечить можливість внесення необхідних коригувань та вдосконалення системи перед її масовим впровадженням.

2.3 Практична значимість

Практична значимість дослідження полягає в можливості безпосереднього впровадження розроблених рішень у діючу інфраструктуру метрополітену. Впровадження автоматизованих електроприводів для вантажних ліфтових підйомних установок дозволить значно підвищити ефективність та надійність вантажних перевезень, знизити експлуатаційні витрати та сприяти розвитку сучасних технологій в транспортній галузі.

Зокрема, впровадження таких систем дозволить:

1. **Підвищити швидкість та ефективність доставки обладнання та техніки на станції метро.** Це особливо важливо в умовах аварійних ситуацій, коли кожна хвилина може мати вирішальне значення. Наприклад, час доставки обладнання на місце аварії можна скоротити до 50%, що суттєво підвищить оперативність робіт.

2. **Знизити витрати на технічне обслуговування та експлуатацію.** Сучасні електроприводи мають високу надійність та енергоефективність, що дозволяє знизити витрати на їх обслуговування та експлуатацію. Також це допоможе забезпечити менші витрати на транспортування техніки, наприклад, по місту, адже техніку можна буде перемістити на найближчу станцію метро. За оцінками, витрати на технічне обслуговування можуть бути зменшені на 30-40%.

3. **Підвищити енергоефективність системи.** Використання сучасних електроприводів дозволяє знизити енергоспоживання та підвищити ефективність використання енергоресурсів. Також це надає більш сучасну модернізацію метрополітену, що дає кращий розвиток у майбутньому.

4. **Забезпечити інтеграцію з сучасними автоматизованими системами керування.** Це дозволить створити єдину автоматизовану систему керування метрополітеном, що значно підвищить ефективність її роботи.

2.4 Очікувані результати та перспективи подальших досліджень

Очікуваними результатами роботи є створення функціональної моделі автоматизованого електроприводу, проведення його тестування та впровадження у вантажну ліфтову підйомну установку Київського метрополітену. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів керування, інтеграцію системи з іншими елементами транспортної інфраструктури, а також аналіз можливостей застосування розроблених рішень в інших метрополітенах та транспортних системах.

Зокрема, наступними етапами досліджень можуть бути:

1. Аналіз ефективності впровадження автоматизованих електроприводів в інших метрополітенах. Вивчення досвіду впровадження аналогічних систем у інших містах та країнах дозволить отримати додаткову інформацію про переваги та недоліки таких рішень.

2. Розробка нових алгоритмів керування та інтеграція з іншими системами керування транспортом. Це дозволить створити комплексну систему керування транспортними потоками, що підвищить ефективність використання транспортної інфраструктури.

3. Дослідження можливостей застосування розроблених рішень у інших галузях транспорту. Це дозволить розширити сферу застосування автоматизованих електроприводів та підвищити ефективність роботи транспортних систем в цілому.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

Наукова новизна проекту полягає у розробці комплексної системи автоматизованого керування електроприводами, що враховує специфіку функціонування Київського метрополітену. Впровадження новітніх методів моделювання та аналізу дозволить створити систему з високими показниками надійності та енергоефективності. Особлива увага приділяється розробці алгоритмів автоматизованого керування, які забезпечать високу точність та оперативність в умовах зміни експлуатаційних параметрів. Моделювання та тестування в реальних умовах гарантують працездатність та ефективність системи перед її масовим впровадженням.

Практична значимість дослідження виражається у можливості безпосереднього впровадження розроблених рішень в інфраструктуру метрополітену, що дозволить значно підвищити швидкість та ефективність доставки обладнання на станції та в шахти метро, знизити витрати на технічне обслуговування та експлуатацію, а також підвищити енергоефективність системи. Очікується, що впровадження автоматизованих електроприводів дозволить скоротити час доставки обладнання на місце аварії до 50%, знизити витрати на технічне обслуговування на 30-40%, а енергоспоживання – на 20-25%.

Очікувані результати проекту включають створення функціональної моделі автоматизованого електроприводу, її тестування та впровадження у вантажну ліфтову підйомну установку Київського метрополітену. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів керування, інтеграцію системи з іншими елементами транспортної інфраструктури, а також аналіз можливостей застосування розроблених рішень в інших метрополітенах та транспортних системах. Зокрема, наступними етапами можуть бути аналіз ефективності впровадження в інших метрополітенах, розробка нових

алгоритмів керування, дослідження можливостей застосування в інших галузях транспорту та впровадження системи діагностики та моніторингу.

У цілому, даний дипломний проект сприяє розвитку сучасних технологій автоматизованого керування у транспортній галузі, підвищенню ефективності та надійності роботи Київського метрополітену, а також сталому розвитку міської інфраструктури. Результати проекту можуть бути використані як основа для подальших досліджень та впровадження інноваційних рішень у інших сферах транспортної інфраструктури, що сприятиме загальному підвищенню ефективності та безпеки транспортних систем.

Таким чином, проведене дослідження має вагоме значення для розвитку інфраструктури Київського метрополітену, забезпечуючи більш швидке та ефективне реагування на аварійні ситуації, підвищуючи енергоефективність та знижуючи витрати на обслуговування. Впровадження автоматизованих систем електроприводів дозволить створити більш надійну, ефективну та сучасну інфраструктуру, яка відповідатиме вимогам часу та забезпечить комфортне та безпечне пересування для пасажирів, а також оптимальне управління вантажними перевезеннями.

3. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАНТАЖНОГО ЛПУ

3.1 Технічне завдання для проектування

Потрібно поставити технічне завдання для розробки електроприводу. Потрібно спроектувати автоматизовану систему керування вантажним ліфтом для КП "Київського метрополітену", яка забезпечить транспортування та швидку доставку на станцію та на поверню необхідного обладнання, інструментів та невеликої техніки для ремонту та обслуговування. ЛПУ має забезпечити підйом та спуск зі швидкістю не більше 2.5 м/с та прискоренням не більше 1.5 м/с².

Система має забезпечувати надійність, мати технічні засоби для безпечного та безперебійного транспортування. Вона має відповідати усім нормам та мати високий ККД для більш ефективної експлуатації. У проекті використовується перетворювач частоти для регулювання вказаних умов.

Головним завданням є автоматизація роботи ЛПУ. Система керування у ліфті це панель з кнопками "вверх", "вниз", яку реалізуємо за допомогою сучасних ПЛК та мікропроцесорною технікою. На поверхні та на станції знаходяться кнопки виклику ліфту.

У разі виникнення аварійної ситуації ЛПУ має забезпечувати блокування руху. Основні частини з яких складається система: ПЛК, електродвигун, редуктор, перетворювач частоти, приводи дверей шахти та кабіни, сама кабіна, обмежувачі швидкості для підтримання заданої, гальмо, ловителі.

3.2 Вимоги до елементів ЛПУ

Одно з основних вимог для ліфтової підйомної установки є:

- Надійність та безпека (ЛПУ має відповідати усім нормам безпеки для уникнення трагічних моментів);

- Високі техніко-економічні показники (капітальні та експлуатаційні витрати, якість роботи)
- Реверсивність
- Забезпечення заданої швидкості
- Мінімальна тривалість перехідних процесів

Це загальні вимоги до ЛПУ, тому перейдемо до вимог самих елементів. Більш точні дані та вибір елементів наведені у розділах нижче.

Потужність і крутний момент

Потужність двигуна визначається розрахунковим навантаженням ліфта, враховуючи максимальну вагу вантажу або пасажирів. Для вантажного ліфта, який піднімає вантажі до 2500 кг на висоту до 150 метрів, потужність двигуна повинна бути в діапазоні 65-70 кВт (більш точні розрахунки будуть надані в інших розділах). Крутний момент повинен бути достатнім для забезпечення підйому при максимальному навантаженні, що для ліфта з вантажопідйомністю 2500 кг становить близько 1000 Нм або більше.

Електропривід повинен мати високу точність позиціонування з похибкою не більше 5 мм, що дозволить точно розташовувати вантаж у заданій точці. Висока точність позиціонування забезпечується завдяки використанню сучасних систем керування та датчиків положення. Привід також повинен мати високу стійкість до навантажувальних піків та бути здатним працювати в умовах високих динамічних навантажень, що вимагає використання міцних матеріалів та надійних механізмів.

Система повинна підтримувати як ручний, так і автоматичний режими роботи, що дозволить оператору вибирати оптимальний режим залежно від конкретних умов експлуатації. Автоматичний режим повинен включати можливість програмування робочих циклів.

Вимоги до безпеки

Електропривід повинен бути обладнаний системою аварійного гальмування, яка автоматично зупинить ліфт у разі відмови основної гальмівної системи або виникнення аварійної ситуації. Система повинна відповідати вимогам стандартів безпеки та бути перевіреною на надійність.

Привід повинен мати механізм захисту від перевантаження, який автоматично відключає систему у разі перевищення допустимої ваги вантажу. Захист повинен працювати на основі електронних датчиків ваги, які забезпечують точність вимірювань.

Електропривід повинен бути інтегрований із загальною системою безпеки метрополітену, що дозволить централізовано контролювати його роботу та оперативно реагувати на аварійні ситуації. Це забезпечить високий рівень координації між різними системами безпеки.

Енергоефективність

Використання енергоощадних технологій та компонентів, що забезпечують мінімальне споживання енергії під час роботи приводу, є важливим аспектом. Сучасні перетворювачі частоти та двигуни з високим ККД можуть значно знизити енергоспоживання. Електропривід повинен бути обладнаний системою рекуперації енергії, яка дозволить зберігати та використовувати енергію, що утворюється під час гальмування, сприяючи зниженню загального енергоспоживання системи.

Система повинна забезпечувати оптимізацію режимів роботи приводу залежно від навантаження та умов експлуатації, що дозволить мінімізувати енергоспоживання. Використання інтелектуальних алгоритмів керування допоможе забезпечити максимальну ефективність роботи системи.

Інтеграція з автоматизованими системами керування

Електропривід повинен бути сумісним із сучасними системами SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), що дозволить здійснювати

централізоване керування та моніторинг роботи ЛПУ. Це забезпечить високий рівень автоматизації та контроль над всіма параметрами роботи. Система повинна підтримувати можливість дистанційного керування через мережу Інтернет або локальну мережу, що дозволить оперативно керувати роботою приводу з центрального диспетчерського пункту, забезпечуючи високу оперативність та гнучкість керування.

Електропривід повинен мати вбудовані алгоритми автоматизації, які забезпечать виконання рутинних операцій без участі оператора, знижуючи ризик виникнення помилок та підвищуючи ефективність роботи. Використання штучного інтелекту та машинного навчання може значно підвищити адаптивність та автономність системи.

Експлуатаційні вимоги

Конструкція електроприводу повинна забезпечувати легкий доступ до основних компонентів для проведення технічного обслуговування та ремонту, що дозволить знизити витрати на обслуговування та забезпечити швидке вирішення технічних проблем. Використання високоякісних матеріалів та компонентів забезпечить тривалий термін служби приводу навіть в умовах інтенсивної експлуатації. Це включає використання корозійностійких матеріалів та спеціальних покриттів для захисту від агресивних середовищ.

Електропривід повинен бути стійким до умов експлуатації в метрополітені, включаючи високу вологість, запиленість та змінні температурні режими, що забезпечить стабільну роботу системи в будь-яких умовах.

Комплектуючі для електроприводу вантажної ЛПУ

Програмований логічний контролер (ПЛК) є центральним елементом системи керування, що забезпечує управління всіма компонентами ліфту. Він повинен мати достатню кількість входів і виходів для підключення датчиків та виконавчих механізмів, а також підтримувати сучасні протоколи зв'язку для інтеграції з іншими системами.

Потужний електродвигун повинен забезпечувати достатню тягову силу для переміщення вантажів масою до 2500 кг. Найкращим вибором є асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором, який відзначається високою надійністю та довговічністю.

Редуктор призначений для передавання обертового моменту від електродвигуна до підйомного механізму з необхідним передаточним відношенням. Він повинен бути розрахований на високі навантаження та мати мінімальні втрати енергії.

Перетворювач частоти використовується для плавного регулювання швидкості обертання електродвигуна. Він повинен підтримувати широкий діапазон частот та забезпечувати точне керування швидкістю без ривків і коливань.

Приводи дверей повинні забезпечувати автоматичне відкривання та закривання дверей ліфту. Вони мають бути надійними, швидкодійними та інтегрованими із системою керування для забезпечення безпеки під час роботи.

Кабіна вантажного ліфту повинна бути виготовлена з міцних матеріалів, які витримують значні навантаження та забезпечують безпеку вантажу. Вона повинна бути обладнана системами амортизації та захисту від зовнішніх впливів.

Обмежувачі швидкості використовуються для підтримання заданої швидкості руху кабіни та запобігання перевищенню безпечної швидкості. Вони повинні бути інтегровані з системою керування для автоматичного контролю швидкості.

Система гальмування повинна забезпечувати надійну зупинку кабіни у разі аварійної ситуації. Гальмо має бути вискоєфективним, надійним і швидкодійним, забезпечуючи безпеку під час експлуатації ліфту.

Ловителі призначені для автоматичного зупинення кабіни у разі перевищення допустимої швидкості або відмови основних систем. Вони повинні мати високу надійність і здатність витримувати значні навантаження.

Таким чином, виконання зазначених вимог до електроприводу вантажної ЛПУ та використання сучасних комплектуючих дозволить створити ефективну, надійну та безпечну систему, яка відповідатиме всім необхідним стандартам та нормам експлуатації в умовах Київського метрополітену. Це забезпечить підвищення оперативності та безпеки вантажних перевезень, зниження експлуатаційних витрат та впровадження сучасних технологій у транспортну інфраструктуру.

Додаткові вимоги

Сертифікація та відповідність стандартам

Всі компоненти повинні відповідати міжнародним стандартам, таким як ISO 9001 для систем якості та EN 81 для безпеки ліфтів.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 3

Третій розділ дипломного проекту надає детальний аналіз вимог до електроприводу вантажної ліфтової підйомної установки для Київського метрополітену. Розглянуті технічні завдання, вимоги до елементів ЛПУ, безпеки, енергоефективності, інтеграції з автоматизованими системами керування та експлуатаційні вимоги формують комплексний підхід до розробки надійної та ефективної системи.

Всі компоненти ЛПУ повинні відповідати високим стандартам надійності та безпеки, включаючи аварійне гальмування, захист від перевантажень та централізований контроль через інтеграцію з системою безпеки метрополітену. Використання сучасних енергоощадних технологій, таких як перетворювачі частоти та системи рекуперації енергії, дозволить значно знизити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи ЛПУ. Сумісність з системами SCADA, можливість дистанційного керування та вбудовані алгоритми автоматизації забезпечать високу оперативність та гнучкість керування ЛПУ. Високоякісні матеріали та компоненти, стійкість до умов експлуатації в метрополітені та легкий доступ до основних компонентів для технічного обслуговування та ремонту забезпечать тривалий термін служби ЛПУ.

Використання програмованого логічного контролера, потужного електродвигуна, редуктора, перетворювача частоти, приводів дверей, кабіни

вантажного ліфту, обмежувачів швидкості, системи гальмування та ловителів дозволить створити ефективну, надійну та безпечну систему.

Таким чином, виконання зазначених вимог та використання сучасних комплектуючих дозволить створити ефективну, надійну та безпечну систему, яка відповідатиме всім необхідним стандартам та нормам експлуатації в умовах Київського метрополітену. Це забезпечить підвищення оперативності та безпеки вантажних перевезень, зниження експлуатаційних витрат та впровадження сучасних технологій у транспортну інфраструктуру.

4. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА ДЛЯ ВАНТАЖНОЇ ЛПУ

4.1 Розрахунок швидкостей та часу для ЛПУ

Перейдемо до одного з важливих розділів звіту. Від правильно розрахованої потужності залежить не тільки ефективність роботи ліфта, але й безпека його експлуатації. У дипломному проекті робота буде проведена з ЛПУ вантажного типу, який буде переміщувати невелику техніку та різне обладнання для ремонту обслуговування і т.д.

Розрахунок будемо проводити маючи вихідні дані: висота підйому, вантажопідйомність ліфту, швидкість руху кабіни, ДСТУ. Для вантажного ліфту не потрібно розраховувати пасажиропотік, завантаженість та інтенсивність пасажиропотоку. Приймаємо дані, що:

$$M_b = 2500 \text{ кг};$$

$$v = 2.5 \text{ м/с};$$

$$a = 1.5 \text{ м/с}^2;$$

$$h = 80 \text{ м};$$

де M_b – вантажопідйомність ЛПУ, v – швидкість руху ліфта, a – прискорення h – висота підйому;

Розраховуємо масу вантажної кабіни та противаги для неї. Для цього нам потрібно знати, яких розмірів має бути ліфт. У зв'язку з тим, що ліфт призначений для транспортування невеликої техніки по типу генератора на колесах, маленький екскаватор, яка є самою габаритною порівняно з людиною або обладнанням по типу стійка з прожекторами, відбійний молоток, прийmemo,

що розміри вантажної кабіни такі: ширина – 3500 мм, глибина – 3200 мм, висота – 3000 мм. Також основні матеріали кабіни будуть зі сталі, алюміній.

Розрахуємо, що:

$$\text{Дві бічні стіни: } l_1 = 2 \cdot (3.5 \text{ м} \cdot 3.0 \text{ м}) = 21.0 \text{ м}^2$$

$$\text{Дві передні/задні стіни: } l_2 = 2 \cdot (3.2 \text{ м} \cdot 3.0 \text{ м}) = 19.2 \text{ м}^2$$

$$\text{Стеля: } l_3 = 3.5 \text{ м} \cdot 3.2 \text{ м} = 11.2 \text{ м}^2$$

Загальна площа поверхні:

$$S = l_1 + l_2 + l_3 = 21.0 \text{ м}^2 + 19.2 \text{ м}^2 + 11.2 \text{ м}^2 = 51.4 \text{ м}^2$$

Тепер знайдемо масу кожного елементу ліфту. Для початку знайдемо об'єм сталі:

$$V_c = L \cdot l_c = 51.4 \text{ м}^2 \cdot 0.005 \text{ м} = 0.257 \text{ м}^3 \quad (4.1)$$

де l_c – товщина сталі, приблизно 5 мм, тобто 0.005 м.

Щільність сталі 7850 кг/м³, отже можемо знайти масу самого каркасу кабіни:

$$m_k = V_c \cdot q_c = 0.257 \text{ м}^3 \cdot 7850 \text{ кг} / \text{м}^3 = 2017.45 \text{ кг} \quad (4.2)$$

Перейдемо до підлоги тут товщину сталі візьмемо 10 мм, тобто 0.01 м. Для початку знайдемо площу підлоги, вона буде однакою з площею підлоги:

$$S_n = 3.5 \text{ м} \times 3.2 \text{ м} = 11.2 \text{ м}^2 \quad (4.3)$$

Об'єм підлоги:

$$V_n = S_n \cdot l_c = 11.2 \text{ м}^2 \cdot 0.01 \text{ м} = 0.112 \text{ м}^3 \quad (4.4)$$

Отже, маса підлоги кабіни:

$$m_n = V_n \cdot q_c = 0.112 \text{ м}^3 \cdot 7850 \text{ кг} / \text{м}^3 = 879.2 \text{ кг} \quad (4.5)$$

Далі двері, приймаємо, що вони виготовлені не із сталі, а алюмінію. Розмір кожної 3 x 1.5 м, товщина сталі 5 мм, тобто 0.005 м:

$$S_d = 3 \text{ м} \times 1.5 \text{ м} = 4.5 \text{ м}^2 \quad (4.6)$$

Об'єм дверей:

$$V_{\delta} = (2 \cdot S_{\delta}) \cdot l_c = 9.0 \text{ м}^2 \cdot 0.005 \text{ м} = 0.045 \text{ м} \quad (4.7)$$

Площа множиться на 2, адже маємо дві двері. Слід додати, що щільність алюмінію відрізняється від щільності металу, тому $q_a = 2700 \text{ кг/м}^3$. Тепер знайдемо масу самих дверей:

$$m_{\delta} = V_{\delta} \cdot q_a = 0.045 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3 = 121.5 \text{ кг} \quad (4.8)$$

Слід також не забути, щодо інших елементів кабіни, як освітлення, вентиляція. Додаємо ще 100 кг.

Отже, звідси маємо загальну масу кабіни:

$$\begin{aligned} M_k &= m_k + m_n + m_{\delta} + m_i = \\ &= 2017.45 \text{ кг} + 879.2 \text{ кг} + 121.5 \text{ кг} + 100 \text{ кг} = 3118.15 \text{ кг} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Далі за кінематичною схемою ЛПУ має ще противагу, тому слід знайти її масу також. Маса противаги визначається за формулою:

$$M_{\Pi} = m_k + \varphi \cdot M_b = 3118.15 + 0.5 \cdot 2500 = 4368.15 \text{ кг} \quad (4.10)$$

де φ – коефіцієнт врівноваження номінального вантажу кабіни, M_b – маса вантажу, кг.

Далі маючи швидкість руху ліфту та прискорення може розрахувати час його розгону та гальмування:

$$t_p = \frac{v}{a} = \frac{2.5}{1.5} = 1.67 \text{ м/с} \quad (4.11)$$

Також зазначимо, який шлях буде проходити цей ліфт під час розгону за формулою:

$$S_p = \frac{a \cdot t_p^2}{2} = \frac{1.5 \cdot 1.7^2}{2} = 2.17 \text{ м} \quad (4.12)$$

$$S_y = h - 2 \cdot t_p = 80 - 2 \cdot 2.17 = 75.66 \text{ м} - \text{шлях який пройде ліфт уже на усталеній швидкості}$$

За допомогою формули () можемо знайти час переміщення ліфту на усталеній швидкості пересування:

$$t_y = \frac{S_y}{v} = \frac{75.66}{2.5} = 30.26 \text{ c} \quad (4.13)$$

Загальний час переміщення буде:

$$t_n = t_y + 2t_p = 30.26 + 2 \cdot 1.7 = 33.66 \text{ c} \quad (4.14)$$

Усі вищевказані розрахунки були проведені для утворення тахограми для кращого розуміння змін швидкості за певного часу. Отже, побудуємо тахограму по отриманим розрахункам.

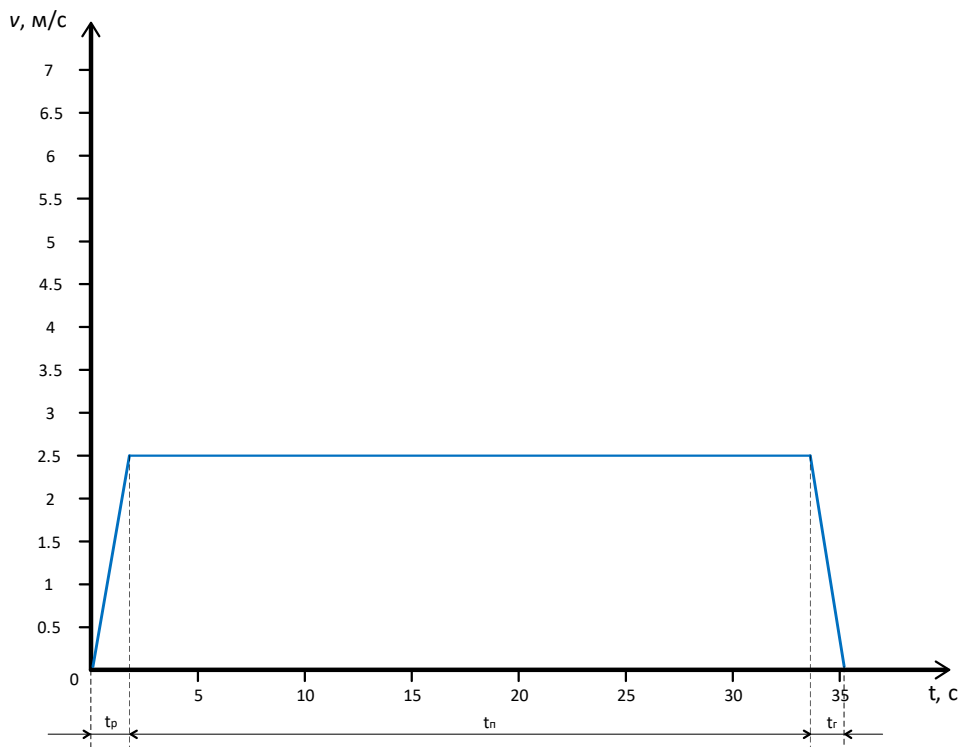


Рисунок 4.1. Тахограма роботи ЛПУ

Далі знаходимо усі потрібні сили та рушійні зусилля, які будуть діяти під час роботи ліфту. А також побудуємо діаграми рушійних зусиль для більш точного розуміння, які сили впливають на роботу ліфту.

4.2 Розрахунок рушійних зусиль та сил, що діють на ЛПУ

Розпочнемо з рушійних сил та побудови діаграми. Вона визначальна для розрахунку потужності приводного двигуна і визначення особливості роботи

схеми автоматизації на окремих етапах. Рушійне зусилля може бути знайдене на підставі рівняння динаміки ЛПУ:

$$F_{\text{дин}} = F_{\text{дв}} - F_{\text{ст}} \quad (4.15)$$

Далі:

$$F_{\text{дв}} = F_{\text{дин}} + F_{\text{ст}} \quad (4.16)$$

де $F_{\text{дин}}$ – динамічне зусилля ЛПУ, $F_{\text{ст}}$ – статичне зусилля.

Спочатку розглянемо розглянемо варіант коли ліфт піднімається. Перше – це рівняння статичних зусиль ліфту на канаті:

$$F_{\text{ст}} = G - \alpha \cdot G_{\text{н}} \quad (4.17)$$

де G – фактична вага вантажу, $G_{\text{н}}$ – номінальна вага вантажу, α – коефіцієнт урівноваження, який дорівнює 0.5.

При розгоні ми будемо мати прискорення a , тому формула (4.17) буде мати вигляд:

$$F_{\text{дв}} = G - \alpha G_{\text{н}} + ma = F_{\text{ст}} + ma \quad (4.18)$$

Порахуємо фактичну та номінальну вагу вантажу (номінали їх однакові):

$$G = G_{\text{н}} = M_{\text{в}} \cdot g = 2500 \cdot 9.8 = 24500 \text{ Н} \quad (4.19)$$

Далі побудуємо діаграми для цього нам потрібні деякі точки:

а) Початок шляху

$$F_{\text{ст}0} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.20)$$

$$F_{\text{дв}0} = F_{\text{ст}0} + (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot a = 12250 + (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 20677 \text{ Н} \quad (4.21)$$

б) Завершення розгону

$$F_{\text{ст}1} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.22)$$

$$F_{\text{дв}1} = F_{\text{ст}1} + (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot \alpha = 12250 + (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 20677 \text{ Н} \quad (4.23)$$

в) Початок рівномірного руху

$$F_{\text{дв}2} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.24)$$

г) Кінець рівномірного руху

$$F_{\text{ст}2} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.25)$$

$$F_{дв2'} = F_{ст2} = 12250 \text{ Н} \quad (4.26)$$

д) Початок гальмування

$$\begin{aligned} F_{дв3} &= G - \alpha \cdot G - (M_B + M_K) \cdot a = \\ &= 24500 - 0.5 \cdot 24500 - (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 3823 \text{ Н} \end{aligned} \quad (4.27)$$

е) Кінець циклу підйомного

$$F_{ст3} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.28)$$

$$F_{дв3'} = F_{ст3} - (M_B + M_K) \cdot a = 12250 - (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 3823 \text{ Н} \quad (4.29)$$

По вище розрахованим точкам можемо побудувати рушійну діаграму зусиль. Поєднаємо її з тагорою на рисунку 4.1.

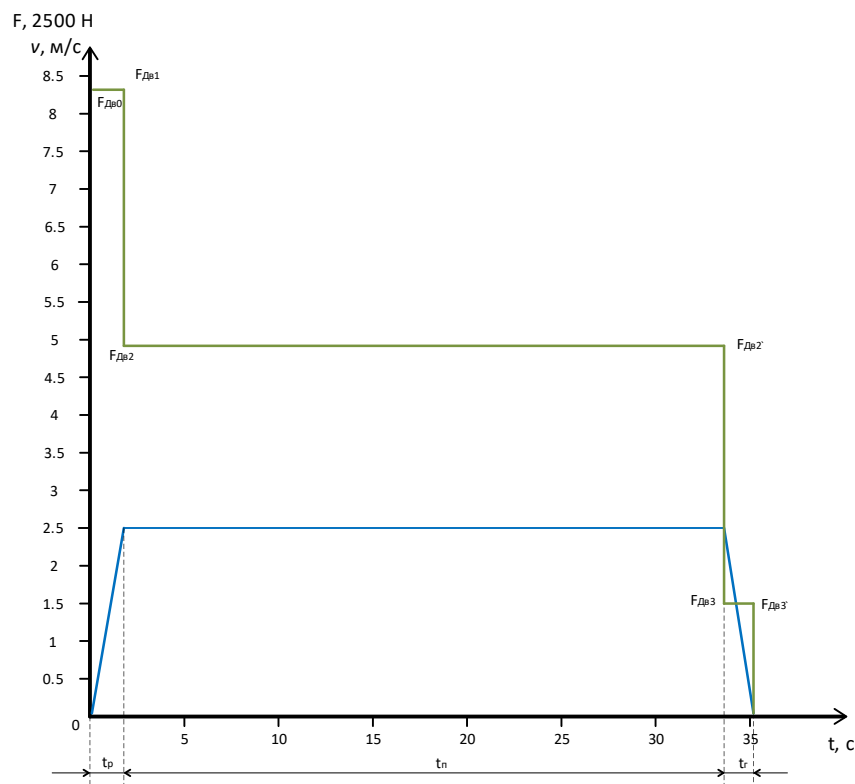


Рисунок 4.2. Рушійна діаграма зусиль при підйомі ліфту

Отримавши діаграму для підйому розрахуємо також точки для діаграми спуску. Рівняння статичних зусиль лишається таке саме, як і рівняння рушійного зусилля на канаті. Коефіцієнт врівноваження також вважаємо $\alpha = 0.5$. Тоді буде

а) Початок шляху

$$F_{\text{ст}0} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.30)$$

$$F_{\text{дв}0} = F_{\text{ст}0} + (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot a = 12250 + (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 20677 \text{ Н} \quad (4.31)$$

б) Завершення розгону

$$F_{\text{ст}1} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.32)$$

$$F_{\text{дв}1} = F_{\text{ст}1} + (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot \alpha = 12250 + (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 20677 \text{ Н} \quad (4.33)$$

в) Початок рівномірного руху

$$F_{\text{дв}2} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.34)$$

г) Кінець рівномірного руху

$$F_{\text{ст}2} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.35)$$

$$F_{\text{дв}2'} = F_{\text{ст}2} = 12250 \text{ Н} \quad (4.36)$$

д) Початок гальмування

$$\begin{aligned} F_{\text{дв}3} &= G - \alpha \cdot G - (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot a = \\ &= 24500 - 0.5 \cdot 24500 - (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 3823 \text{ Н} \end{aligned} \quad (4.37)$$

е) Кінець циклу підйомного

$$F_{\text{ст}3} = G - \alpha \cdot G = 24500 - 0.5 \cdot 24500 = 12250 \text{ Н} \quad (4.38)$$

$$F_{\text{дв}3'} = F_{\text{ст}3} - (M_{\text{в}} + M_{\text{к}}) \cdot a = 12250 - (2500 + 3118) \cdot 1.5 = 3823 \text{ Н} \quad (4.39)$$

По вище розрахованим точкам можемо побудувати рушійну діаграму зусиль. Поєднаємо її з тагороною на рисунку 4.1.

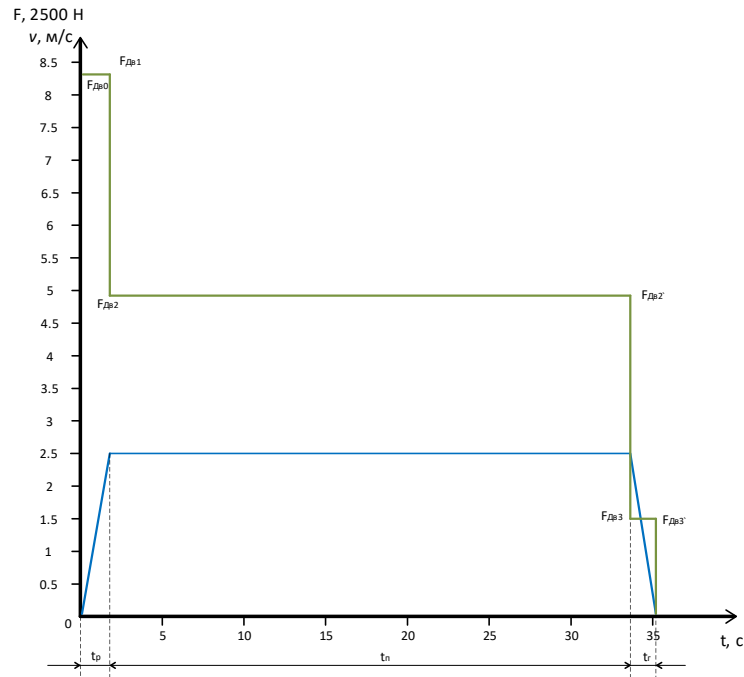


Рисунок 4.3. Діаграма рушійних зусиль для спуску ліфту

Перейдемо до розрахунку сил, які діють при роботі ЛПУ. Розпочнемо з сили тяжіння.

$$F_m = M_z \cdot g = 5618 \cdot 9.8 = 55056 \text{ Н} \quad (4.40)$$

де: g – прискорення вільного падіння, M_z – маса загальна.

Сила тертя:

$$F_{тер} = \mu \cdot F_m = 0.1 \cdot 55056 = 5505 \text{ Н} \quad (4.41)$$

де: μ – коефіцієнт тертя.

Отже, сумарна сила, що діє на ліфт:

$$F_{сум} = F_m + F_{тер} = 55056 + 5505 = 60561 \text{ Н} \quad (4.42)$$

Далі перейдемо до потужності, для цього нам потрібно знайти ще деякі значення. Будемо спиратись на формули еквівалентних зусиль у режимі підйому.

Розглянемо значення зусиль на різних ділянках:

$$F_p = F_{\partial \partial 0} = F_{\partial \partial 1} = 20677 \text{ Н} \quad (4.43)$$

$$F_n = F_{\partial \partial 2} = F_{\partial \partial 2'} = 12250 \text{ Н} \quad (4.44)$$

$$F_z = F_{\partial \partial 3} = F_{\partial \partial 3'} = 3823 \text{ Н} \quad (4.45)$$

Звідси можемо знайти еквівалентне зусилля на ділянках:

$$F_{екв} = \sqrt{\frac{F_p^2 t_p + F_n^2 t_y + F_z^2 t_z}{t_u}} \quad (4.46)$$

Для знаходження не вистачає загального часу циклу:

$$t_u = 2 \cdot t_n = 67.32 \quad (4.47)$$

Отже:

$$\begin{aligned} F_{екв} &= \sqrt{\frac{F_p^2 t_p + F_n^2 t_y + F_z^2 t_z}{t_u}} = \\ &= \sqrt{\frac{20677^2 \cdot 1.7 + 12250^2 \cdot 30.26 + 3823^2 \cdot 1.7}{67.32}} = 8866.66 \text{ Н} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Для знаходження потужності також потрібно привести значення еквівалентного моменту на шківі до моменту на валу двигуна. Спочатку потрібно знайти еквівалентний момент на шківі:

$$M_e = F_e \cdot \frac{D}{2} = 8866.66 \cdot \frac{0.52}{2} = 2305.3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.49)$$

де D – діаметр шківів.

Тепер знаходимо еквівалентний момент двигуна:

$$M_{e.d} = \frac{M_e}{i_p \cdot \eta} = \frac{2305.3}{16 \cdot 0.8} = 180.1 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4.50)$$

де η = ККД додаємо її враховуючи силу тертя для ЛПУ, i_p – передаточне число редуктора знаходиться за формулою:

$$i_p = \frac{\omega_{\partial}}{\omega_{ш}} = \frac{157}{9.6} = 16$$

$$\omega_{\partial} = \frac{\pi \frac{60 \cdot f_1}{2}}{30} = \frac{3.14 \frac{60 \cdot 50}{2}}{30} = 157 \text{ рад/с}$$

$$\omega_{ш} = \frac{\frac{v}{2}}{\frac{D}{2}} = \frac{2.5}{0.52} = 9.6 \text{ рад/с}$$

де ω_{∂} – кутова швидкість двигуна, $\omega_{ш}$ – кутова швидкість шківів. З розрахунків обираємо передаточне число редуктора $i_p = 16$.

Далі нам потрібна необхідна частота обертання ротора двигуна:

$$\omega_{\partial \text{в}} = \frac{2 \cdot v \cdot i_p}{D} = \frac{2 \cdot 2.5 \cdot 16}{0.52} = 153.8 \text{ рад/с} \quad (4.51)$$

Знайдемо еквівалентну потужність двигуна:

$$P_{e.\partial} = M_{e.\partial} \cdot \omega_{\partial \text{в}} \cdot k_3 = 180.1 \cdot 153.8 \cdot 1.3 = 36009.2 \text{ Вт} \quad (4.52)$$

де $k_3 = 1.1-1.5$ – коефіцієнт запасу, який враховує співвідношення тривалості пуску і рівномірного руху.

Визначаємо потужність. Врахуємо дійсну тривалість включення $ПВ_{\text{д}}$, приймаючи те, що найближча каталожна тривалість включення $ПВ_{\text{н}} = 100\%$,:

$$ПВ_{\text{д}} = \frac{T_p}{T_{\text{ц}}} = \frac{61}{67} \cdot 100\% = 91\% \quad (4.53)$$

Отже, потужність:

$$P_{\text{дв}} = P_{e.\partial} \sqrt{\frac{ПВ_{\text{д}}}{ПВ_{\text{н}}}} = 36009.2 \cdot \sqrt{\frac{91}{100}} = 34350.587 \text{ Вт} \quad (4.54)$$

Маємо, що потужність двигуна це 34.3 кВт для роботи ЛПУ. Тому при виборі двигуна будемо спиратись на ті обрахунки, які були проведені у даному розділі.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 4

Четвертий розділ дипломного проекту присвячений розрахунку потужності двигуна для вантажної ліфтової підйомної установки (ЛПУ) в Київському метрополітені. У розділі детально розглянуто розрахунок швидкостей, часу роботи, рушійних зусиль та сил, що діють на ЛПУ, а також визначення необхідної потужності двигуна для забезпечення ефективної та безпечної роботи ліфта. Визначено вихідні дані для розрахунку: вантажопідйомність ЛПУ (2500 кг), швидкість руху ліфта (2.5 м/с), прискорення (1.5 м/с²) та висота підйому (80 м). Розраховано масу вантажної кабіни, противаги та інших елементів, таких як стіни, підлога, двері, освітлення та вентиляція. Знайдено час розгону та гальмування ліфта, шлях проходження ліфта під час розгону та на усталеній швидкості, загальний час переміщення.

Визначено динамічне та статичне зусилля ЛПУ при підйомі та спуску, побудовано діаграми рушійних зусиль для підйому та спуску ліфта, розраховано сили, що діють на ліфт, включаючи силу тяжіння, силу тертя та сумарну силу. Розраховано еквівалентне зусилля на різних ділянках шляху ліфта та еквівалентний момент на шківі, визначено еквівалентний момент двигуна та передаточне число редуктора, знайдено необхідну частоту обертання ротора двигуна та еквівалентну потужність двигуна. Враховано коефіцієнт запасу та дійсну тривалість включення для визначення остаточної потужності двигуна.

Таким чином, розрахунки, проведені у цьому розділі, дозволяють визначити необхідну потужність двигуна для роботи ЛПУ, яка становить 34.3 кВт. Вибір двигуна буде базуватися на цих розрахунках, що забезпечить ефективну та безпечну роботу ліфтової підйомної установки в умовах Київського метрополітену. Це дозволить підвищити оперативність та надійність вантажних перевезень, знизити експлуатаційні витрати та впровадити сучасні технології у транспортну інфраструктуру.

5. ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА УСІХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ ВАНТАЖНОЇ ЛПУ

5.1 Вибір електродвигуна для ЛПУ

У цьому розділі буде обрано усі елементи для електроприводу. Правильний вибір елементів є важливим елементом, адже від цього залежить ефективність роботи схеми. У попередньому розділі було розраховано усі потрібні параметри та отримано приблизну потужність, яку має мати електродвигун. Був варіант обрати 2 електродвигуни, але це матеріально не вигідно, тому будемо обирати один приблизно на 35 кВт.

Вибираємо двигун серії “4А” та “АІР”. Щодо цінової категорії вони, приблизно однакові. Двигуни гарно зарекомендували себе на ринку. Вони є оптимальним вибором для широкого спектра промислових застосувань завдяки своїй надійності, ефективності та простоті обслуговування. Ці електродвигуни асинхронні з короткозамкненим ротором, виготовлені з високоякісного алюмінію або чавуну. Мають таку конструкцію корпусу, яка забезпечує ефективне охолодження, що служить більшою довговічністю. Двигуни мають широкий спектр різних моделей та широкий спектр номінальних потужностей від 0.12 до 315 кВт.

Головними перевагами електродвигунів є їх ефективність, бо має великий ККД. Вони прості в обслуговуванні та надійні, завдяки простій конструкції та якісним матеріалам, а найбільше те, що “АІР” та “4А” є універсальними та стійким до перевантажень. Щодо недоліків, то це: шум, вага, розміри. Вважаючи, що електродвигун буде знаходитись у шахті ліфтовій, це один з найкращих варіантів для даного проекту. Продивлячись каталог, та звертаючи увагу на те, що двигун має мати потужність 34.3 кВт, вибіраємо 4A200M4Y3. У таблиці 5.1 наведено паспортні дані електродвигуна 4A200M4Y3.

Таблиця 5.1 – Паспортні дані електродвигуна 4A200M4У3

Параметри	Номінал
Потужність	37 кВт
Частота обертання поля статора	1500 об/хв
Швидкість обертання валу	1475 об/хв
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Напруга живлення	Трифазна 380/660 В
Номінальний струм	70,2 А
ККД	92 %
Момент інерції	0,15 кг·м ²
Номінальне ковзання	$S_n = 1.7 \%$
Критичне ковзання	$S_k = 10 \%$
Кратність пускового моменту $M_{\text{пуск}} / M_n$	2,2
Перевантажувальна здатність $M_{\text{макс}} / M_n$	2,3
Кратність пускового струму $I_{\text{пуск}} / I_n$	7,2
Номінальний крутний момент	242,021 Нм
Ступінь захисту	IP55
Параметри схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$x_1' = 0.086$
Активний опір статора	$R_1' = 0.039$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$x_2'' = 0.14$
Приведений активний опір ротора	$R_2'' = 0.018$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$x_\mu = 4.2$

Розрахуємо параметри обраного асинхронного двигуна. Розпочнемо з кутової частоти напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с} \quad (5.1)$$

Далі швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ рад/с} \quad (5.2)$$

Номінальна швидкість двигуна буде:

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - s_n) = 157(1 - 1.7) = 109.9 \text{ рад/с} \quad (5.3)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P}{\omega_n} = \frac{37000}{109.9} = 336.7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.4)$$

Маючи номінальний момент двигуна можемо знайти критичний:

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2 \cdot 336.7 = 673.4 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора будуть:

$$U_n = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В} \quad (5.6)$$

$$I_n = \frac{P}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{37000}{3 \cdot 220 \cdot 0.92 \cdot 0.90} = 67.7 \text{ А} \quad (5.7)$$

Амплітудне значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В} \quad (5.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 67.7 = 95.7 \text{ А} \quad (5.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_l = 0$:

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0.99 \text{ Вб} \quad (5.10)$$

Далі зробимо розрахунки параметрів схем заміщення. На рисунку 5.1 зображена Т-подібна схема заміщення, а на рисунку 5.2 Г-подібну. Перерахуємо з Г-подібної в Т-подібну.

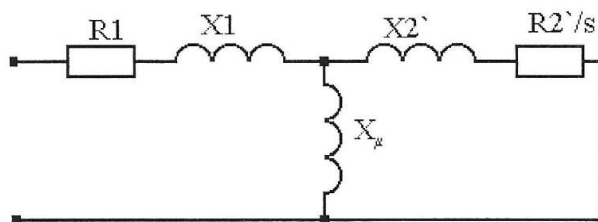


Рис. 5.1. Т-подібна схема заміщення АД

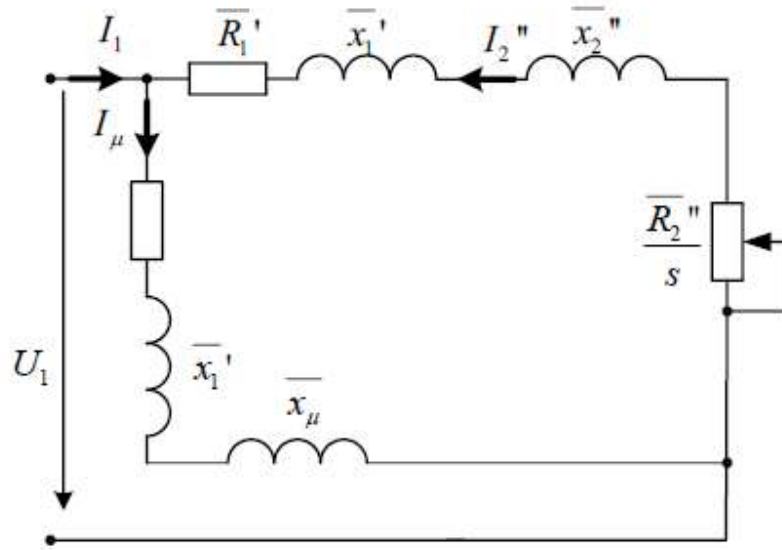


Рис. 5.2. Г-подібна схема заміщення АД

Спочатку розрахуємо коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами:

$$c_1 = \frac{x_\mu + \sqrt{x_\mu^2 + 4 \cdot x_1' \cdot x_\mu}}{2 \cdot x_\mu} = \frac{4.2 + \sqrt{4.2^2 + 4 \cdot 0.086 \cdot 4.2}}{2 \cdot 4.2} = 1.02 \quad (5.11)$$

Далі розрахуємо параметри Т-подібної схеми заміщення. У відносних одиницях:

$$\overline{x_1'} = \frac{x_1'}{c_1} = \frac{0.086}{1.02} = 0.084 \quad (5.12)$$

$$\overline{R_1'} = \frac{R_1'}{c_1} = \frac{0.039}{1.02} = 0.038 \quad (5.13)$$

$$\overline{x_2''} = \frac{x_2''}{c_1} = \frac{0.14}{1.02} = 0.137 \quad (5.14)$$

$$\overline{R_2''} = \frac{R_2''}{c_1} = \frac{0.018}{1.02} = 0.017 \quad (5.15)$$

У абсолютних одиницях:

$$x_1 = \frac{\overline{U}_n}{I_n} = 0.084 \cdot \frac{220}{67.7} = 0.273 \text{ Ом} \quad (5.16)$$

$$R_1 = \frac{\overline{U}_n}{I_n} = 0.038 \cdot \frac{220}{67.7} = 0.123 \text{ Ом} \quad (5.17)$$

$$x_2' = \frac{\overline{U}_n}{I_n} = 0.137 \cdot \frac{220}{67.7} = 0.445 \text{ Ом} \quad (5.18)$$

$$R_2 = \frac{\overline{U}_n}{I_n} = 0.017 \cdot \frac{220}{67.7} = 0.055 \text{ Ом} \quad (5.19)$$

$$x_\mu = \frac{\overline{U}_n}{I_n} = 4.2 \cdot \frac{220}{67.7} = 13.648 \text{ Ом} \quad (5.20)$$

Індуктивність розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_{0n}} = \frac{0.273}{314} = 0.00087 \text{ Гн} \quad (5.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_{0n}} = \frac{0.445}{314} = 0.0014 \text{ Гн} \quad (5.22)$$

Індуктивність намагнічуючого контур:

$$L_{\text{м}} = \frac{x_\mu}{\omega_{0n}} = \frac{13.648}{314} = 0.0434 \text{ Гн} \quad (5.23)$$

Індуктивність розсіювання статора та ротора:

$$L_1 = L_{\text{м}} + L_{1\sigma} = 0.0434 + 0.00087 = 0.04427 \text{ Гн} \quad (5.24)$$

$$L_2 = L_{\text{м}} + L_{2\sigma} = 0.0434 + 0.0014 = 0.0448 \text{ Гн} \quad (5.25)$$

Обчислимо α , α_1 , β , γ , σ , σ_1 :

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.055}{0.0448} = 1.22 \text{ Ом/Гн} \quad (5.26)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.123}{0.0442} = 2.78 \text{ Ом/Гн} \quad (5.27)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_{\text{м}}^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0442 \left(1 - \frac{0.0434^2}{0.0442 \cdot 0.0448} \right) = 0.0021 \text{ Гн} \quad (5.28)$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} \right) = 0.0448 \left(1 - \frac{0.0434^2}{0.0442 \cdot 0.0448} \right) = 0.0021 \text{ Гн} \quad (5.29)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0434}{0.0448 \cdot 0.0021} = 461.31 \frac{1}{\text{Гн}} \quad (5.30)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{0.123}{0.0021} + 1.22 \cdot 0.0434 \cdot 461.31 = 82.99 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \quad (5.31)$$

Розраховані дані двигуна і наведено у таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Паспортні дані електродвигуна 4A200M4У3

Параметр	Номінал	Параметр	Номінал
$P_n, (\text{кВт})$	37	$R_1, (\text{Ом})$	0.123
$\omega_{xx}, (\text{рад} / \text{с})$	157	$R_2, (\text{Ом})$	0.055
$\omega_n, (\text{рад} / \text{с})$	109.9	$L_1, (\text{Гн})$	0.0442
$M_n, (\text{Н} \cdot \text{м})$	336.7	$L_2, (\text{Гн})$	0.0448
$M_k, (\text{Н} \cdot \text{м})$	673.4	$L_m, (\text{Гн})$	0.0434
λ	2	$\alpha, (\text{Ом} / \text{Гн})$	1.22
$I_{na}, (\text{А})$	95.7	$\alpha_1, (\text{Ом} / \text{Гн})$	2.78
$\psi_{1XX}, (\text{Вб})$	0.99	$\sigma, (\text{Гн})$	0.0021
1	2	1	2
η	0.92	$\beta, (1 / \text{Гн})$	461.31
$\cos \varphi$	0.90	$\gamma, (\text{Ом} / \text{Гн})$	82.99
$J_d, (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$	0.15	p	2

Перевіримо чи вірно вибрано двигун для ЛПУ. Перевірку проводимо по перевантажувальній здатності. Двигун буде вибраний правильно, якщо $M_{\max}^{\text{необх}} \leq M_{\max}^{\text{кат}}$, де $M_{\max}^{\text{необх}}$ - необхідний максимальний момент, $M_{\max}^{\text{кат}}$ - максимальний момент, вказаний в каталозі для цього двигуна.

Потужність на бистрохідному валу:

$$P_{\text{ТВ}} = \frac{F_{\text{дв0}} \cdot v}{\eta} = \frac{20677 \cdot 2.5}{0.90} = 57436.11 \text{ Вт} \quad (5.32)$$

При цьому момент на бистрохідному валу:

$$M_1 = M_{\max 1} = \frac{P_{\text{ТВ}}}{\omega_{\text{дв}}} = \frac{57436.11}{153.8} = 373.44 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.33)$$

Перейдемо до розрахунків номінальних та максимальних моментів.

Номінальна швидкість обертання:

$$M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{37000}{109.9} = 336.67 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.34)$$

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_{\text{ном}} = 2 \cdot 336.67 = 673.34 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.35)$$

Звідси видно, що

$$\begin{aligned} M_{\max 1} &\leq M_{\max} \\ 373.44 &\leq 673.34 \end{aligned}$$

Двигун проходить по перевантажувальній здатності.

5.2 Вибір перетворювача частоти для ЛПУ

Перетворювач частоти потрібний для регулювання швидкості обертання двигуна за допомогою зміни частоти живлення. При виборі ПЧ (перетворювач частоти) спираємось на потужність двигуна, номінальну напругу, яка повинна відповідати напрузі живлення двигуна, а також вихідний струм перетворювача,

який має бути не менший номінального струму двигуна. Продивляючись ринок можна знайти багато цікавих варіантів: Siemens, Schneider, Hitachi і т.д. Для проекту найкращим варіантом буде компанія ABB, яка також не погано зарекомендувала себе та має гарні відгуки. Обираємо ПЧ серії ACS580-01-087A-4 (рис. 5.1), який має номінальну потужність 45 кВт та номінальний струм 87 А.



Рисунок 5.1. Обраний перетворювач частоти ACS580-01-087A-4

ПЧ має векторне керування без зворотного зв'язку та скалярне керування, що дає змогу проводити плавний пуск та зупинку, а також більше чітке керування швидкістю. Має автоматичне налаштування параметрів двигуна, що полегшує роботу при вводі даних та “сплячий режим”, який дає змогу зберігати енергію. Має вбудований Modbus RTU та підтримує додаткові модулі для Profibus, CANopen, Ethernet/IP, DeviceNet. Для моніторингу і діагностики передбачено вбудований дисплей, підтримка діагностичних функцій, таких як виявлення перевантаження, короткого замикання, перегріву.

До переваг частотного перетворювача належать висока енергоефективність завдяки енергоефективним алгоритмам керування, можливість підключення до систем моніторингу енергоспоживання, гнучкість і універсальність у застосуванні до різних типів двигунів, широкий спектр налаштувань, простота використання завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу користувача, надійність завдяки високоякісним компонентам, стійкість до несприятливих умов експлуатації (пил, волога, температурні коливання).

Серед недоліків можна виділити високу початкову вартість, що може бути значним капіталовкладенням для невеликих підприємств, додаткові витрати на встановлення і налаштування, складність для новачків через необхідність певних знань і досвіду для налаштування, залежність від стабільного і якісного електроживлення.

5.3 Вибір редуктора для ЛПУ

Перейдемо до редуктора і будемо обирати його виходячи з передаточного числа та потужності. Черв'ячний редуктор Bonfiglioli W110 (рисунок 5.2) є частиною серії W, відомої своєю надійністю, ефективністю і довговічністю. Цей редуктор призначений для використання в різних промислових галузях, таких як машинобудування, обробка матеріалів, конвеєрні системи, підйомні механізми та інші. Основні технічні характеристики включають передаточне число 16, потужність на швидкохідному валу 75 кВт, крутний момент на тихохідному валу до 7000 Нм, максимальну вхідну швидкість до 1800 об/хв. Корпус виготовлений з високоміцного чавуну, клас захисту IP55 (можливі варіанти з IP65 для використання в жорстких умовах), охолодження природне або примусове повітряне, робоча температура від -20°C до +40°C (можливі варіанти для більш екстремальних температур).

Черв'як і черв'ячне колесо виготовляються з високоякісних матеріалів, що забезпечує тривалий термін служби і надійність роботи. Черв'як виготовляється зі сталі, а черв'ячне колесо — з бронзи або зносостійких матеріалів. Корпус редуктора виготовлений з високоміцного чавуну, що забезпечує захист від механічних пошкоджень і корозії, а також відмінне тепловідведення. Редуктор легко інтегрується в різні системи завдяки універсальному монтажному виконанню, можливі різні варіанти монтажу: на лапах, фланцевий монтаж тощо.

Bonfiglioli W110 забезпечує високий крутний момент до 7000 Нм, що дозволяє використовувати редуктор в умовах високих навантажень. Компактна конструкція дозволяє використовувати редуктор в обмеженому просторі, а низький рівень шуму, забезпечений черв'ячною передачею, є важливим для багатьох застосувань. Використання високоякісних матеріалів і технологій виробництва забезпечує тривалий термін служби і мінімальні витрати на обслуговування. Високий коефіцієнт корисної дії (до 0.75) забезпечує ефективну передачу енергії і знижує енергоспоживання.

Серед недоліків можна відзначити низький ККД порівняно з іншими типами редукторів, високий знос черв'ячного колеса при неправильних умовах експлуатації або виборі матеріалів, а також можливість необхідності додаткового охолодження для запобігання перегріву редуктора при високих навантаженнях.

Черв'ячні редуктори Bonfiglioli W Series використовуються для забезпечення плавного та надійного руху конвеєрних стрічок в різних промислових умовах, в підйомних механізмах завдяки високому крутному моменту і властивостям самозатискання, у системах вентиляції і насосних установках завдяки компактності і низькому рівню шуму, а також в машинах для обробки матеріалів, де важливий високий крутний момент і точність руху.

Додаткові особливості включають високу термостійкість, гнучкість конфігурації завдяки різним варіантам монтажу і можливість вибору матеріалу

корпусу, а також інтеграцію з сучасними системами автоматизації для точного і ефективного керування промисловими процесами.



Рисунок 5.2. Редуктор фірми Bonfiglioli

5.4 Канати для ЛПУ

Обираємо сталевий канат 6х37 із сердечником із прядивного волокна (IWRC - Independent Wire Rope Core) (рисунок 5.3). Він високоякісний і надійний компонент який широко використовується в різних галузях промисловості. Він поєднує в собі високу міцність, гнучкість та довговічність, що робить його ідеальним для використання в умовах високих навантажень та інтенсивної експлуатації.

Основні технічні характеристики канату включають конструкцію 6х37, що означає, що канат складається з 6 основних прядок, кожна з яких має 37 дротів. Така конструкція забезпечує високу гнучкість і міцність. Сердечник із прядивного волокна (IWRC) додає додаткову міцність і підтримку прядкам, підвищуючи вантажопідйомність і стійкість до зношування. Канат виготовлений із високовуглецевої сталі, оцинкованої для підвищення корозійної стійкості, що подовжує його термін служби, особливо в умовах підвищеної

вологості. Діаметр канату варіюється від 8 мм до 20 мм залежно від конкретних вимог застосування, для ЛПУ рекомендується діаметр 16 мм, що забезпечує високу міцність і безпеку. Мінімальна руйнівна сила (МРС) для канату діаметром 16 мм з конструкцією 6х37 складає приблизно 200 кН (20400 кгс), робоче навантаження до 5000 кг при коефіцієнті запасу міцності 6, що гарантує високий рівень безпеки.

Серед переваг канату 6х37 з IWRC можна виділити високу гнучкість, що дозволяє його використовувати на шківках і барабанах з малими діаметрами, зменшуючи ризик перегинів і деформацій. Висока міцність і вантажопідйомність забезпечуються високовуглецевою сталлю і конструкцією IWRC, що дозволяє використовувати канат в умовах високих навантажень. Оцинкована сталь і прядивний сердечник забезпечують стійкість до корозії і зносу, що подовжує термін служби канату і знижує витрати на технічне обслуговування. Високий коефіцієнт запасу міцності гарантує надійну і безпечну експлуатацію канату, знижуючи ризик аварійних ситуацій. Канат з сердечником IWRC має високу стійкість до зношування і деформації, що забезпечує стабільність його характеристик протягом тривалого періоду експлуатації.

Недоліками сталевих канатів можуть бути їх вага, що може ускладнити процеси монтажу і обслуговування. Незважаючи на високу гнучкість, канати 6х37 можуть бути чутливими до перегинів і деформацій при неправильному використанні. Для забезпечення тривалого терміну служби і безпеки експлуатації сталеві канати потребують регулярного обслуговування і огляду. Додаткові особливості канату включають високу термостійкість, завдяки використанню високоміцних матеріалів і продуманій конструкції, можливість вибору різних діаметрів і варіантів сердечника, що дозволяє адаптувати канат під конкретні потреби замовника, а також інтеграцію з сучасними системами

автоматизації і контролю для забезпечення точного і ефективного керування підйомними і транспортними процесами.

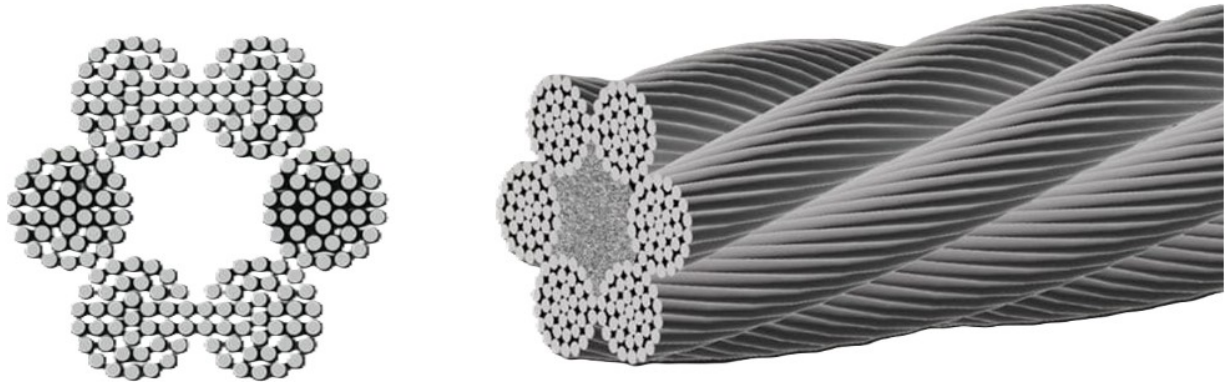


Рисунок 5.3. Сталевий канат 6x37 із сердечником із прядивного волокна (IWRC - Independent Wire Rope Core)

5.5 ПЛК для ЛПУ

Обиремо ПЛК компанії Siemens модель S7-1200. Програмований логічний контролер Siemens S7-1200, частина сімейства SIMATIC від Siemens, відомий своєю надійністю, гнучкістю та функціональністю, забезпечуючи ефективну автоматизацію процесів у різних галузях промисловості.

Основні технічні характеристики контролера включають кілька моделей CPU: CPU1211C, CPU1212C, CPU1214C, CPU1215C і CPU1217C. Обсяг пам'яті варіюється від 25 кБ до 125 кБ для зберігання програм і даних, а швидкість обробки інструкцій сягає до 0.08 мкс на операцію. Контролер підтримує від 6 до 14 цифрових входів/виходів (DI/DO) та до 2 аналогових входів/виходів (AI/AO) у деяких моделях, з можливістю розширення до 200 входів/виходів за допомогою додаткових модулів.

Комунікаційні можливості включають вбудований Ethernet-порт для програмування, обміну даними та інтеграції з іншими системами, підтримку стандарту PROFINET для інтеграції з промисловими мережами та протоколу

Modbus TCP/IP для з'єднання з різними пристроями. Напруга живлення контролера становить 24 В постійного струму (DC). Модульна конструкція дозволяє легко розширювати систему, додаючи додаткові модулі вводу/виводу та комунікаційні модулі.

Контролер підтримує стандарти безпеки SIL2 і SIL3 (Safety Integrity Level) для забезпечення високого рівня захисту. Програмне забезпечення TIA Portal надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та потужні інструменти для розробки програм, що робить програмування та налаштування зручними та ефективними.

Серед додаткових можливостей та особливостей S7-1200 є вбудований веб-сервер для моніторингу та налаштування системи через веб-інтерфейс, підтримка HMI-панелей для зручного управління і моніторингу процесів, дистанційне управління і моніторинг через Інтернет або локальну мережу, підтримка протоколу OPC UA для забезпечення сумісності з різними системами автоматизації та обміну даними в реальному часі, а також високий рівень діагностики з вбудованими функціями для оперативного виявлення та усунення несправностей.

Переваги контролера включають високу надійність і стійкість до перешкод, забезпечуючи безперебійну роботу в умовах підвищеної електромагнітної завадостійкості, гнучкість і модульність, що дозволяє легко розширювати систему відповідно до потреб, простоту інтеграції завдяки вбудованим інтерфейсам і підтримці стандартних протоколів зв'язку, інтуїтивно зрозуміле програмування за допомогою TIA Portal та високу продуктивність завдяки швидкій обробці інструкцій.

До недоліків можна віднести високу початкову вартість порівняно з деякими іншими ПЛК, яка компенсується надійністю і функціональністю, а також складність налаштування для новачків, що може вимагати певного рівня знань і досвіду для програмування, особливо для складних завдань.

5.6 Вибір кнопок керування ЛПУ

Виберемо кнопку ВК 14-21 (рисунок 5.4), яка призначена для встановлення на стацію управління ліфта і використовується для здійснення виклику ліфта з конкретного поверху. Основна мета цієї кнопки – надати пасажирам зручний і простий спосіб викликати ліфт на потрібний поверх.



Рисунок 5.4. Кнопка ВК 14-21

Основні характеристики кнопки ВК 14-21: має два положення: "виклик" і "зупинка". При натисканні на кнопку "виклик" ліфт викликається на відповідний поверх, а при натисканні на кнопку "зупинка" ліфт зупиняється на даному поверсі. Кнопка може працювати при різних напругах, таких як 24 В або 220 В, залежно від типу ліфтової системи і параметрів станції управління. Кнопка ВК 14-21 призначена для монтажу на стіні станції управління ліфта або в ліфтовій кабіні.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 5

П'ятий розділ дипломного проекту присвячений вибору електродвигуна та інших компонентів для вантажної ліфтової підйомної установки (ЛПУ) в Київському метрополітені. Розглянуто всі необхідні елементи електроприводу, включаючи електродвигун, перетворювач частоти, редуктор, канати, програмований логічний контролер (ПЛК) та кнопки керування.

Для ЛПУ обрано електродвигун серії "4A" потужністю 37 кВт, який відповідає вимогам щодо ефективності, надійності та простоти обслуговування. Двигун має великий ККД, здатний витримувати перевантаження та високий ступінь захисту.

Для регулювання швидкості обертання двигуна обрано перетворювач частоти серії ACS580-01-087A-4 від компанії АВВ. Цей пристрій забезпечує плавний пуск та зупинку, чітке керування швидкістю, підтримку сучасних протоколів зв'язку та діагностичних функцій.

Редуктор обрано серії Bonfiglioli W110, який забезпечує високий крутний момент до 7000 Нм, має високу ефективність передачі енергії та тривалий термін служби. Редуктор виготовлений з високоміцного чавуну, що забезпечує захист від механічних пошкоджень і корозії.

Канати для ЛПУ вибрано типу 6х37 із сердечником із прядивного волокна (IWRC), який поєднує високу міцність, гнучкість та довговічність. Канат виготовлений із високовуглецевої сталі, оцинкованої для підвищення корозійної стійкості, що подовжує його термін служби.

Для керування ЛПУ обрано програмований логічний контролер Siemens S7-1200, який забезпечує надійність, гнучкість та функціональність для ефективної автоматизації процесів. Контролер підтримує стандарти безпеки SIL2 і SIL3, має вбудований веб-сервер для моніторингу та налаштування системи через веб-інтерфейс.

Кнопки керування обрано типу ВК 14-21, які встановлюються на станцію управління ліфта та використовуються для виклику ліфта з конкретного поверху. Кнопка має два положення: "виклик" і "зупинка", забезпечуючи зручний спосіб керування ліфтом.

Таким чином, виконання зазначених вимог та використання сучасних комплектуючих дозволить створити ефективну, надійну та безпечну систему для вантажної ліфтової підйомної установки в умовах Київського метрополітену. Це забезпечить підвищення оперативності та безпеки вантажних перевезень, зниження експлуатаційних витрат та впровадження сучасних технологій у транспортну інфраструктуру.

6. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ТА ПОТОКОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

6.1 Математична модель АД

У цьому розділі розглянемо математичну модель та систему векторного керування двигуном. В загальному для моделювання систем керування АД використовується математична модель, що записується через вектори струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат (a-b):

$$\dot{\theta} = \omega,$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega,$$

$$M = \mu_1 p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}),$$

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a},$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b},$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \psi_{2b} \omega + \alpha L_m i_{1a},$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \psi_{2a} \omega + \alpha L_m i_{1b}.$$

де ω – кутова швидкість, J – момент інерції двигуна, M – момент двигуна, M_c – момент навантаження на валу двигуна, θ – кут повороту валу двигуна, v – коефіцієнт в'язкого тертя, ψ_{2a}, ψ_{2b} – компоненти вектора потокозчеплення ротора, (i_{1a}, i_{1b}) – компоненти вектора струму статора. Для початку ми розглянемо математичну модель для кращого розуміння та цей процес є важливим для розробки алгоритму керування АД.

Загальне моделювання електричного двигуна дає нам велику модель, яку потім важно застосовувати для управління та користування. Тому для цього

будемо використовувати поняття ідеалізованих машин для математичного опису процесів ел.механічного перетворення енергії. У ідеалізованих машинах самі процеси описуються узагальненою машиною, яка має в собі основні типи електричних машин. На даний час більшість електричних машин вже налаштовані на конкретний спосіб управління.

Щодо електромагнітних процесів в електричних машинах, то вони визначаються полями в повітряному зазорі. Вони утворюються струмами, що проходять уздовж осі машини, бо у лобових частинах струм має менший вплив і утворюються потоки розсіювання. Іноді вважаються, що силові лінії магнітного поля в зазорі перпендикулярні циліндричних поверхнях статора та ротора, які утворюють повітряний зазор. Від типу обмотки залежить і розподіл струмів, а зміни у часі залежать від характеру підведеного до обмоток напруги.

Ми будемо розглядати двополюсну електричну машину, адже у багатополюсних двигунах всі процеси повторюються через кожну пару полюсів.

Перетворювач електромеханічний, рисунок 6.1, ми будемо розглядати, як основу з двох частин, а саме: механічної та електричної.

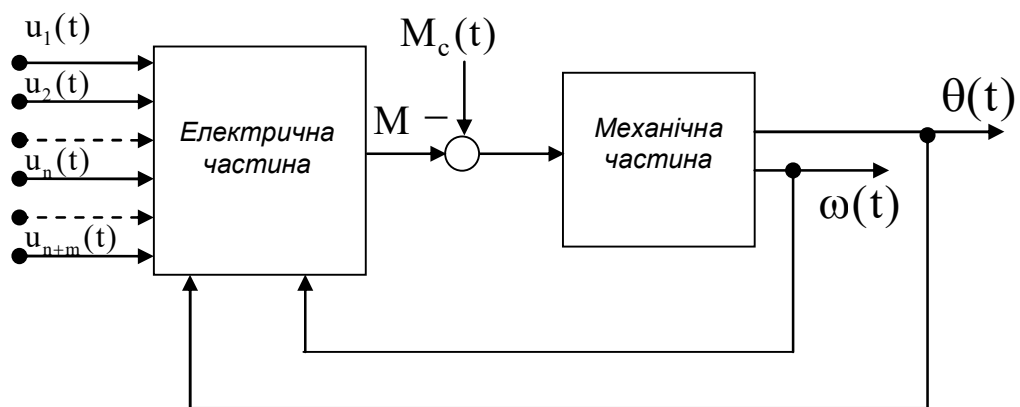


Рисунок 6.1. Схема електромеханічного перетворювача енергії

Нам потрібно електричні машини, які будуть виконувати наступні вимоги:

1. Магнітний ланцюг машини не насичується і має нескінченну магнітну проникність, втрати на гістерезис і вихрові струми нехтовно малі.

2. Матриця індуктивностей розміром симетрична і позитивно визначена, тобто, де - кутове положення ротора, T - знак транспонування, n і m - число фаз статора і ротора відповідно.

3. Індуктивності розсіювання не залежать від кутового положення ротора.

Опишемо процес електромеханічного перетворення енергії за виконання цих умов, для цього сформуємо вектори струмів, напруг та потокозчеплення електричної машини:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (u_{1s}, u_{2s}, \dots, u_{ns}; u_{1r}, u_{2r}, \dots, u_{mr})^T \\ \mathbf{i} &= (i_{1s}, i_{2s}, \dots, i_{ns}; i_{1r}, i_{2r}, \dots, i_{mr})^T \\ \boldsymbol{\psi} &= (\psi_{1s}, \psi_{2s}, \dots, \psi_{ns}; \psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{mr})^T \end{aligned} \quad (6.1)$$

Зв'язок між струмами та потокозчепленням задається за допомогою алгебраїчного рівняння:

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}(\varepsilon) \mathbf{i} \quad (6.2)$$

Узагальнене рівняння електричної рівноваги:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \mathbf{i} + \dot{\boldsymbol{\psi}} \quad (6.3)$$

Це рівняння записано у формі рівнянь Кірхгофа, де $\mathbf{R} = \text{diag}(R_{1s}, R_{2s}, \dots, R_{ns}; R_{1r}, R_{2r}, \dots, R_{mr})$

Якщо рівняння (6.2) підставимо у рівняння (6.3), знайдемо диференційне векторне рівняння. Воно встановлює зв'язок між вектором струмів і вектором напруг і отримаємо:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{L}^{-1}(\varepsilon) \left(-\mathbf{R} \mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right) \quad (6.4)$$

З рівняння (6.4) маємо знати, що матриця індуктивностей існує за умови:

$$\mathbf{L}(\varepsilon) = \mathbf{L}^{-1}(\varepsilon) > 0 \quad (6.5)$$

Якщо умова все таки виконана маємо момент електричної машини:

$$M = \frac{\partial W_3(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \quad (6.6)$$

де $W_3 = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}(\varepsilon) \mathbf{i}$ - електромагнітна енергія.

Врахувавши це має момент асинхронного двигуна:

$$M = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} \quad (6.7)$$

Доповнивши рівняння, що описують динамічні процеси та момент, рівняннями руху механічної частини з постійним моментом інерції отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} [M - v\omega - M_c(t)], \quad M = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} \\ \dot{\mathbf{i}} &= \mathbf{L}^{-1}(\varepsilon) \left(-\mathbf{R}\mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right) \end{aligned} \quad (6.8)$$

де $v > 0$ - коефіцієнт в'язкого тертя.

Дивлячись на рівняння (6.4) можемо зобразити структурну схему довільної машини електричної, рисунок 6.2:

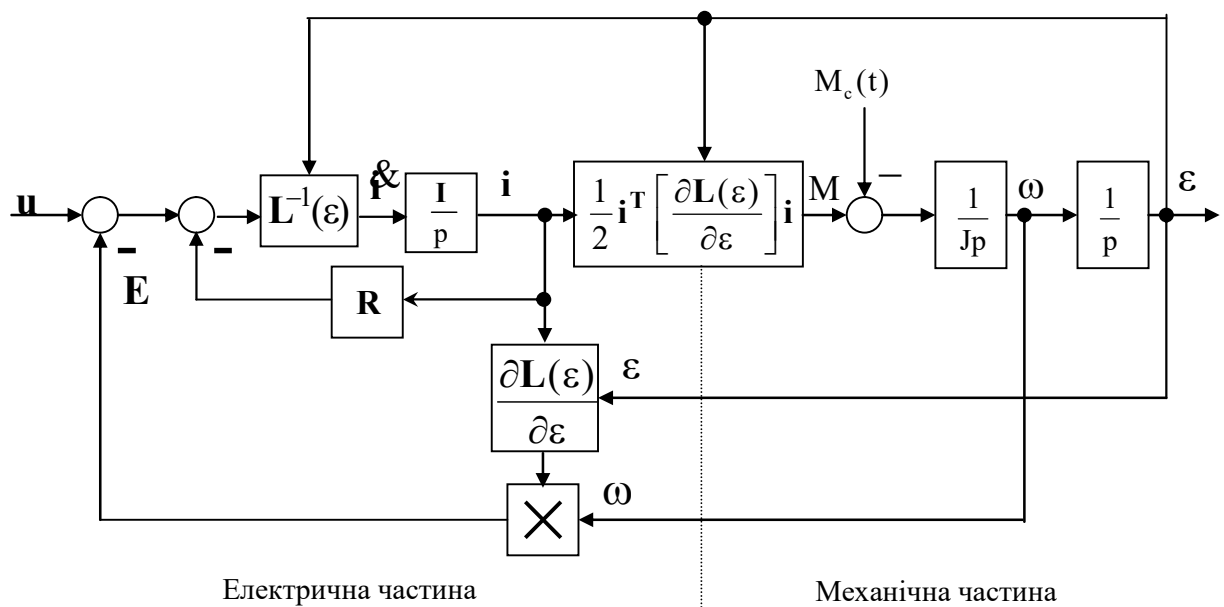


Рисунок 6.2. Структурна схема довільної електричної машини

В ідеалізованій електричній машині математичний опис процесу електромеханічного перетворення енергії можна значно спростити шляхом переходу до еквівалентної двофазної моделі. Такі можливості заміни забезпечують узагальнений математичний опис процесу електромеханічного перетворення енергії обертової електричної машини за допомогою ідеального двофазного електромеханічного перетворювача, який називається узагальненою електричною машиною.

Узагальнена електрична машина - це спрощена модель реальної машини. Крім названих вище припущень 1 - 3, вона заснована на тому, що магнітні потоки і МДС, створювані обмотками статора і ротора, синусоїдально розподілені уздовж довжини кола машини. Для обмоток, які мають несинусоїдальну МДС, враховують перший просторову гармоніку поля, магнітні потоки від вищих гармонік відносять до потоків розсіяння.

Спираючись на умови симетричного харчування та стосовно рівнянь (6.2) та (6.3) динамічні процеси в елементарній узагальненій електричній машині, рисунок 6.3, описуються за допомогою чотирьох рівнянь. По-перше, це рівняння електромагнітного моменту двигуна, а друге – рівняння електричної рівноваги в ланцюгах обмоток.

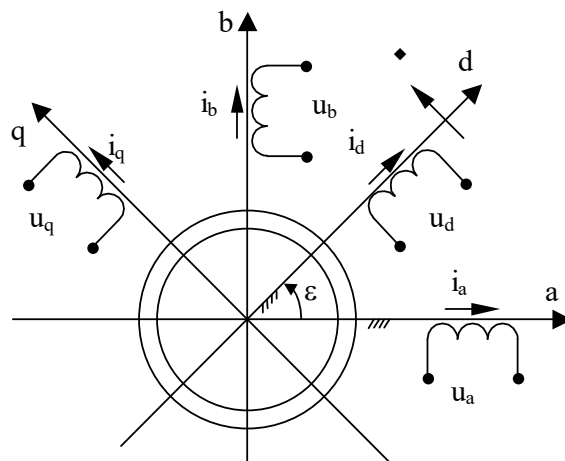


Рисунок 6.3. Елементарна узагальнена двофазна електрична машина

Запишемо рівняння електричної рівноваги, що встановлює зв'язок між векторами напруги та потокозчеплення. Прийmemo, що $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1^T, \mathbf{u}_2^T]^T$ - вектор прикладених напружень та $\mathbf{i} = [\mathbf{i}_1^T, \mathbf{i}_2^T]^T$ - вектор струмів, $\boldsymbol{\psi} = [\boldsymbol{\psi}_1^T, \boldsymbol{\psi}_2^T]^T$ - вектор потокозчеплення статора, $\mathbf{L}(\varepsilon)$ - матриця індуктивностей, $\mathbf{R} = \text{diag}(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2)$ - матриця опорів машини. Отже маємо:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d\boldsymbol{\psi}}{dt} \quad (6.9)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}(\varepsilon)\mathbf{i} \quad (6.10)$$

З рівняння (6.10) візьmemo вектор $\mathbf{i}$ та підставимо його в рівняння (6.9), отримаємо електричну рівновагу у формі потокозчеплення. Запишемо електричну рівновагу щодо векторів ротора та статора:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{R}_1\mathbf{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_1}{dt} \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{R}_2\mathbf{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_2}{dt} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Отже, потокозчеплення для АД будуть:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_1 &= \mathbf{L}_1\mathbf{i}_1 + \mathbf{L}_{12}\mathbf{e}^{j\varepsilon}\mathbf{i}_2 \\ \boldsymbol{\psi}_2 &= \mathbf{L}_2\mathbf{i}_2 + \mathbf{L}_{12}\mathbf{e}^{-j\varepsilon}\mathbf{i}_1 \end{aligned} \quad (6.12)$$

Як бачимо рівняння рівні, $\mathbf{L}_{12}$ - це максимальне значення взаємної індуктивності між будь-який з обмоток статора і ротора.

$$\mathbf{e}^{j\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon(t) & -\sin \varepsilon(t) \\ \sin \varepsilon(t) & \cos \varepsilon(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{e}^{-j\varepsilon} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon(t) & \sin \varepsilon(t) \\ -\sin \varepsilon(t) & \cos \varepsilon(t) \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Слід зазначити, що саме оператори забезпечують координатні перетворення векторів з обертальної в стаціонарну систему координат та навпаки. Далі візьmemo рівняння (5.12) та підставимо у (5.13) і отримаємо рівняння електричної рівноваги:

$$\begin{aligned}
\mathbf{u}_1 &= \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 + L_1 \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + L_{12} e^{j\varepsilon} \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} \omega \mathbf{J} e^{j\varepsilon} \mathbf{i}_2 \\
\mathbf{u}_2 &= \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + L_2 \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} e^{-j\varepsilon} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + L_{12} \omega \mathbf{J} e^{-j\varepsilon} \mathbf{i}_1 \\
\omega &= \frac{d\varepsilon}{dt}
\end{aligned} \tag{6.14}$$

Отримане рівняння це система нелінійних диференціальних рівнянь 4-го порядку. У векторно-матричній формі будемо мати:

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_{12} e^{j\varepsilon} \\ L_{12} e^{-j\varepsilon} & L_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 - \mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} \mathbf{J} e^{j\varepsilon} \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 - \mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} \mathbf{J} e^{-j\varepsilon} \mathbf{i}_1 \end{pmatrix} \tag{6.15}$$

Виразимо вектор струмів:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{L}^{-1}(\varepsilon) \begin{pmatrix} -\mathbf{R}_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} \mathbf{J} e^{j\varepsilon} \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1 \\ -\mathbf{R}_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} \mathbf{J} e^{-j\varepsilon} \mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2 \end{pmatrix} \tag{6.16}$$

В отриманих диференціальних рівняннях прийняти умову відповідності сталому режиму для того, щоб отримати статичну електромеханічну характеристику. Доповнивши рівнянням моменту, рівняння електричної рівноваги будемо мати повну модель асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned}
\frac{d\varepsilon}{dt} &= \omega \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[\frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} - M_c \right] \\
\frac{d\mathbf{i}}{dt} &= \mathbf{L}^{-1}(\varepsilon) \left(\mathbf{u} - \mathbf{R} \mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \mathbf{i} \right).
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Тут вектор керуючих напруг формується пристроєм управління та є входом моделі. Це модель системи диференціальних рівнянь шостого порядку. Тут є 2 підсистеми, а саме: механічна та електромагнітна. Змінними тут є кутова швидкість, вектор струму та кутове положення. У механічній підсистемі

входом якої є генерований момент, а виходами - кутова швидкість (положення). У електромагнітної - входом якої є генерований момент, а виходами - кутова швидкість (положення). Ці підсистеми включені послідовно і мають внутрішню негативний зворотний зв'язок через $\mathbf{L}(\varepsilon)$ і протидії ЕРС. Це властивість називається електромеханічної зв'язком. Знайдемо похідну матриці індуктивності:

$$\frac{\partial \mathbf{L}(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} e^{J\varepsilon} \mathbf{J} \\ -L_{12} e^{-J\varepsilon} \mathbf{J} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

де $\mathbf{J}$ – косимметрична матриця і дорівнює:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Перейдемо до системи координат (a-b) та систему (d-q), які пов'язані статором та полем машини, яка обертається зі швидкістю $\omega_0 = \frac{d\varepsilon_0}{dt}$. Врахуємо, що вищевказані системи пов'язані:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0(t)} \cdot \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0(t)} \cdot \mathbf{x}_2 \end{aligned} \quad (6.20)$$

Будемо мати рівняння електричної рівноваги:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= R_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + \mathbf{J} \omega_0 \psi_1 \\ 0 &= R_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\psi_2}{dt} + \mathbf{J} (\omega_0 - \omega) \psi_1 \end{aligned} \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 \cdot \mathbf{i}_1 + L_m \cdot \mathbf{i}_2 \\ \psi_2 &= L_m \cdot \mathbf{i}_1 + L_2 \cdot \mathbf{i}_2 \end{aligned} \quad (6.22)$$

де $L_m = \frac{3}{2} \cdot L_{12}$ - індуктивність намагнічує контуру.

У рівняннях (6.22) друге дорівнює нулю, бо для асинхронного двигуна $\mathbf{u}_2 = 0$.

Врахувавши рівняння (6.7) та (6.22), момент для АД буде:

$$\begin{aligned} M &= L_{12} \cdot (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) = (\psi_{1d} i_{1q} + \psi_{1q} i_{1d}); \\ M &= \frac{L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12} \cdot L_{12}} (\psi_{1q} \psi_{2d} - \psi_{1d} \psi_{2q}). \end{aligned} \quad (6.23)$$

де $[\psi_{1d}, \psi_{1q}]^T, [\psi_{2d}, \psi_{2q}]^T$ - вектори потокозчеплення статора і ротора у системі координат (d-q), $[i_{1d}, i_{1q}]^T, [i_{2d}, i_{2q}]^T$ - вектори струмів статора і ротора у системі координат (d-q), при цьому, індекси 1, 2 вказують на змінні статора і ротора відповідно; індекси d, q і a, b вказують на осі системи координат, щодо якої розглядається відповідна змінна.

З диф.рівняння (6.21) виключимо $\mathbf{i}_2, \boldsymbol{\psi}_1$ та використаємо потокозчеплення з рівняння (6.22):

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_2 &= \frac{\boldsymbol{\psi}_2}{L_2} - \frac{L_m}{L_2} \mathbf{i}_1 \\ \boldsymbol{\psi}_1 &= \frac{L_m}{L_2} \boldsymbol{\psi}_2 + \sigma \mathbf{i}_1 \end{aligned} \quad (6.24)$$

$$\text{де } \sigma = \frac{L_1 \cdot L_2 - L_m^2}{L_2}$$

Підставимо (6.24) у (6.21) та виконаємо перетворення, будемо мати рівняння математичної моделі АД в проекціях на осі системи координат (d-q)

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} i_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \omega_0 i_{1q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d} \\
\frac{d}{dt} i_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2q} + \beta p_n \omega \psi_{2d} - \omega_0 i_{1d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q} \\
\frac{d}{dt} \psi_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q} \\
\frac{d}{dt} \psi_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} \\
M &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}) - M_c.
\end{aligned} \tag{6.25}$$

де $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$; $\beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}$; $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m$, p_n – число пар полюсів.

Математична модель в стаціонарній системі координат (a-b) має вигляд:

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \end{bmatrix} = -\alpha \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \end{bmatrix} - \mathbf{J} p_n \omega \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \end{bmatrix} + \alpha L_m \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} \\
&\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} = -\gamma \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} + \mathbf{J} \beta p_n \omega \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \end{bmatrix} + \alpha \beta \begin{bmatrix} \psi_{2a} \\ \psi_{2b} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma} \begin{bmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{6.26}$$

Це рівняння математичної моделі дозволяє нам побачити, як змінюються параметри двигуна у різних режимах. Цей опис математичний був створений на основі двофазного подання змінних, що дає змогу нам розглядати поле, як плоске. Але у більшості машин фаз 3 або навіть більше, тому потрібно встановлювати зв'язок між двофазними та багатофазними системами.

Перетворення змінних 3-х фазною машини до змінних 2-х фазної для статорних струмів мають вигляд

$$\begin{aligned}
i_{1a} &= i_{s1} \\
i_{1b} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{s2} - i_{s3})
\end{aligned} \tag{6.27}$$

Зворотне перетворення записується:

$$\begin{aligned}
i_{s1} &= i_{1a} \\
i_{s2} &= -\frac{1}{2}i_{1a} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1b} \\
i_{s2} &= -\frac{1}{2}i_{1a} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{1b}
\end{aligned} \tag{6.28}$$

Отже, можемо бачити, що наводячи зміни ротора до статора, а трифазні до двофазних, математичну модель електричної машини можна звести до двофазної узагальненої.

6.2 Синтез алгоритму векторного керування швидкістю та потоком

Як зазначено у формулі (6.1) – це стандартна математична модель АД в умовах симетричності. З формули позитивні константи, які задані електричними параметрами АД будуть:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}; \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_2}; \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m, \tag{6.29}$$

де R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори й індуктивності статора і ротора, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, J – повний момент інерції, одна пара полюсів прийнята без втрати спільності. Перейдемо до синхронної системи координат (d-q) у зв'язку з застосуванням векторних методів управління:

$$\begin{aligned}
\omega &= \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\
\dot{i}_d &= -\gamma i_d - \omega_0 i_q + \alpha\beta \psi_d + \beta\omega \psi_q + \frac{1}{\sigma} u_d \\
\dot{i}_q &= -\gamma i_q - \omega_0 i_d + \alpha\beta \psi_q - \beta\omega \psi_d + \frac{1}{\sigma} u_q \\
\dot{\psi}_d &= -\alpha \psi_d + (\omega_0 - \omega) \psi_q + \alpha L_m i_d \\
\dot{\psi}_q &= -\alpha \psi_q - (\omega_0 - \omega) \psi_d + \alpha L_m i_q \\
\dot{\omega} &= \omega_0, \quad \omega(0) = 0,
\end{aligned} \tag{6.30}$$

де $(i_d, i_q)^T, (u_d, u_q)^T, (\psi_d, \psi_q)^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора, потокозчеплення ротора в системі координат (d-q); ε_0 – кутове положення системи координат (d-q) відносно нерухомої системи координат статора (a-b).

Між собою змінні в різних системах (d-q) та (a-b) пов'язані перетворенням

$$\begin{aligned} X^{(d-q)} &= e^{-j\varepsilon_0} X^{(a-b)} \\ X^{(a-b)} &= e^{j\varepsilon_0} X^{(d-q)}, \quad e^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6.31)$$

де X – двомірний вектор напруг, струмів або потокозчеплення.

Саме завдання управління моментом та кутовою швидкістю двигуна полягає в регулюванні двох вихідних координат електричної машини: модуля вектора потокозчеплення ротора $|\psi| = (\psi_d^2 + \psi_q^2)^{\frac{1}{2}}$ и моменту M , заданих вектором $y_1 = (|\psi|, M)^T$, за допомогою двомірного вектора напруг статора $u = (u_d, u_q)^T$, використовуючи для цього вектор вимірюваних змінних $y = (\omega, i_d, i_q)^T$.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 6

Шостий розділ дипломного проекту присвячений розробці математичної моделі та системи векторного керування швидкістю та потоком асинхронного двигуна (АД). У цьому розділі детально розглянуто побудову математичної моделі, яка включає вектори струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат, а також синтез алгоритму векторного керування.

Математична модель асинхронного двигуна побудована на основі векторів струму статора та потокозчеплення ротора в стаціонарній системі координат (a-b). Враховано кутову швидкість, момент інерції, момент двигуна, момент навантаження, кут повороту валу двигуна, коефіцієнт в'язкого тертя, компоненти вектора потокозчеплення ротора та струму статора. Для зручності моделювання використано ідеалізовані машини, що спрощує опис процесів електромеханічного перетворення енергії. Модель враховує електромагнітні процеси в повітряному зазорі та вплив магнітних полів, що утворюються струмами уздовж осі машини. Введено припущення, що магнітний ланцюг машини не насичується, матриця індуктивностей є симетричною та позитивно визначеною, а індуктивності розсіювання не залежать від кутового положення ротора.

Побудовано структурну схему електричної машини на основі узагальненої двофазної моделі, що дозволяє спростити математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії. Використання узагальненої електричної машини дозволяє врахувати синусоїдальний розподіл магнітних потоків та МДС вздовж кола машини. Запропоновано перетворення змінних трифазної машини до двофазних змінних для статорних струмів, що дозволяє звести математичну модель електричної машини до двофазної узагальненої моделі, спрощуючи аналіз та управління процесами.

Розроблено алгоритм векторного керування, який дозволяє регулювати два вихідних параметри електричної машини: модуль вектора потокозчеплення ротора та момент. Для цього використовується двовірний вектор напруг статора, що дозволяє здійснювати керування через вимірювані змінні. Перехід до синхронної системи координат (d-q) забезпечує зручність використання векторних методів управління, що дозволяє регулювати момент та кутову швидкість двигуна з високою точністю.

Таким чином, розробка математичної моделі та системи векторного керування швидкістю та потоком асинхронного двигуна є важливим етапом у створенні ефективної системи керування для вантажної ліфтової підйомної установки в умовах Київського метрополітену. Використання сучасних методів моделювання та векторного керування забезпечує високу точність, надійність та енергоефективність роботи ЛПУ, що сприяє підвищенню оперативності та безпеки вантажних перевезень, зниженню експлуатаційних витрат та впровадженню сучасних технологій у транспортну інфраструктуру.

7. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ДИНАМІЧНИХ І СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАНТАЖНОЇ ЛПУ

7.1 Опис схеми непрямого векторного керування

У цьому проведемо деякі досліди для двигуна так подивимось, як реагує двигун на різні перехідні процеси. Будемо використовувати непряме векторне керування, адже завдяки йому ми можемо максимально точно керувати швидкістю та моментом двигуна, а також будем мати широкий діапазон регулювання швидкістю. У дослідях будемо використовувати програмне середовище MATLAB. Розпочнемо з опису самої схеми керування у середовищі та по розпишемо з кожним елемент за що відповідає.

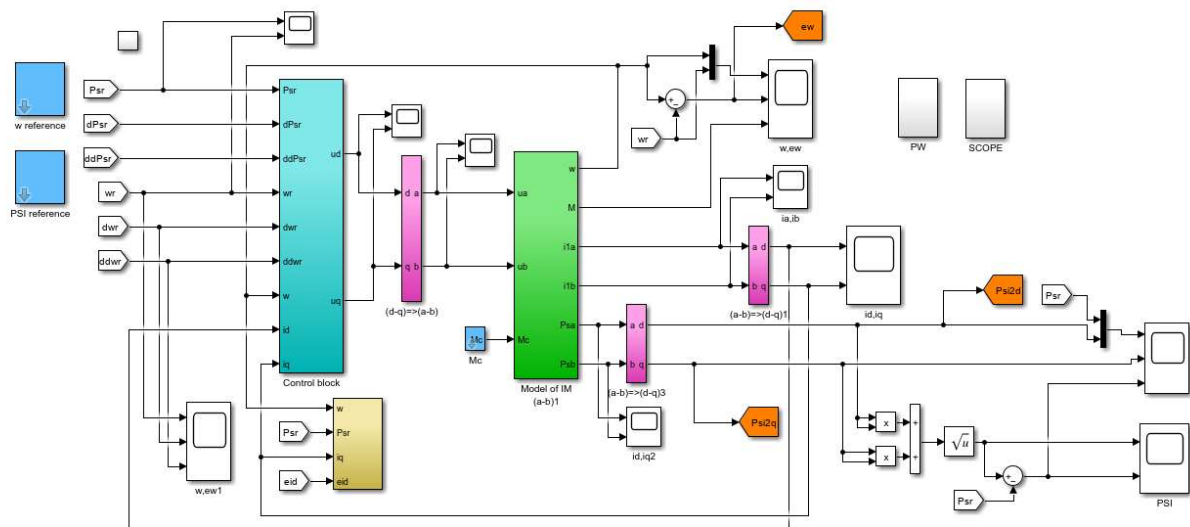


Рисунок 7.1. Схема блоку IM indirect control

Опишемо кожний елемент та для чого він потрібний. Розпочнемо з моделі самого двигуна це блок “Model of IM”. Блок складається:

1. **u_a, u_b (вхідні сигнали)** – вхідні напруги фаз А і В, які подаються на двигун.
2. **Flux Subsystem (підсистема потокозчеплення)** – моделює потокозчеплення асинхронного двигуна на основі вхідних напруг і струмів. Включає в себе моделі індуктивностей і напруг для кожної фази. Складається з w – поточна швидкість двигуна, **PSI_{2a}, PSI_{2b}** – потокозчеплення фаз А і В, **i_{1a}, i_{1b}** – струми фаз А і В.
3. **i_d subsystem, i_d subsystem1 (підсистеми струмів d-контурів)** – моделюють струми в d-контурі, використовуючи вхідні сигнали напруг і потокозчеплення, а також забезпечують точний контроль моменту двигуна. Складаються з **PSI_{2a}, PSI_{2b}** – потокозчеплення фаз А і В, w – поточна швидкість двигуна, **u_a, u_b** – вхідні напруги фаз А і В, **i_{1a}, i_{1b}** – струми фаз А і В.
4. **Mechanical subsystem (механічна підсистема)** – моделює механічну частину двигуна, включаючи момент навантаження і швидкість обертання та враховує інерцію ротора і зовнішні навантаження, які впливають на роботу двигуна. Складається **PSI_{2a}, PSI_{2b}** – потокозчеплення фаз А і В, **i_{1a}, i_{1b}** – струми фаз А і В, w – поточна швидкість двигуна, **M** - момент навантаження (M_c).
5. **i_a, i_b (Вихідні сигнали)** - вихідні струми фаз А і В, які використовуються для контролю двигуна.
6. **P_{sa}, P_{sb} (Вихідні сигнали потокозчеплення)** - вихідні сигнали потокозчеплення фаз А і В, які використовуються для контролю двигуна.
7. **w, M (Вихідні сигнали швидкості та моменту)** - вихідні сигнали поточної швидкості та моменту двигуна.

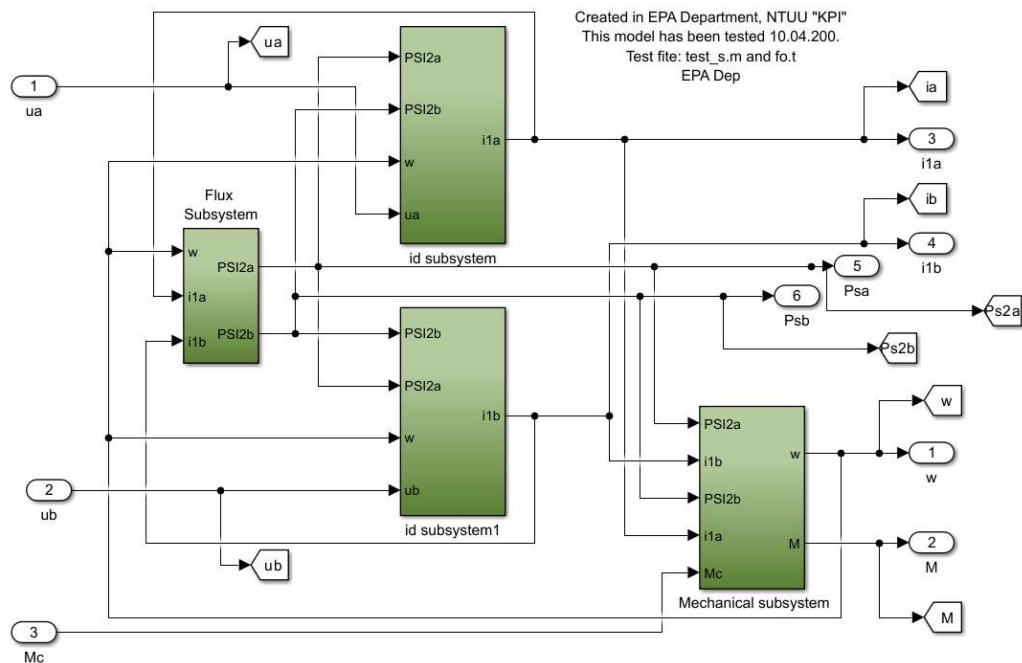


Рисунок 7.2. Блок “Model of IM (a-b)”

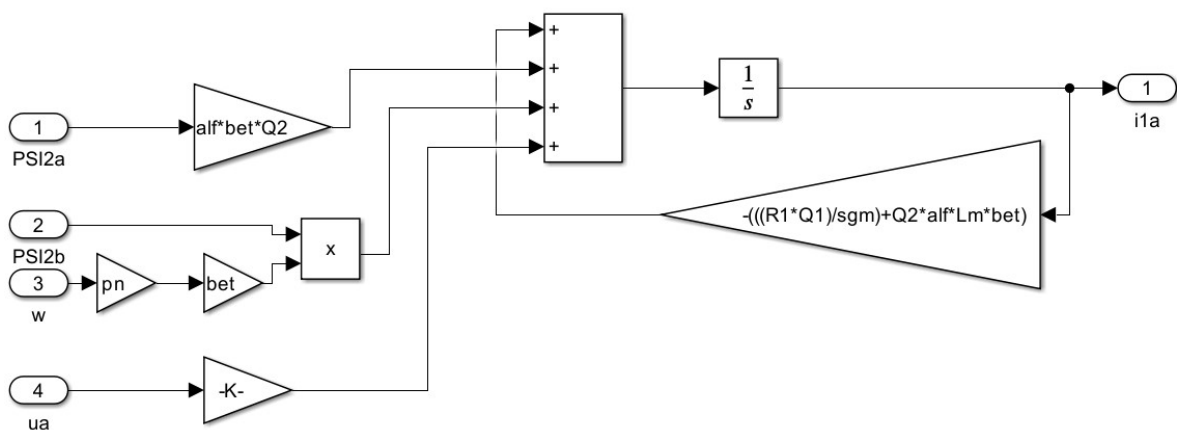


Рисунок 7.3. Блок “ i_d Subsystem”

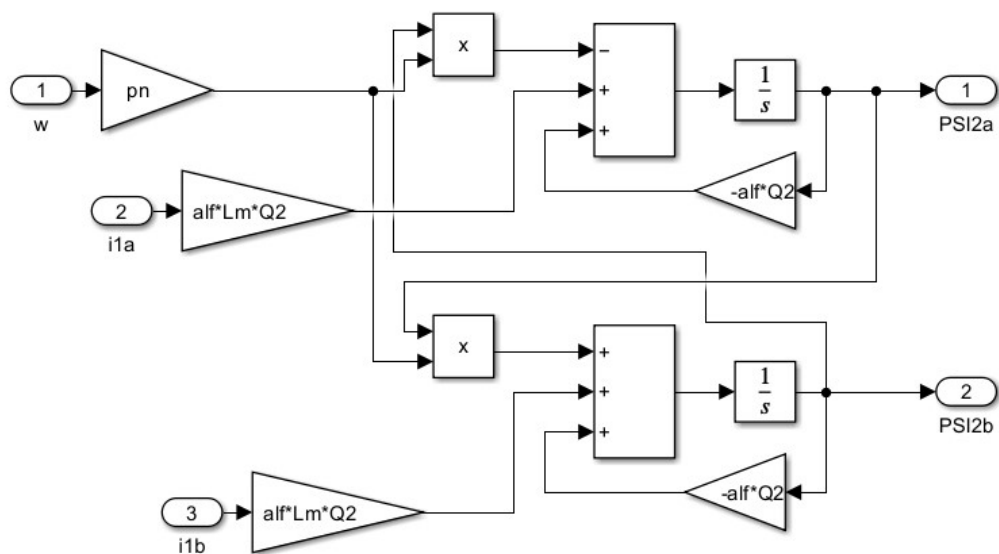


Рисунок 7.4. Блок “Flux Subsystem”

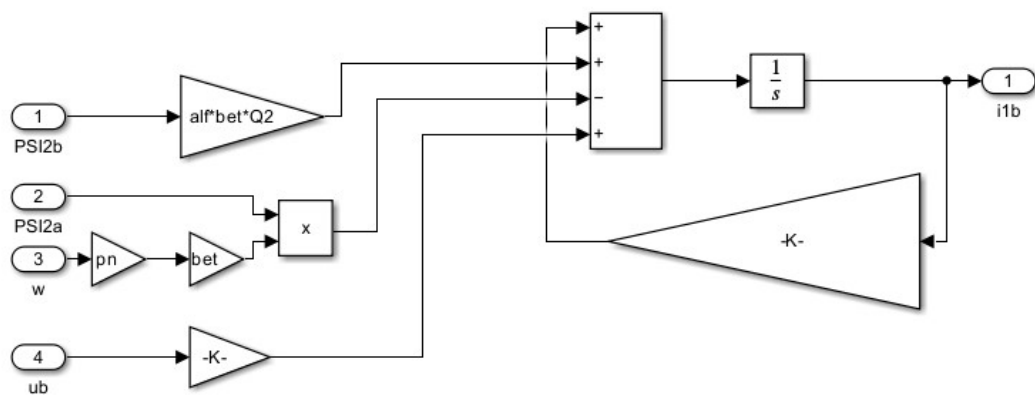


Рисунок 7.5. Блок “ i_d Subsystem1”

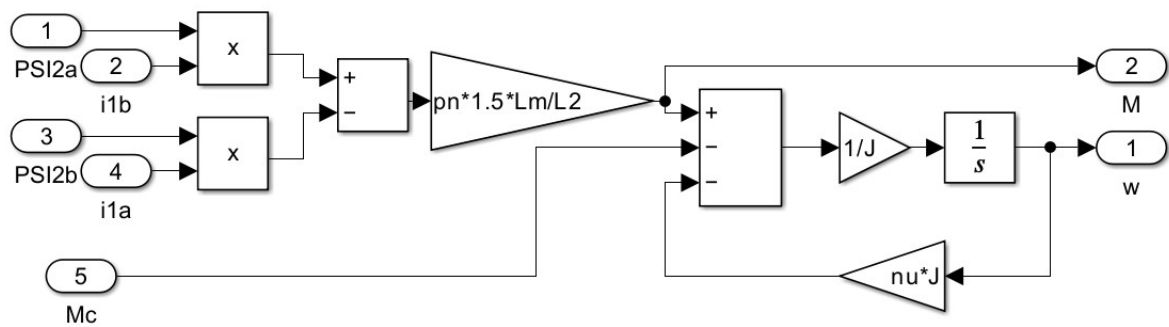


Рисунок 7.6. Блок “Mechanical Subsystem”

Перейдемо до перетворювача частоти “control block”. Він складається:

1. **Psr, dPsr, ddPsr** – потокозчеплення ротора та його похідні. Використовуються для обчислення керуючих сигналів у Flux Controller.
2. **w, wr, dwr, ddwr** – поточна швидкість ротора та її похідні. Використовуються для обчислення керуючих сигналів у Speed Controller.
3. **Flux Controller** – контролює потокозчеплення ротора. Має **вхідні сигнали**: **P_{sr}** – потокозчеплення ротора, **dP_{sr}** – перша похідна потокозчеплення, **ddP_{sr}** – друга похідна потокозчеплення. **Вихідні сигнали**: **i_{dr}** – струм у d-контурі ротора.
4. **Speed Controller** – контролює швидкість обертання ротора. Має **вхідні сигнали**: **w** – поточна швидкість, **W_r** – задаване значення швидкості, **D_{wr}** – перша похідна швидкості, **dd_{wr}** – друга похідна швидкості, **P_{sr}** – потокозчеплення ротора. **Вихідні сигнали**: **i_{qr}** – струм у q-контурі ротора.
5. **d-current controller** – контролює струми у d-контурі. Має вхідні сигнали: **i_d** – поточний струм у d-контурі, **i_{dr}** – задаване значення струму у d-контурі, **P_s** – потокозчеплення, **i_q** – поточний струм у q-контурі, **w₀** – задаване значення швидкості. Вихідні сигнали: **ud** – керуюча напруга для d-контролера.
6. **q-current controller** – контролює струми у q-контурі. Має **вхідні сигнали**: **i_q** – поточний струм у q-контурі, **I_{qr}** – задаване значення струму у q-

контурі, P_s – потокозчеплення, i_d – поточний струм у d-контурі, w_0 – задане значення швидкості. **Вихідні сигнали:** u_q – керуюча напруга для q-контролера.

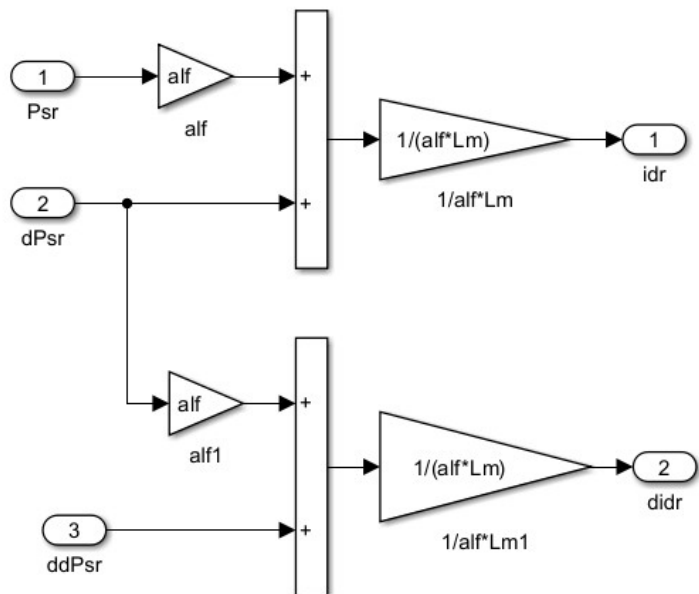


Рисунок 7.7. Блок “Flux Controller”

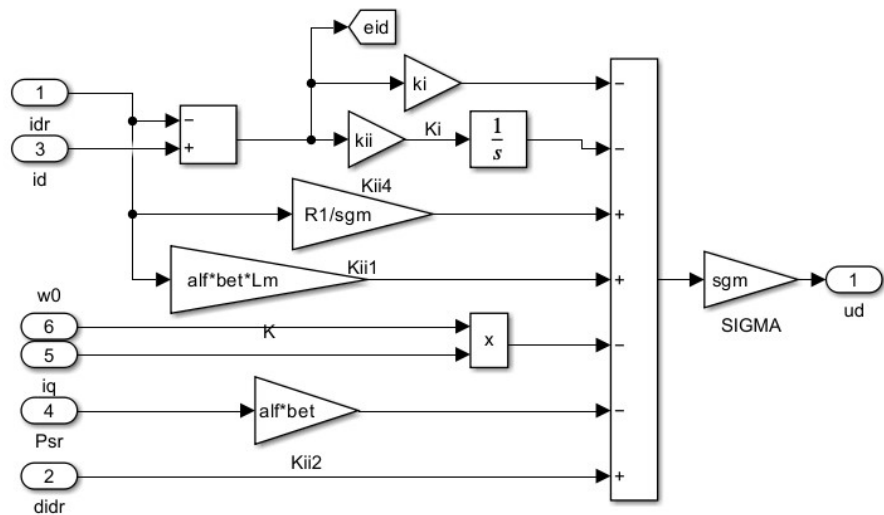


Рисунок 7.8. Блок “d-current Controller”

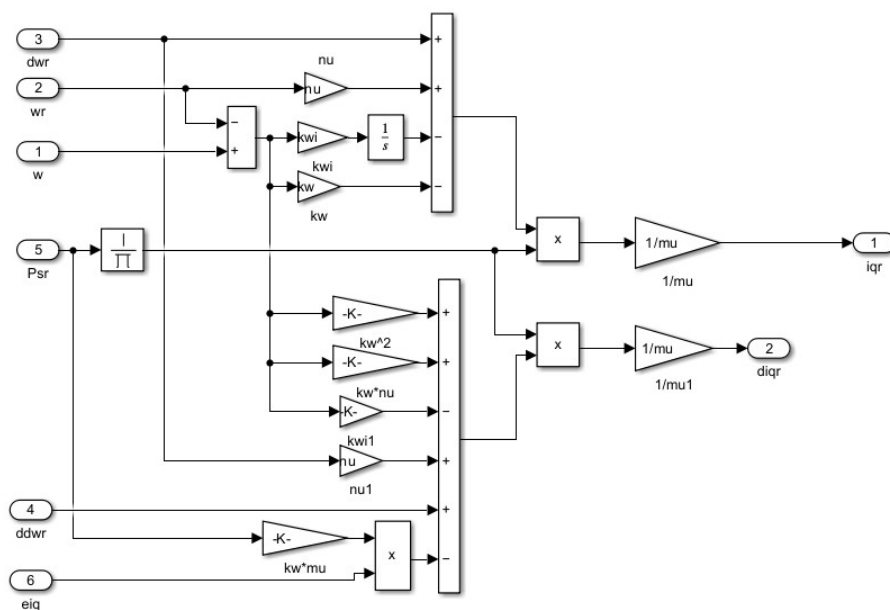


Рисунок 7.9. Блок “Speed Controller”

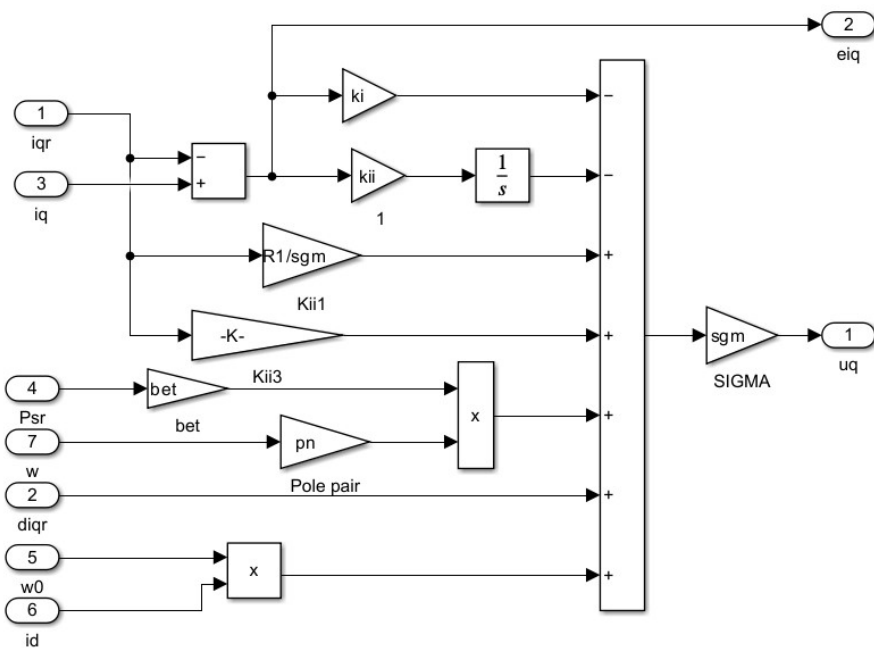


Рисунок 7.10. Блок “q-current Controller”

Далі йде блок “(d-q) => (a-b)” – перетворювач координат з d-q у a-b. Потрібен він для перетворення сигналу для використання в різних блоках схеми.

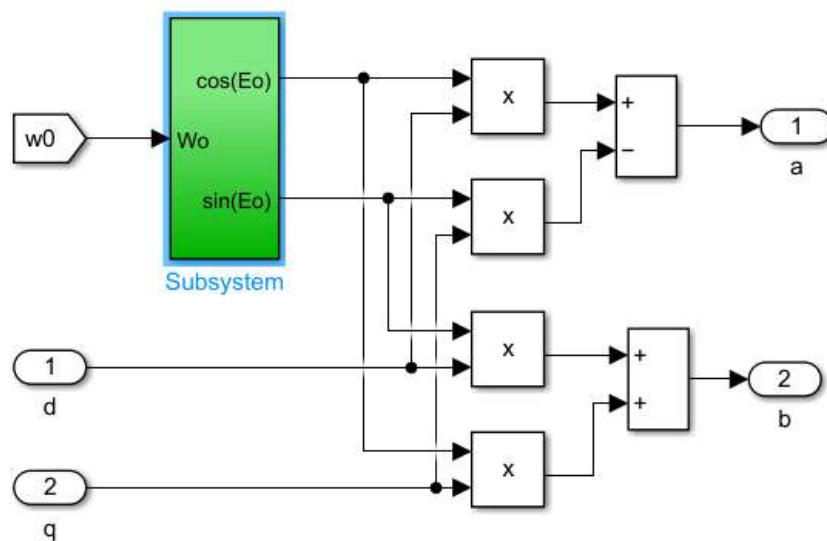


Рисунок 7.11. Блок “(d-q) => (a-b)”

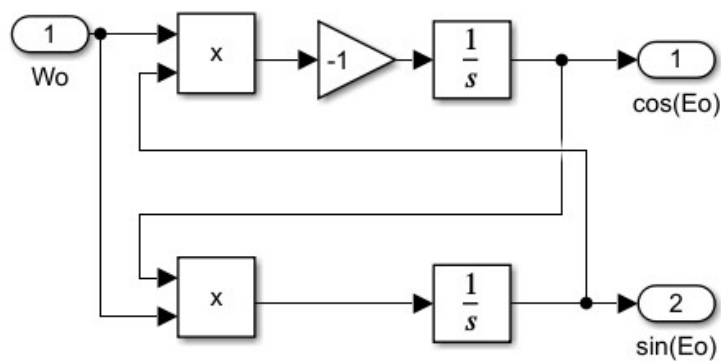


Рисунок 7.12. Блок “Subsystem”

Далі йде блок “(a-b) => (d-q)” – перетворювач координат з a-b у d-q. Також потрібен він для перетворення сигналу для використання в різних блоках схеми. Будову має таку саму, як і блок “(d-q) => (a-b)”.

w reference – задаване значення швидкості обертання двигуна. Встановлює бажану швидкість обертання ротора.

PSI reference – задаване значения потокозчепления. Встановлює бажане значення потокозчеплення для контролю моменту двигуна.

Розглянувши елементи системи, можемо перейти до дослідів.

7.2 Перехідні процеси при сталі швидкості та номінальному моменті

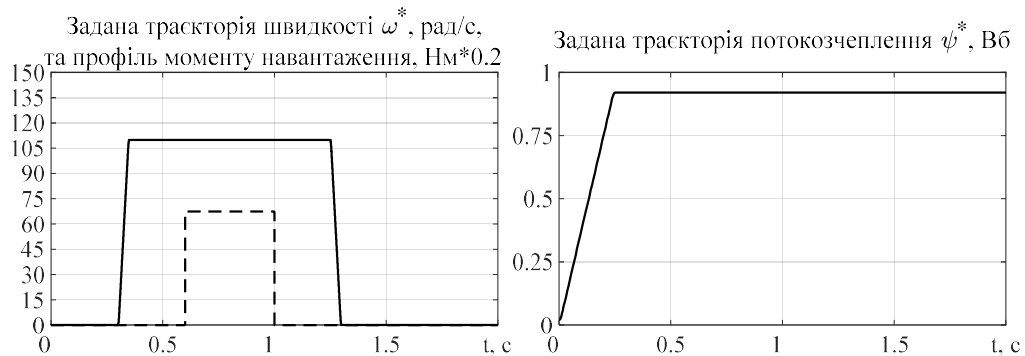


Рисунок 7.13. Графіки пуску та гальмування АД для першого дослідів

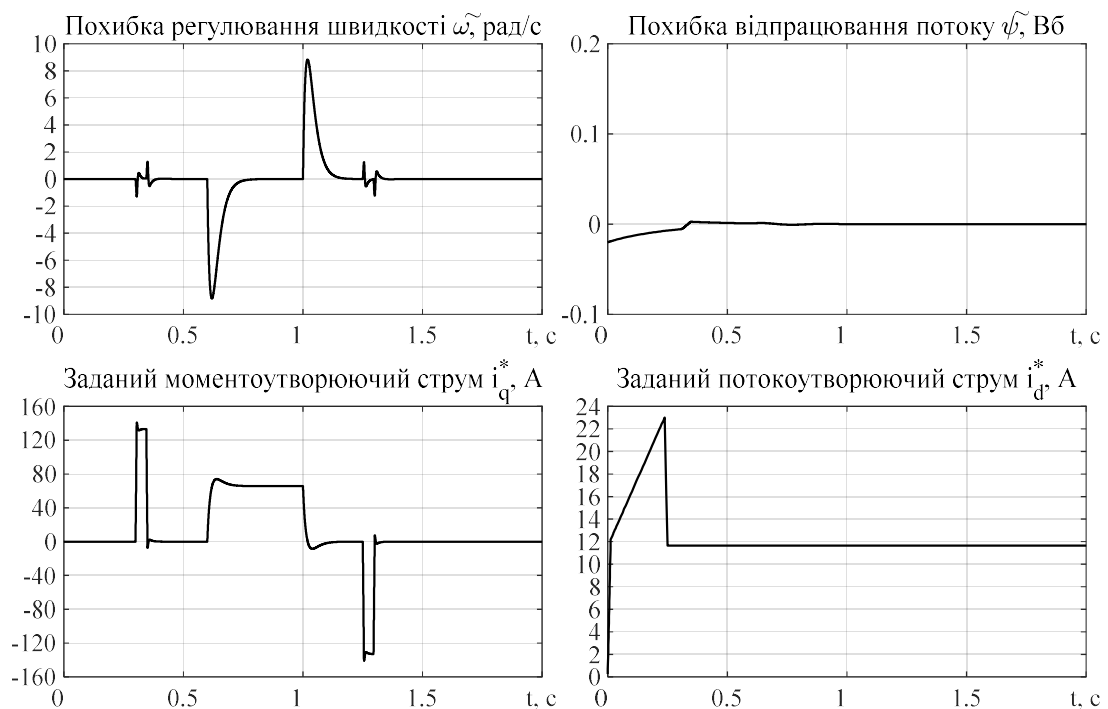


Рисунок 7.14. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментотворюючого струму для першого дослідів

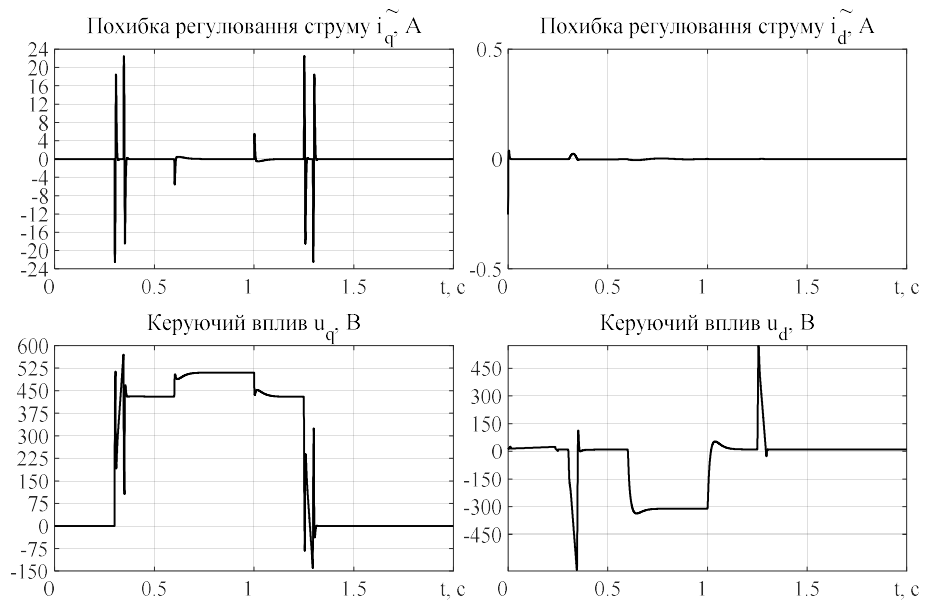


Рисунок 7.15. Графіки похибок регулювання струмів та керуючий вплив напруг для першого дослідів

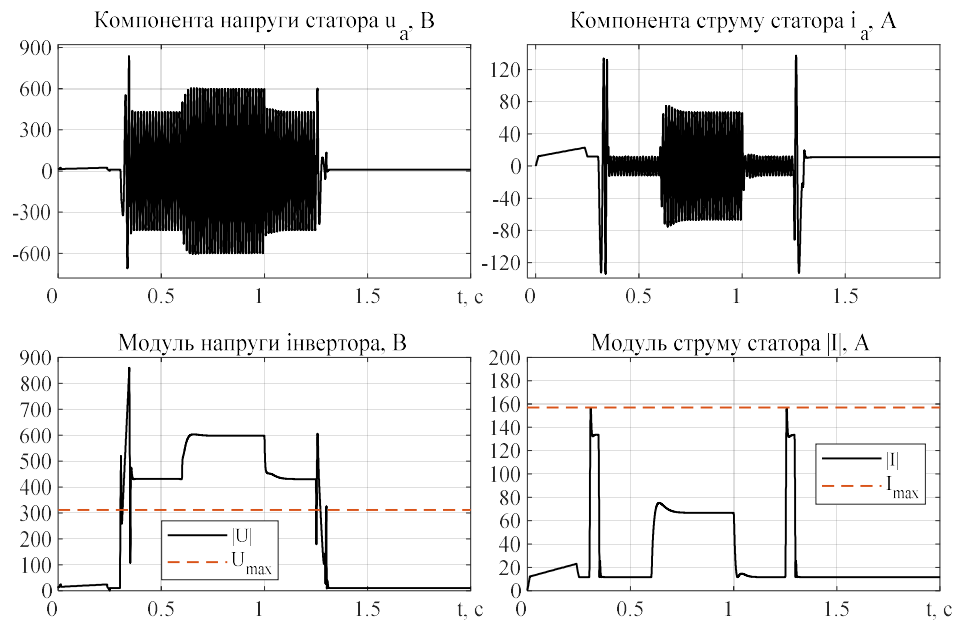


Рисунок 7.16. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментотворюючого струму для першого дослідів

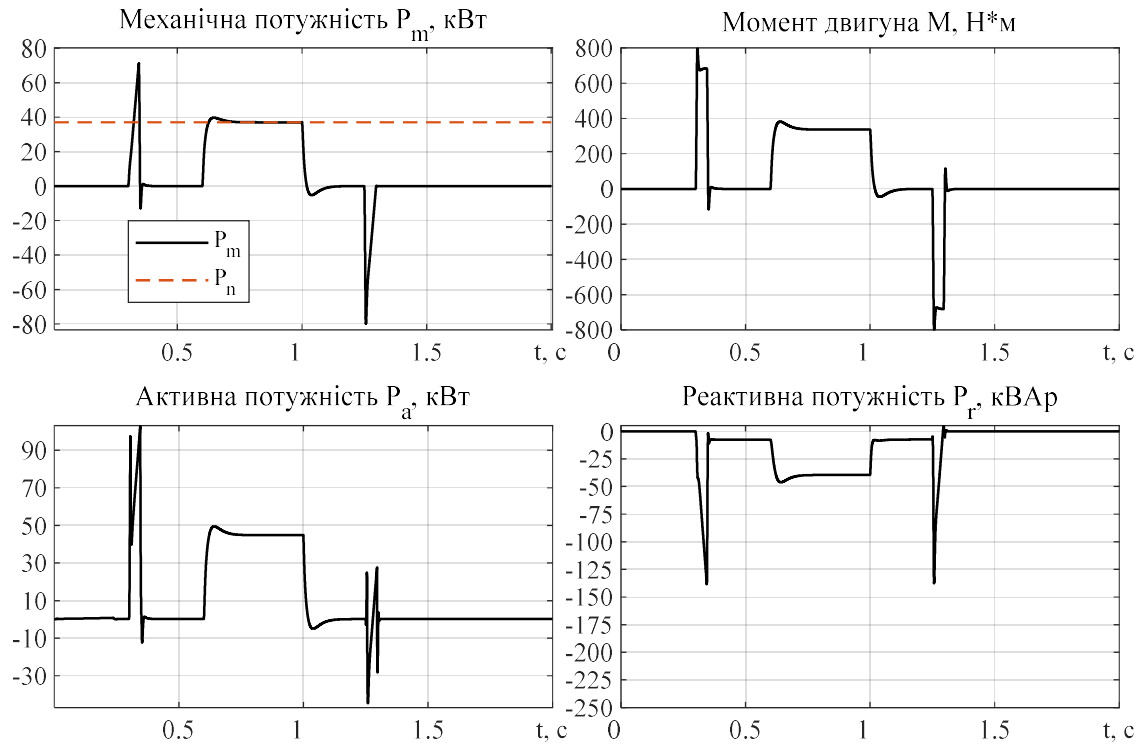


Рисунок 7.17. Графіки потужностей та моменту для першого дослідження

Аналіз графіків роботи асинхронного двигуна під час пуску, сталого режиму та гальмування демонструє важливість точного регулювання для забезпечення ефективної роботи двигуна на всіх етапах.

Пуск

Під час пуску двигуна спостерігаються значні коливання швидкості, струмів, напруги та потужності:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Початкове збільшення швидкості від 0 до 100 рад/с протягом 0.5 секунд вказує на необхідність плавного розгону, щоб уникнути великих механічних навантажень.
- **Профіль моменту навантаження (Нм*0.2):** Початковий профіль моменту навантаження рівний нулю, що вказує на відсутність зовнішнього навантаження під час розгону.

- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Високі коливання похибки в перші 0.2 секунд (до ± 10 рад/с) вказують на перерегулювання регулятора швидкості під час пуску.
- **Заданий моментотворчий струм (i^*_x , А):** Коливання струму до ± 150 А вказують на великі струмові навантаження, що є нормальним для асинхронних двигунів.
- **Заданий потокотворчий струм (i^*_y , А):** Різке зростання струму до 20 А за короткий час свідчить про швидке встановлення магнітного поля.
- **Керуючий вплив напруги (u_x , В) та (u_y , В):** Коливання напруги від -500 В до +600 В вказують на активне управління інвертором для досягнення необхідного струму в фазах статора.
- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Зміна потужності від -80 кВт до 60 кВт вказує на великі механічні навантаження.
- **Активна потужність (P_a , кВт):** Зміна потужності від -80 до 80 кВт відповідає змінам навантаження.
- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Зміна потужності від -25 до 25 кВАр вказує на роботу двигуна під різними реактивними навантаженнями.

Для зменшення цих коливань необхідно налаштувати регулятори, що забезпечить плавний пуск і мінімізує механічні та електричні навантаження.

Сталий режим

У сталому режимі більшість параметрів стабілізуються:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Стабільна швидкість протягом 1 секунди показує період сталого режиму роботи. У цей час двигун працює під постійним навантаженням.
- **Профіль моменту навантаження ($N_m \cdot 0.2$):** Навантаження залишається сталим до 1.5 секунд, що вказує на період роботи під постійним навантаженням.

- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Після 0.2 секунд похибка зменшується та стабілізується навколо нуля, що свідчить про точність регуляції швидкості.
- **Заданий моментотворчий струм (i^*_x , А):** Після розгону струм стабілізується, що відповідає сталому режиму роботи.
- **Заданий потекотворчий струм (i^*_y , А):** Струм залишається стабільним протягом періоду роботи.
- **Керуючий вплив напруги (u_x , В) та (u_y , В):** Напруга стабілізується після пуску, що свідчить про налаштування системи управління.
- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Потужність стабілізується.
- **Активна потужність (P_a , кВт):** Потужність стабілізується.
- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Потужність стабілізується.

Стабільний режим роботи двигуна забезпечується точним регулюванням швидкості, потокозчеплення, струмів і напруги. Це дозволяє підтримувати стабільну швидкість та потужність двигуна, постійне магнітне поле та стабільну роботу струмів і напруги статора.

Гальмування

Під час гальмування спостерігаються різкі зміни параметрів:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Різке зниження швидкості до нуля вказує на процес гальмування. Це може бути реалізовано за допомогою різних методів, таких як рекуперативне гальмування, механічне гальмування тощо.
- **Профіль моменту навантаження ($N_m \cdot 0.2$):** Після 1.5 секунд навантаження знову знижується до нуля, що співпадає з періодом гальмування.
- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Під час гальмування спостерігаються незначні коливання похибки, що вказує на ефективну роботу регулятора.

- **Заданий моментотворчий струм (i^*_x , A):** Під час гальмування спостерігаються коливання струму, що вказує на реакцію системи управління на зниження швидкості.
- **Заданий потокотворчий струм (i^*_γ , A):** Під час гальмування струм знижується до нуля, що відповідає зменшенню потокозчеплення.
- **Керуючий вплив напруги (u_x , V) та (u_γ , V):** Напруга стабілізується після пуску, що свідчить про налаштування системи управління.
- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Потужність стабілізується.
- **Активна потужність (P_a , кВт):** Потужність стабілізується.
- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Потужність стабілізується.

Для забезпечення безпечного зупину двигуна необхідно точно налаштувати регулятори, щоб уникнути перевантажень і забезпечити плавне зниження швидкості.

Отже, пускові процеси графіків показують значні коливання швидкості, струмів, напруги та потужності, що вказує на важливість налаштування регуляторів для забезпечення плавного пуску та мінімізації механічних і електричних навантажень. Після пуску більшість параметрів стабілізуються, що свідчить про ефективну роботу систем управління в сталому режимі. Різкі зміни параметрів під час гальмування вказують на динамічні процеси, які потребують точного налаштування регуляторів для забезпечення безпечного зупину двигуна. Для забезпечення ефективної роботи асинхронного двигуна на всіх етапах роботи необхідно вдосконалювати алгоритми регулювання швидкості, потокозчеплення, струмів і напруги. Це дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність та продовжити термін експлуатації двигуна.

7.3 Перехідні процеси при сталі швидкості та моменті $0.8 \cdot M_n$

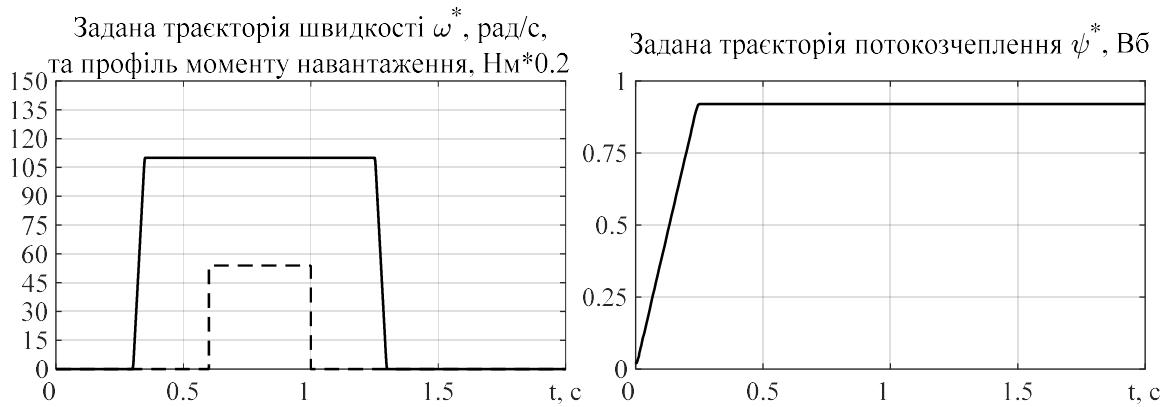


Рисунок 7.18. Графіки пуску та гальмування АД для другого досліду

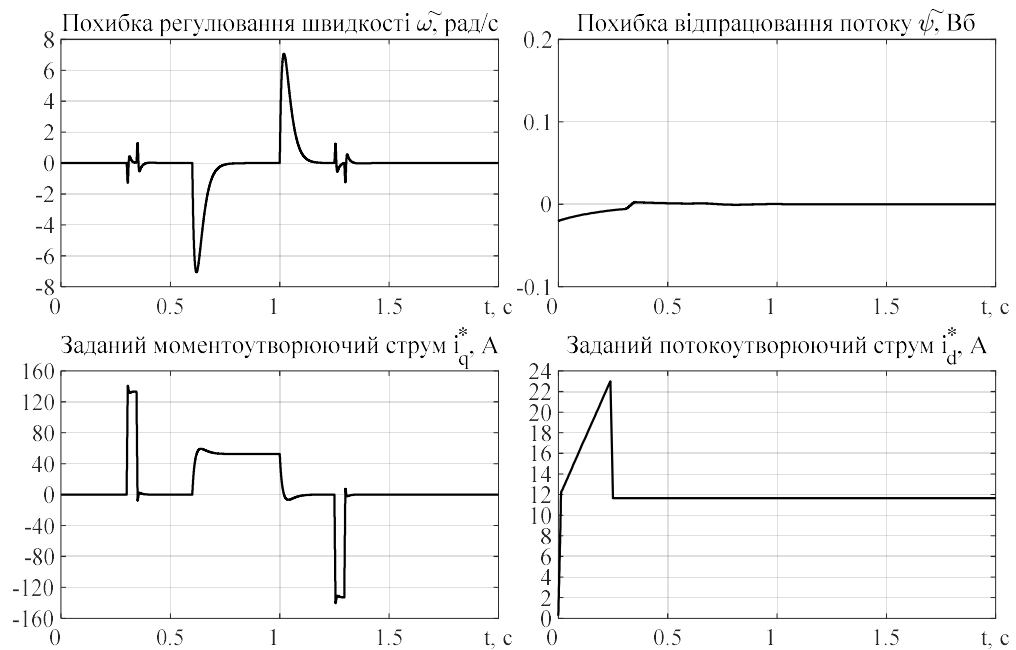


Рисунок 7.19. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментоутворюючого струму для другого досліду

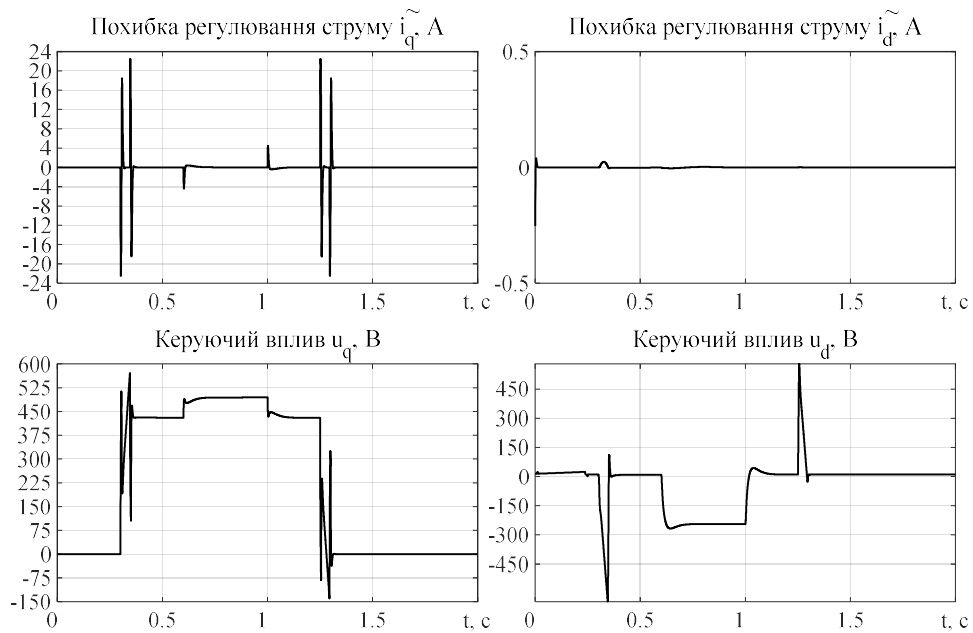


Рисунок 7.20. Графіки похибок регулювання струмів та керуючий вплив напруг для другого досліді

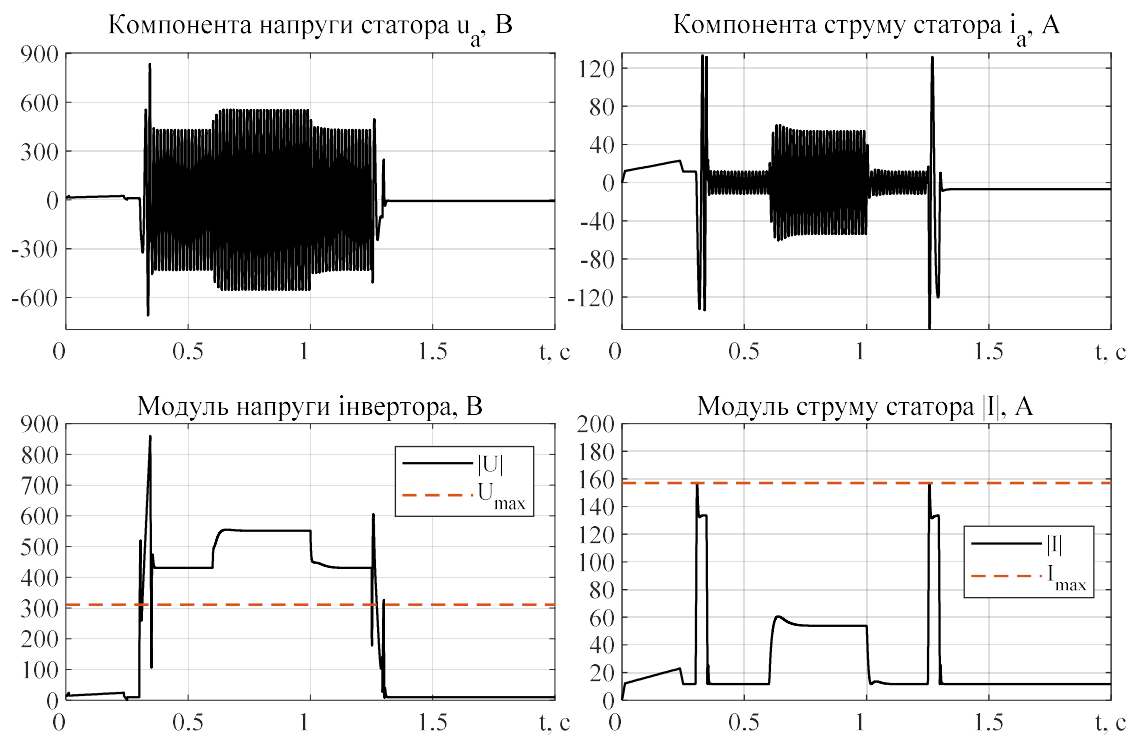


Рисунок 7.21. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментотворюючого струму для другого досліді

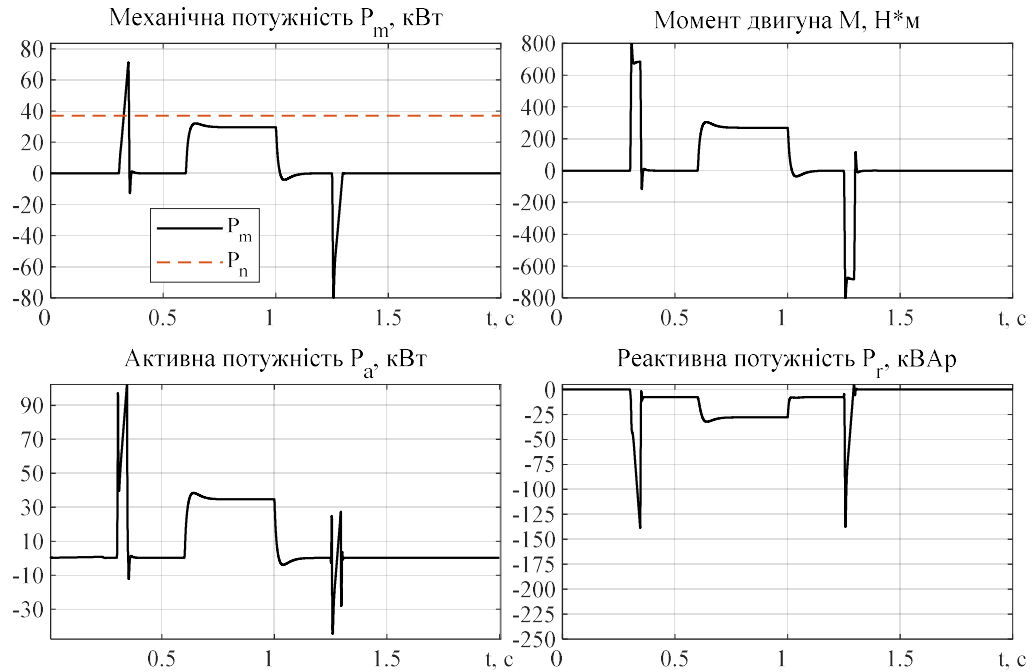


Рисунок 7.22. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментотворюючого струму для другого дослідю

Порівняння з попередніми графіками:

1. **Пуск:** У обох дослідженнях під час пуску спостерігаються значні коливання швидкості, струмів, напруги та потужності. Це свідчить про інтенсивні динамічні процеси та потребу в налаштуванні регуляторів для забезпечення плавного розгону.
2. **Сталий режим:** В обох випадках, після пуску, параметри стабілізуються, що вказує на ефективну роботу систем управління. Стабільність швидкості, моменту, напруги та струмів є ключовою для надійної роботи двигуна.
3. **Гальмування:** Подібні динамічні процеси спостерігаються під час гальмування. Різкі зміни параметрів потребують точного налаштування регуляторів для забезпечення безпечного зупину двигуна.

Аналіз графіків роботи асинхронного двигуна під час пуску, сталого режиму та гальмування демонструє важливість точного регулювання для забезпечення ефективної роботи двигуна на всіх етапах.

Пускові процеси

Під час пуску двигуна спостерігаються значні коливання швидкості, струмів, напруги та потужності:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Початкове збільшення швидкості від 0 до 100 рад/с протягом 0.5 секунд вказує на необхідність плавного розгону, щоб уникнути великих механічних навантажень. У цей період системи управління повинні забезпечити ефективне нарощування швидкості, контролюючи при цьому інерційні ефекти.

- **Профіль моменту навантаження ($N_m \cdot 0.2$):** Початковий профіль моменту навантаження рівний нулю, що вказує на відсутність зовнішнього навантаження під час розгону. З моменту 0.5 секунд навантаження збільшується до 75 Нм і залишається сталим до 1.5 секунд, що вказує на період роботи під постійним навантаженням.

- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Високі коливання похибки в перші 0.2 секунд (до ± 10 рад/с) вказують на перерегулювання регулятора швидкості під час пуску. Це може бути зумовлено інерційними властивостями двигуна та регулятора, що потребує вдосконалення алгоритмів управління.

- **Заданий моментотворчий струм (i^*_x , А):** Коливання струму до ± 150 А вказують на великі струмові навантаження під час пуску двигуна, що є нормальним для асинхронних двигунів. Ці струмові піки виникають через необхідність швидкого нарощування моменту.

- **Заданий потекотворчий струм (i^*_γ , А):** Різке зростання струму до 20 А за короткий час свідчить про швидке встановлення магнітного поля, що є необхідним для стабільної роботи двигуна.

- **Керуючий вплив напруги (u_x , В) та (u_y , В):** Коливання напруги від -500 В до +600 В вказують на активне управління інвертором для досягнення необхідного струму в фазах статора. Це свідчить про інтенсивну роботу інвертора під час пуску.

- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Зміна потужності від -80 кВт до 60 кВт вказує на великі механічні навантаження, що виникають під час пуску. Це потребує налаштування алгоритмів для зниження перерегулювання потужності.

- **Активна потужність (P_a , кВт):** Коливання активної потужності під час пуску свідчать про адаптацію системи до змінного навантаження. Зміна потужності від -80 до 80 кВт відповідає змінам навантаження, що свідчить про роботу двигуна в умовах високої динаміки.

- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Коливання реактивної потужності під час пуску вказують на потребу в точному регулюванні для мінімізації втрат.

Для зменшення цих коливань необхідно налаштувати регулятори, що забезпечить плавний пуск і мінімізує механічні та електричні навантаження. Це дозволить знизити енергетичні втрати і підвищити надійність роботи двигуна.

Сталий режим

У сталому режимі більшість параметрів стабілізуються:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Стабільна швидкість протягом 1 секунди показує період сталого режиму роботи. У цей час двигун працює під постійним навантаженням, що вказує на ефективне регулювання швидкості.

- **Профіль моменту навантаження ($N_m \cdot 0.2$):** Навантаження залишається сталим до 1.5 секунд, що вказує на період роботи під постійним навантаженням. Це свідчить про стабільність режиму роботи двигуна.

- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Після 0.2 секунд похибка зменшується та стабілізується навколо нуля, що свідчить про точність

регуляції швидкості. Це важливо для забезпечення стабільної роботи в сталому режимі.

- **Заданий моментотворчий струм (i^*_x , A):** Після розгону струм стабілізується, що відповідає сталому режиму роботи. Це вказує на ефективну роботу регулятора струму.
- **Заданий потекотворчий струм (i^*_y , A):** Струм залишається стабільним протягом періоду роботи, що забезпечує постійне магнітне поле.
- **Керуючий вплив напруги (u_x , V) та (u_y , V):** Напруга стабілізується після пуску, що свідчить про налаштування системи управління.
- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Потужність стабілізується, що свідчить про ефективну роботу двигуна під постійним навантаженням.
- **Активна потужність (P_a , кВт):** Потужність стабілізується, що забезпечує постійну роботу двигуна в сталому режимі.
- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Потужність стабілізується, що свідчить про зменшення втрат енергії.

Стабільний режим роботи двигуна забезпечується точним регулюванням швидкості, потокозчеплення, струмів і напруги. Це дозволяє підтримувати стабільну швидкість та потужність двигуна, постійне магнітне поле та стабільну роботу струмів і напруги статора.

Гальмування

Під час гальмування спостерігаються різкі зміни параметрів:

- **Швидкість (ω , рад/с):** Різде зниження швидкості до нуля вказує на процес гальмування. Це може бути реалізовано за допомогою різних методів, таких як рекуперативне гальмування, механічне гальмування тощо.
- **Профіль моменту навантаження ($N_m \cdot 0.2$):** Після 1.5 секунд навантаження знову знижується до нуля, що співпадає з періодом гальмування. Це вказує на необхідність точного регулювання для безпечного зниження швидкості.

- **Похибка регулювання швидкості (ω , рад/с):** Під час гальмування спостерігаються незначні коливання похибки, що вказує на ефективну роботу регулятора. Це забезпечує плавне зупинення двигуна.
- **Заданий моментотворчий струм (i_x^* , А):** Під час гальмування спостерігаються коливання струму, що вказує на реакцію системи управління на зниження швидкості. Це важливо для контролю гальмівного процесу.
- **Заданий потокотворчий струм (i_γ^* , А):** Під час гальмування струм знижується до нуля, що відповідає зменшенню потокозчеплення. Це забезпечує ефективне зупинення двигуна.
- **Керуючий вплив напруги (u_x , В) та (u_γ , В):** Коливання напруги під час гальмування вказують на активну роботу інвертора для контролю процесу гальмування.
- **Механічна потужність (P_m , кВт):** Різкі зміни потужності під час гальмування вказують на динамічні процеси, що потребують точного регулювання.
- **Активна потужність (P_a , кВт):** Коливання активної потужності під час гальмування свідчать про зміну навантаження.
- **Реактивна потужність (P_r , кВАр):** Коливання реактивної потужності під час гальмування вказують на потребу в точному регулюванні для мінімізації втрат.

Для забезпечення безпечного зупину двигуна необхідно точно налаштувати регулятори, щоб уникнути перевантажень і забезпечити плавне зниження швидкості. Це дозволить зменшити знос компонентів і підвищити надійність системи.

Отже, графіки обох досліджень демонструють важливість точного налаштування систем управління асинхронним двигуном. Пускові процеси характеризуються значними коливаннями параметрів, що вимагає оптимізації регуляторів для зменшення механічних та електричних навантажень.

Стабільний режим роботи двигуна досягається завдяки точному регулюванню швидкості, потокозчеплення, струмів і напруги, що забезпечує надійність та ефективність роботи. Гальмування супроводжується динамічними процесами, які потребують точного налаштування для безпечного зупину двигуна.

Для забезпечення оптимальної роботи асинхронного двигуна на всіх етапах необхідно постійно вдосконалювати алгоритми регулювання, що дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність та продовжити термін експлуатації двигуна. Крім того, важливо враховувати динамічні властивості системи та адаптувати регулятори до зміни умов роботи, що забезпечить стабільну та безпечну експлуатацію двигуна в різних режимах.

7.4 Перехідні процеси при сталій швидкості та номінальному моменті зі застосуванням трьох похідних

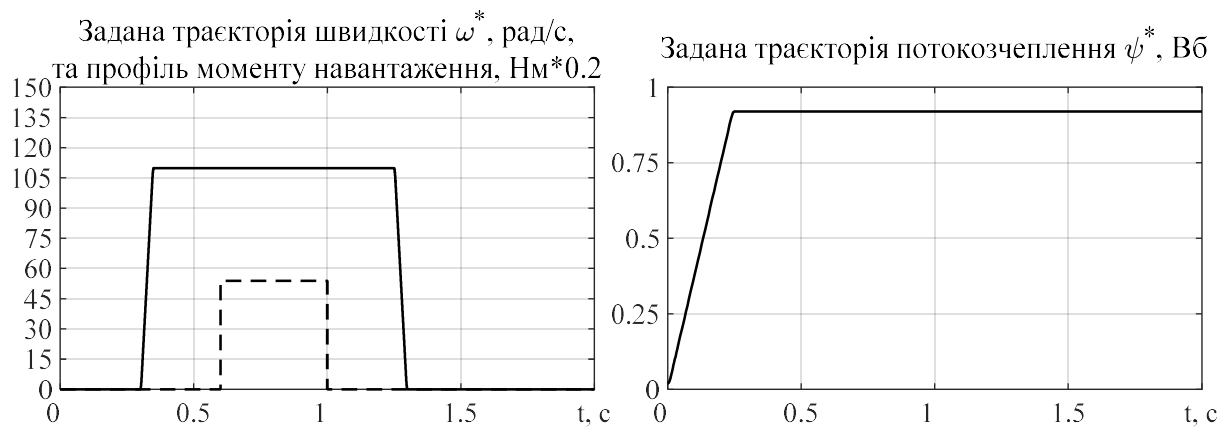


Рисунок 7.26. Графіки пуску та гальмування АД для третього дослід

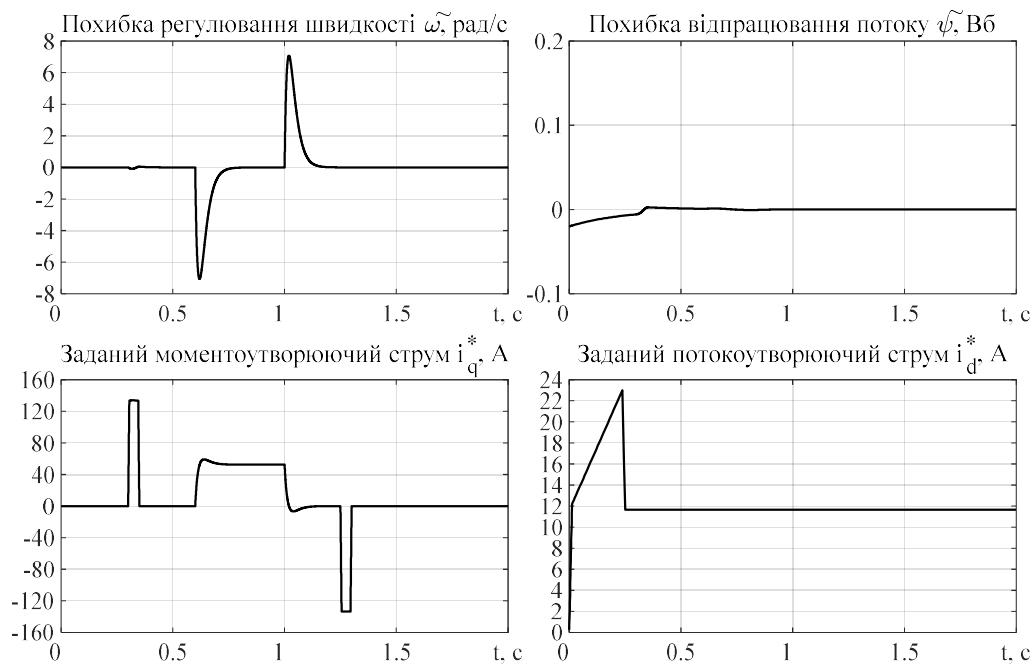


Рисунок 7.27. Графіки похибок відпрацювання потоку та моментотворюючого струму для третього дослідів

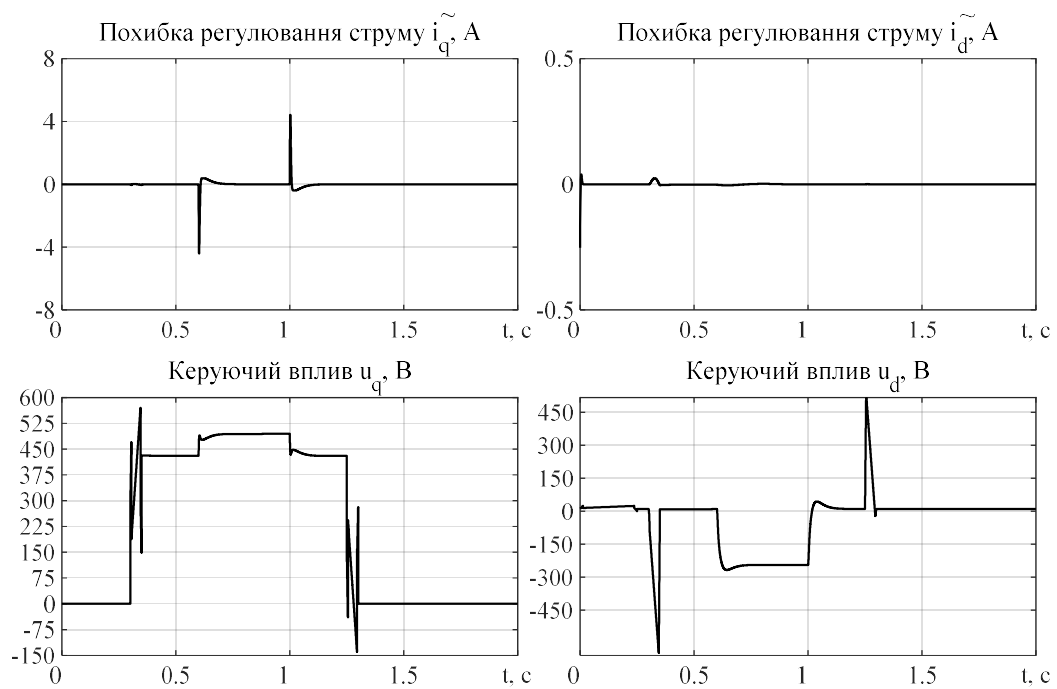


Рисунок 7.28. Графіки похибок регулювання струмів та керуючий вплив напруг для третього дослідів

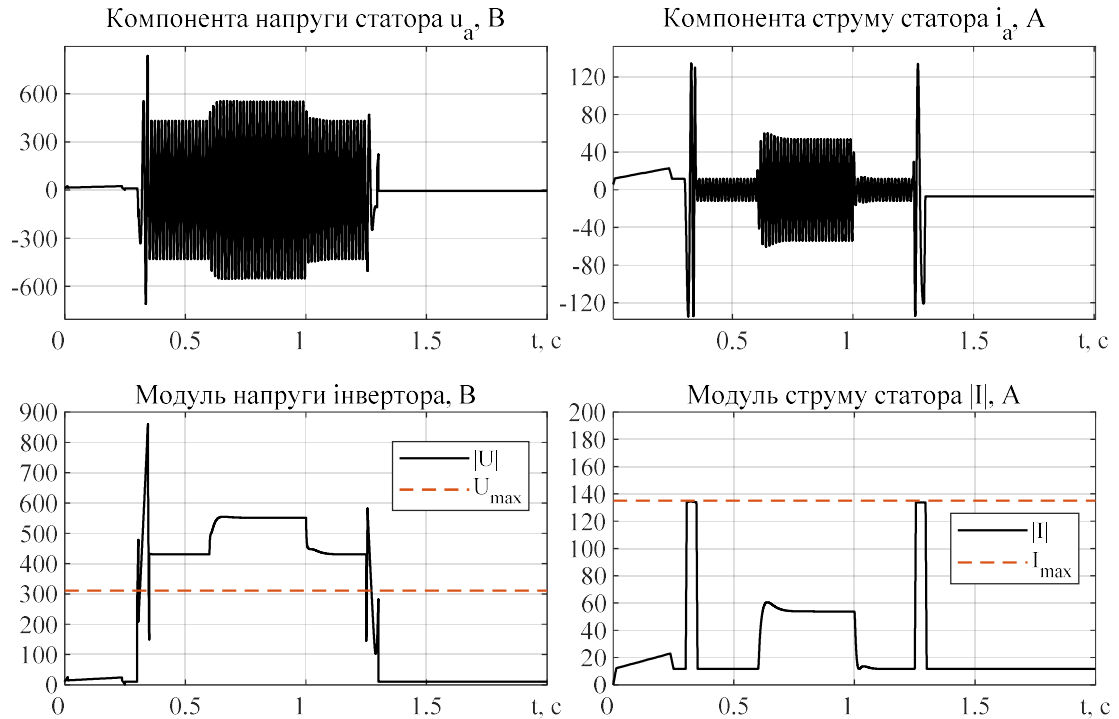


Рисунок 7.29. Графіки напруги та струму для третього дослідження

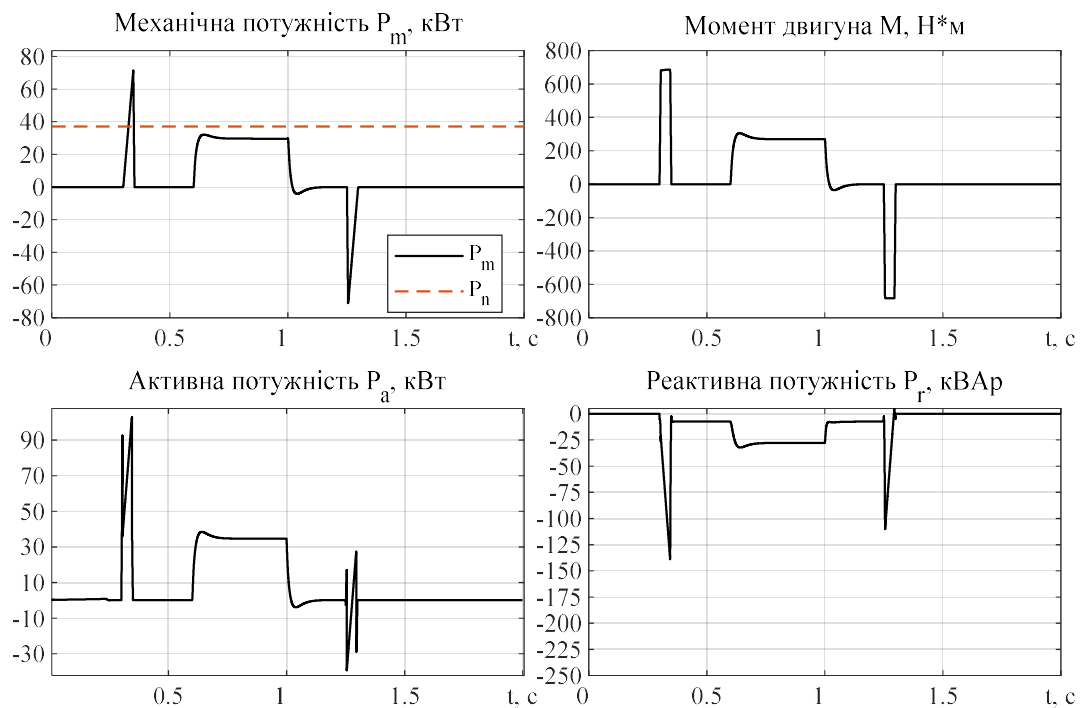


Рисунок 7.30. Графіки потужностей та моменту для третього дослідження

Основний великий висновок по графікам третього дослідження

Графіки третього дослідження демонструють важливі динамічні процеси в асинхронному двигуні під час пуску, сталого режиму та гальмування. Високі коливання параметрів під час пуску і гальмування вказують на необхідність удосконалення алгоритмів управління для зниження перерегулювання і мінімізації механічних та електричних навантажень.

Пускові процеси

Під час пуску спостерігаються значні коливання швидкості, струмів, напруги і потужності, що потребує оптимізації регуляторів для забезпечення плавного розгону і мінімізації механічних та електричних навантажень. Високі коливання похибки регулювання швидкості та моментотворчого струму вказують на необхідність вдосконалення алгоритмів регулювання для зменшення перерегулювання і забезпечення плавного розгону. Також важливо забезпечити швидке встановлення магнітного поля для підтримки стабільної роботи двигуна.

Сталий режим

У сталому режимі більшість параметрів стабілізуються, що свідчить про ефективну роботу систем управління і підтримку стабільної швидкості, моменту, напруги і струмів. Стабілізація параметрів у сталому режимі свідчить про ефективність існуючих систем регулювання, проте необхідно забезпечити постійну оптимізацію для підтримання стабільної роботи в умовах змінного навантаження. Висока точність регулювання потокозчеплення забезпечує стабільне магнітне поле і оптимальні умови для роботи двигуна.

Гальмування

Під час гальмування спостерігаються різкі зміни параметрів, що потребує точного налаштування регуляторів для забезпечення безпечного зупину двигуна. Різкі зміни параметрів під час гальмування вказують на динамічні процеси, які потребують точного налаштування регуляторів для забезпечення

безпечного і контрольованого зупину двигуна. Необхідно також забезпечити ефективне зменшення потокозчеплення для плавного гальмування.

Параметри напруги і струмів

Значні коливання напруги і струмів під час пуску і гальмування вказують на інтенсивну роботу інвертора і потребу в точному регулюванні для мінімізації втрат і забезпечення стабільної роботи двигуна. Оптимізація регулювання напруги і струмів дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність і продовжити термін експлуатації двигуна.

Отже, графіки третього дослідження демонструють важливість точного налаштування систем управління асинхронним двигуном. Пускові процеси характеризуються значними коливаннями параметрів, що вимагає оптимізації регуляторів для зменшення механічних та електричних навантажень. Стабільний режим роботи двигуна досягається завдяки точному регулюванню швидкості, потокозчеплення, струмів і напруги, що забезпечує надійність і ефективність роботи. Гальмування супроводжується динамічними процесами, які потребують точного налаштування для безпечного зупину двигуна. Для забезпечення оптимальної роботи асинхронного двигуна на всіх етапах необхідно постійно вдосконалювати алгоритми регулювання, що дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність і продовжити термін експлуатації двигуна. Необхідно також враховувати динамічні властивості системи та адаптувати регулятори до зміни умов роботи, що забезпечить стабільну і безпечну експлуатацію двигуна в різних режимах.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 7

Сьомий розділ дипломного проекту присвячений моделюванню та дослідженню перехідних процесів, а також динамічних і статичних характеристик вантажної ліфтової підйомної установки (ЛПУ) з використанням непрямого векторного керування. Розроблена математична модель асинхронного двигуна (АД) включає входні сигнали напруги фаз, потокозчеплення, струми та швидкість двигуна. Для реалізації векторного керування використано блоки перетворення координат з системи d-q до a-b та навпаки, що дозволяє точно керувати потокозчепленням та струмами в статорах і роторах.

Дослідження пускових процесів, сталого режиму та гальмування АД показали значні коливання швидкості, струмів, напруги та потужності під час пуску, що вказує на необхідність налаштування регуляторів для забезпечення плавного розгону та мінімізації механічних і електричних навантажень. У сталому режимі параметри стабілізуються, що свідчить про ефективну роботу системи керування. Гальмування супроводжується різкими змінами параметрів, що вимагає точного налаштування регуляторів для забезпечення безпечного зупину двигуна.

Під час пуску спостерігаються високі коливання швидкості та струмів, що вимагає оптимізації алгоритмів регулювання для зменшення перерегулювання і забезпечення плавного розгону. У сталому режимі параметри стабілізуються, що забезпечує стабільну роботу двигуна під постійним навантаженням. Висока точність регулювання потокозчеплення забезпечує стабільне магнітне поле. Під час гальмування спостерігаються різкі зміни параметрів, що потребує точного налаштування регуляторів для забезпечення безпечного зупину двигуна. Оптимізація регулювання напруги і струмів дозволить знизити енергетичні втрати та підвищити надійність роботи.

Загальний висновок: розробка математичної моделі та системи векторного керування асинхронним двигуном дозволяє створити ефективну систему керування для вантажної ліфтової підйомної установки. Використання сучасних методів моделювання та векторного керування забезпечує високу точність, надійність та енергоефективність роботи ЛПУ. Для забезпечення оптимальної роботи двигуна на всіх етапах необхідно постійно вдосконалювати алгоритми регулювання, що дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність та продовжити термін експлуатації двигуна.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дипломний проект присвячений розробці, моделюванню та впровадженню ефективної системи керування для вантажної ліфтової підйомної установки (ЛПУ) в умовах Київського метрополітену. Проект охоплює всі аспекти, від історичного розвитку ліфтових технологій до детального аналізу та реалізації системи векторного керування асинхронним двигуном.

Розглянуто історичний розвиток ліфтових підйомних установок, починаючи від примітивних механізмів до сучасних високотехнологічних систем. Проаналізовано сучасні інновації, що підвищують ефективність та безпеку ліфтів, зокрема інтеграція з автоматизованими системами керування та використання енергоефективних технологій. Надано детальний опис конструкції та роботи ЛПУ, включаючи основні компоненти: кабіну, шахту, лебідку, противагу, двері, канати, електродвигун, пульт керування та систему безпеки. Обрані кінематичні схеми враховують специфічні вимоги до висоти підйому та вантажопідйомності.

Визначено технічні завдання, вимоги до елементів ЛПУ, безпеки, енергоефективності, інтеграції з автоматизованими системами керування та експлуатаційні вимоги. Особлива увага приділена надійності, безпеці, енергоефективності та легкому доступу до основних компонентів для технічного обслуговування. Проведено детальний розрахунок швидкостей, часу роботи, рушійних зусиль та сил, що діють на ЛПУ, а також визначено необхідну потужність двигуна для забезпечення ефективної та безпечної роботи ліфта. Розрахунки дозволили визначити необхідну потужність двигуна для роботи ЛПУ, яка становить 34.3 кВт.

Обрано відповідні електродвигун, перетворювач частоти, редуктор, канати, програмований логічний контролер (ПЛК) та кнопки керування, які відповідають вимогам щодо ефективності, надійності та простоти обслуговування. Використання цих компонентів дозволить створити ефективну,

надійну та безпечну систему ЛПУ. Розроблено математичну модель асинхронного двигуна та систему векторного керування швидкістю та потоком. Використання векторного керування забезпечує високу точність, надійність та енергоефективність роботи ЛПУ.

Проведено моделювання та дослідження перехідних процесів, а також динамічних і статичних характеристик ЛПУ. Дослідження підтвердили ефективність розробленої системи керування, що забезпечує плавний пуск, стабільну роботу в усталеному режимі та безпечне гальмування.

Розробка та впровадження ефективної системи керування для вантажної ліфтової підйомної установки в умовах Київського метрополітену дозволить значно підвищити оперативність та надійність вантажних перевезень, знизити експлуатаційні витрати та впровадити сучасні технології у транспортну інфраструктуру. Використання сучасних методів моделювання та векторного керування забезпечує високу точність, надійність та енергоефективність роботи ЛПУ. Постійне вдосконалення алгоритмів регулювання дозволить знизити енергетичні втрати, підвищити надійність та продовжити термін експлуатації двигуна, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки експлуатації транспортної системи в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. АВВ 45 кВт 3ф. ACS580-01-087A-4. Інтернет-магазин «ОВК Дніпро». URL: <https://ovk.dp.ua/acs580-01-087a-4/> (дата звернення: 10.04.2024).
2. Каталог електродвигунів 4А і 4АМ - характеристики, аналоги, ціни. АІР Україна. URL: <https://xn--80aqy.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/> (дата звернення: 10.04.2024).
3. Електродвигун 37 кВт 3000 об/хв – АІР200М2 | АІР 200М2 | АІР 200 М2 – ціни і характеристики. АІР Україна. URL: https://xn--80aqy.com.ua/katalog_elektrodvigatelei_air/air-200m2-37-kvt-3000-ob-min/ (дата звернення: 10.06.2024).
4. Мотор-редуктор червячний Bonfiglioli W110 U 56 P90 B14 B3 LO: продаж, ціна у Запоріжжі. Редуктори від "ТД Фаворит" - 806358466. Системи вентиляції, кондиціонування, опалення. URL: <https://tdfavorit.com.ua/ua/p806358466-motor-reduktor-chervyachnij.html> (дата звернення: 12.04.2024).
5. КАНАТ СТАЛЕВИЙ ПОДВІЙНОЇ ЗВІВКИ STS 011 | Стальканат. Стальканат. URL: <https://stalkanat.com.ua/catalog/kanat-stalnoj-dvojnoj-svivki-sts-011/> (дата звернення: 13.06.2024).
6. SIMATIC S7-1200. Siemens. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/systemy-avtomatyzatsiyi/systemy-promyslovoyi-avtomatyzatsiyi-simatic/plc-kontrolery-simatic/simatic-s7-1200.html> (date of access: 10.06.2024).
7. Київський метрополітен | Неспинний рух задля розвитку міста. Київський метрополітен | Неспинний рух задля розвитку міста. URL: <http://www.metro.kyiv.ua/> (дата звернення: 18.05.2024).
8. 63 роки тому в Києві відкрили першу чергу метро. Згадуємо, як будували перші станції та найглибшу у світі – «Арсенальну» (в архівних фото). Бабель | Розповідаємо про політику, культуру і суспільство в Україні. Останні

новини детально і неупереджено. URL: <https://babel.ua/texts/37654-59-rokiv-tomu-v-kiyevi-vidkrili-pershu-cherгу-metro-zgaduyemo-yak-buduvali-pershi-stanciji-ta-nayglibshu-u-sviti-arsenalnu-v-arhivnih-foto> (дата звернення: 20.05.2024).

9. Попович М., Мацко Б. ПІДЙОМНІ УСТАНОВКИ : навч. посіб. Київ : Нац. техн. ун-т України “Київ. політехн. ін-т ім. І.Сікорського”, 2001. 173 с.

10. Методичні вказівки до розрахунку підйомних установок з дисципліни "Стаціонарні машини" студентами напряму підготовки 0902 «Інженерна механіка» (виконання курсових і дипломних проєктів) / Упоряд.: В.Г. Дерюгін, І.С. Ільїна, Ю.О. Комісаров, В.І. Самуся, - Д.: Національний гірничий університет, 2007. - 33

11. Редуктори. "Юнітех Україна" ТОВ. URL: <https://unitech.com.ua/ua/reduktora/> (дата звернення: 14.05.2024).

12. ДСТУ 7309:2019 Установки ліфтові. Ліфти класів I, II, III, IV, V та VI. Технічні умови. БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82128 (дата звернення: 01.06.2024).

13. Кнопка ВК 14-21 (в станцію управління) - АРМ-ЕКО: Виробник ліфтів. АРМ-ЕКО: Виробник ліфтів. URL: <https://arm-eko.com/product/knopka-vk-14-21-v-stancziyu-upravlinnya/> (дата звернення: 02.05.2024).

14. Учасники проєктів Вікімедіа. Київський метрополітен – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Київський_метрополітен (дата звернення: 01.06.2024).

15. М. О. Островерхов, «НЕПРЯМЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ЛІНІЙ-НОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ КІНЦЕВИХ ЕФЕКТІВ», *Вісник ВПІ*, вип. 2, с. 139–142, Листоп. 2010.

16. Тема 14. Скалярне керування АД: Принцип дії скалярного керування | Головна. Головна | Головна.

URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/book/view.php?id=36069&chapterid=602> (дата звернення: 01.06.2024).

17. >> Асинхронний двигун: навіщо потрібен, принцип роботи, конструкція - Simat. *Simat*. URL: <https://simat.com.ua/article-asynhronnyj-dvygatel-dlya-chego-nuzhen-pryncyp-raboty-konstrukcyya> (дата звернення: 01.06.2024).