

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри

_____ **Інна НЕФЬОДОВА**
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

тема «Електромеханічна система частотного регулювання положення із
асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором»

Виконав(ла)

здобувач(ка) групи БД-Е21
(шифр групи)

Максим САФОНОВ
(ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Керівник роботи

д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент роботи

к.т.н., доц. Валерій КОЛОМІЄЦЬ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

_____ (підпис)

Консультант

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

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) _____
(підпис)

Харків – 2025

ЗМІСТ

	ВСТУП	7
1	АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	9
2	ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТИ	22
3	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ САК	39
	Висновки	57
	Список використаних джерел	58
	Додатки	61

					ЕМКС 209006 000 ПЗ								
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Електромеханічна система частотного регулювання положення із асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором.				Літ.	Арк.	Аркушів		
Розроб.		Сафонов М.О.										6	
Перевір.		Кузнецов Б.І.							БННПП ХНУ ім. В.Н. Каразіна БД-Е21				
Т. контр.													
Н. Контр.		Кузнецов Б.І.											
Затверд.		Коломієць В.В.											

ВСТУП

Електромеханічна система частотного регулювання положення на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором є одним із ключових технічних засобів у сучасному промисловому обладнанні. Зі зростанням рівня автоматизації виробництва та впровадженням новітніх технологій у сфері машинобудування, транспорту, будівництва та логістики, зросла потреба у високоточному позиціонуванні виконавчих органів механізмів. Саме тому системи такого типу активно впроваджуються у підйомно-транспортне устаткування, де від їхньої точності, динаміки та надійності залежить ефективність усього виробничого циклу [1].

Частотне регулювання дозволяє плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна, що, у свою чергу, забезпечує кероване переміщення механічних вузлів. Застосування асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у таких системах пояснюється його конструктивною простотою, надійністю та невибагливістю в експлуатації, а також економічною доцільністю. Завдяки впровадженню інтелектуальних систем керування, які базуються на змінній частоті живлення, стало можливим реалізовувати точне регулювання положення виконавчих елементів у реальному часі, що особливо актуально для технологічного обладнання нового покоління.

Отже, розвиток та вдосконалення електромеханічних систем з частотним регулюванням на основі асинхронних двигунів безпосередньо впливає на прогрес у різноманітних галузях промисловості та визначає загальний технічний рівень автоматизованих підйомно-транспортних комплексів [1].

На сучасному етапі розвитку будівельної галузі, як у сфері зведення житлових, так і промислових об'єктів, ключову роль відіграють високотехнологічні електромеханічні системи автоматизованого регулювання. Зокрема, електроприводи з частотним регулюванням положення, що базуються

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						7
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на застосуванні асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, стали невід’ємною складовою сучасного технічного забезпечення.

Завдяки широкому впровадженню таких систем, стало можливим забезпечити надійність, точність та гнучкість у функціонуванні технологічних комплексів. Їхнє застосування охоплює найрізноманітніші сфери: від механізованих процесів на підприємствах важкої промисловості - до роботи вантажопідйомного обладнання в морських портах, логістичних терміналах і залізничних транспортних вузлах [2].

Електромеханічні системи частотного регулювання з використанням асинхронних двигунів забезпечують автоматизоване керування положенням виконавчих механізмів, що є надзвичайно важливим для точної координації руху, оптимізації енерговитрат і підвищення продуктивності обладнання.

Головною метою цієї роботи є розробка та інженерне обґрунтування електромеханічної системи частотного регулювання положення, яка базується на використанні асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. У межах даної роботи буде проведено технічний аналіз, обґрунтовано вибір основних компонентів системи, а також досліджено її динамічні характеристики з метою забезпечення ефективного функціонування в умовах сучасного виробництва [3].

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						8
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Підйомні пристрої є важливою складовою сучасної інфраструктури як у побутовому, так і в промисловому середовищі. Їхнє застосування значно оптимізує трудові процеси, підвищуючи ефективність і швидкість виконання завдань. Зокрема, одними з найпоширеніших підйомних засобів є ліфти, які вже давно стали невід'ємною частиною архітектури багатоповерхових будівель, слугуючи не лише засобом пересування між рівнями, а й показником рівня комфорту та доступності середовища.

На сьогодні існує широкий спектр підйомних механізмів, серед яких можна виділити вантажопідйомні крани, ескалатори, підйомники та ліфти. Вони активно використовуються у виробничих процесах, будівництві, складських господарствах і житлово-комунальній сфері. Проте саме ліфти займають провідне місце серед усіх видів підйомного обладнання за рівнем поширеності, універсальністю та частотою експлуатації. Їх встановлюють у житлових багатоквартирних будинках, лікувальних закладах, офісах, торгових центрах, промислових об'єктах тощо [2].

Сучасні ліфтові системи вирізняються високим ступенем автоматизації. Керування відкриванням і зачиненням дверей, запуском і зупинкою кабіни здійснюється за допомогою складних електронно-керованих систем із вбудованими електроприводами. Такі системи повинні відповідати жорстким вимогам щодо безпеки пасажирів, надійності та комфорту переміщення. Зокрема, електропривод ліфта має забезпечувати плавний старт і гальмування, стабільну підтримку заданої швидкості руху та точну зупинку кабіни на потрібному поверсі.

У різноманітних конструктивних варіантах кінематичних схем ліфтових установок основними функціональними елементами виступають такі ключові складові: напрямні шківів, підйомні лебідки, електропривід або інший тип рушія, механічні системи гальмування, вантажні або тягові канати, кабіна для пасажирів

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						9
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або вантажу, противага, а також пристрої, що забезпечують функцію керування роботою підйомного механізму [3].

Тип рушія, що використовується в системі, залежить насамперед від призначення ліфта та його технічних характеристик. За способом приводу двигуни класифікуються на два основних типи: електричні (які є найбільш поширеними) та гідравлічні (що застосовуються в окремих специфічних випадках). У підйомниках з помірною або великою швидкістю руху, як правило, застосовуються асинхронні електродвигуни змінного струму. Натомість у високошвидкісних системах, де потрібна точніша регуляція та стабільність, перевагу надають двигунам постійного струму.

Залежно від конструктивної реалізації підйомного механізму, ліфти можуть бути виконані в одній із таких конфігурацій: із барабанною лебідкою, із шківом, що безпосередньо приводить у дію тягові канати (канатоведучий шків), або із лебідкою без використання редуктора (безредукторна система). Кожна з цих систем має свої особливості у сфері застосування, обслуговування та ефективності роботи [2].

З огляду на тип реалізованої системи керування, ліфти класифікують на кілька груп: із кнопковим керуванням зсередини кабіни, з кнопковим керуванням із зовнішніх постів, із комбінованим або змішаним керуванням, із класичним (нормальним) керуванням, а також із так званим збірним керуванням, коли відпрацювання команд відбувається переважно при русі кабіни вниз. Додатково виділяють системи групового типу – як загальні, так і орієнтовані лише на рух у напрямку донизу. Для складніших та автоматизованих комплексів може бути реалізоване програмне керування, яке дозволяє здійснювати розширене управління алгоритмом переміщення.

Класифікація за кінематичною побудовою механізмів приводів також є важливою: існують ліфти з розміщенням привідного агрегату у верхній або нижній частині шахти. Окрім того, система може бути реалізована з використанням противаги або без неї. Відсутність противаги зумовлює

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						10
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідність встановлення двигуна з істотно вищим показником потужності, що економічно недоцільно у більшості випадків. З цієї причини такі ліфти застосовуються лише у виняткових ситуаціях, коли вантажопідйомність установки незначна, а встановлення противаги фізично неможливе через конструктивні або просторові обмеження [3].

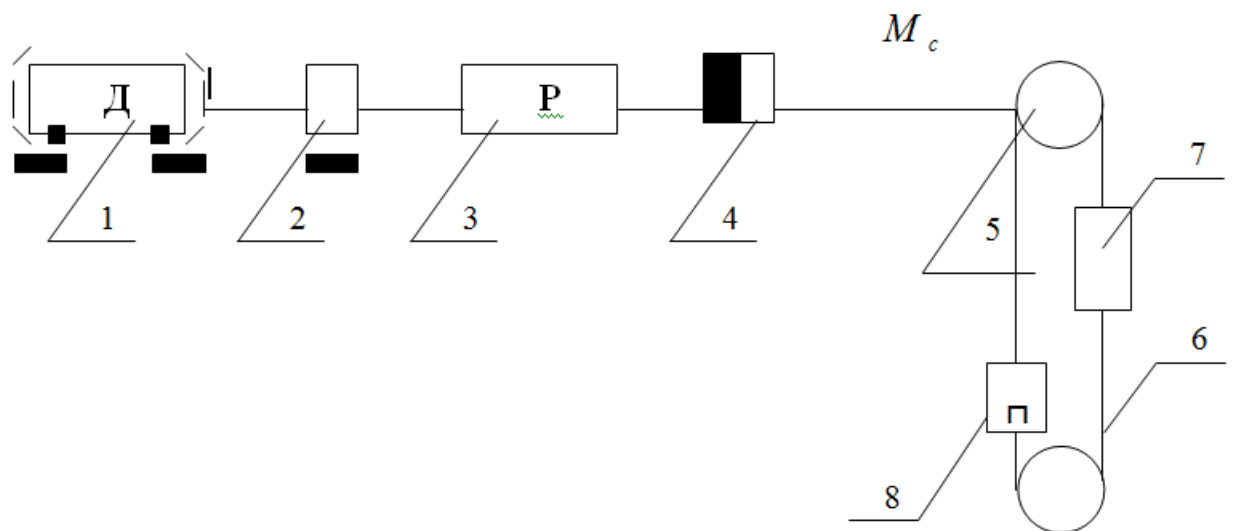


Рисунок 1.1 – Схема ліфта.

У технологічній схемі, де привідний електродвигун розташований у верхній частині шахти, передача механічної енергії відбувається у такий спосіб: обертання, створене двигуном (поз. 1), передається через послідовно встановлені компоненти - спочатку гальмівну муфту (поз. 2), далі редуктор (поз. 3), а потім з'єднувальну муфту (поз. 4) - до канатіведучого шків (поз. 5). Цей шків, задіюючи тягові канати (поз. 6), приводить у рух ліфтову кабину (поз. 7) разом із противагою (поз. 8), забезпечуючи узгоджене переміщення обох елементів у протилежних напрямках [3].

У сучасних системах електроприводів, що використовуються у пасажирських та вантажопасажирських ліфтах, широке застосування знаходять як асинхронні двигуни змінного струму, так і двигуни постійного струму - залежно від вимог до швидкісних характеристик та навантаження. Серед

електродвигунів українського виробництва для ліфтових систем переважно використовуються [4]:

- Кранові двигуни змінного струму з фазним ротором серії МТК або з короткозамкненим ротором серії МТКФ, які мають діапазон номінальної потужності від 2 до 20 кВт;
- Двигуни серії 4МТ, призначені для більш потужних приводів - з діапазоном від 2 до 220 кВт;
- Електродвигуни постійного струму, зокрема серії ДЕ та ПЕ, що використовуються здебільшого в екскаваторній техніці, але також ефективні у ліфтових приводах;
- Окремо варто згадати двигуни серій Д, П та спеціалізовані ліфтові електродвигуни серії ПЛ, що забезпечують надійну роботу механізмів підйому.

Асинхронні електроприводи, що працюють на змінному струмі, зазвичай встановлюються у ліфтах із невисокими швидкостями руху - у межах до 2 метрів за секунду. Їх застосовують як у повільнохідних (низькошвидкісних), так і в швидкохідних системах, що обслуговують житлові чи комерційні споруди середньої поверховості. Натомість у високошвидкісних ліфтах, де швидкість перевищує 2 м/с, доцільніше використовувати електроприводи постійного струму, що краще підходять для плавного розгону, гальмування та точного позиціонування кабіни [3].

У житлових будинках і адміністративних спорудах, висота яких не перевищує 18 поверхів, зазвичай встановлюють швидкохідні ліфти зі швидкістю переміщення до 2 м/с. У менш високих будівлях - до 10 поверхів - технічно та економічно обґрунтованим є застосування ліфтів, які рухаються зі швидкістю від 0,7 до 1 м/с. Такий підхід забезпечує оптимальний баланс між комфортом користування, енергоефективністю та витратами на технічне обслуговування.

Упродовж останніх років суттєво зросли експлуатаційні та технічні вимоги, що висуваються до сучасних ліфтових систем. Зокрема, пасажирські ліфти повинні відповідати таким основоположним критеріям [4]:

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						12
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- а) гарантувати необхідну пропускну здатність згідно з технічним завданням;
- б) забезпечувати повну безпеку для людей і вантажів, які транспортуються;
- в) демонструвати високий рівень надійності у тривалому режимі експлуатації;
- г) забезпечувати комфортні умови переміщення пасажирів (відсутність вібрацій, плавність ходу, знижений рівень шуму);
- д) бути економічно ефективними з точки зору енергоспоживання та вартості обслуговування.

Залежно від механічного компонування та принципу роботи, лебідки, які застосовуються в ліфтових механізмах, поділяються на редукторні та безредукторні.

Редукторні лебідки характеризуються наявністю проміжної передачі, яка понижує оберти електродвигуна. У таких системах канатоведучий шків встановлюється на вихідному (тихохідному) валу редуктора. Цей тип лебідок є типовим для ліфтів вітчизняного виробництва, що мають швидкість переміщення до 1,6 м/с. В якості приводу, як правило, використовуються двошвидкісні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які живляться від мережі змінного струму промислової частоти [5].

Безредукторні лебідки використовуються переважно в швидкісних ліфтах, де необхідно досягти високої плавності руху та точності зупинки кабіни. У такій конфігурації канатоведучий шків закріплюється безпосередньо на валу електродвигуна, яким є машина постійного струму із незалежним збудженням. Подібне рішення застосовується в будівлях з великою висотою підйому, де особливо важливими є надійність, енергоефективність і зменшення масогабаритних показників приводу.

Для покращення експлуатаційних характеристик, у безредукторних ліфтах застосовують електродвигуни постійного струму з тихохідним обертанням, що

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						13
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працюють у парі з тиристорними перетворювачами. Такі системи забезпечуються безконтактним електронним управлінням, що дозволяє точно контролювати як перехідні режими, так і усталений рух, незалежно від ступеня завантаження кабіни.

Електропривід у високошвидкісних ліфтах реалізується за схемою: тиристорний реверсивний перетворювач – електродвигун постійного струму. Це дозволяє здійснювати плавне регулювання швидкості та забезпечує ефективне реверсування руху [6].

Система керування має інтелектуальний алгоритм, який обробляє попутні виклики при русі вгору та вниз, оптимізуючи логіку зупинок кабіни та підвищуючи загальну ефективність перевезень. Такий підхід адаптований до групових систем автоматизованого управління, де декілька ліфтів працюють скоординовано.

Виклик ліфта здійснюється через натискання кнопки виклику, яка розміщується на стіні ліфтової шахти. Для з'єднання елементів керування, що розташовані у машинному приміщенні, з панеллю управління в кабіні, застосовується підвісний гнучкий кабель, який забезпечує надійний зв'язок між усіма електронними компонентами [5].

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						14
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

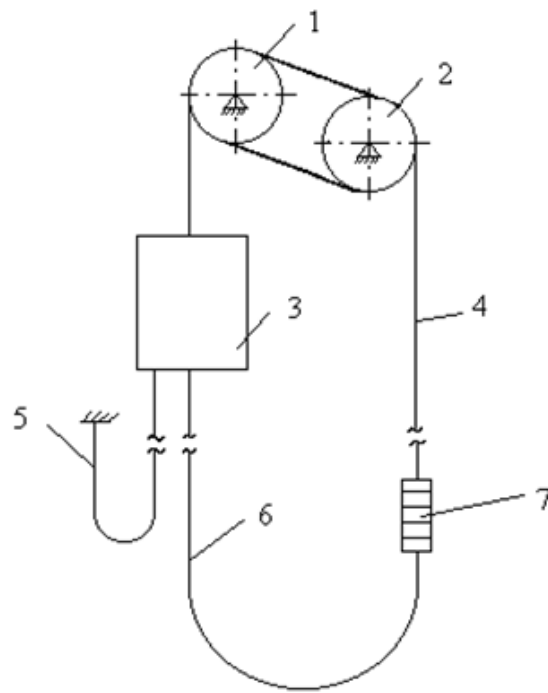
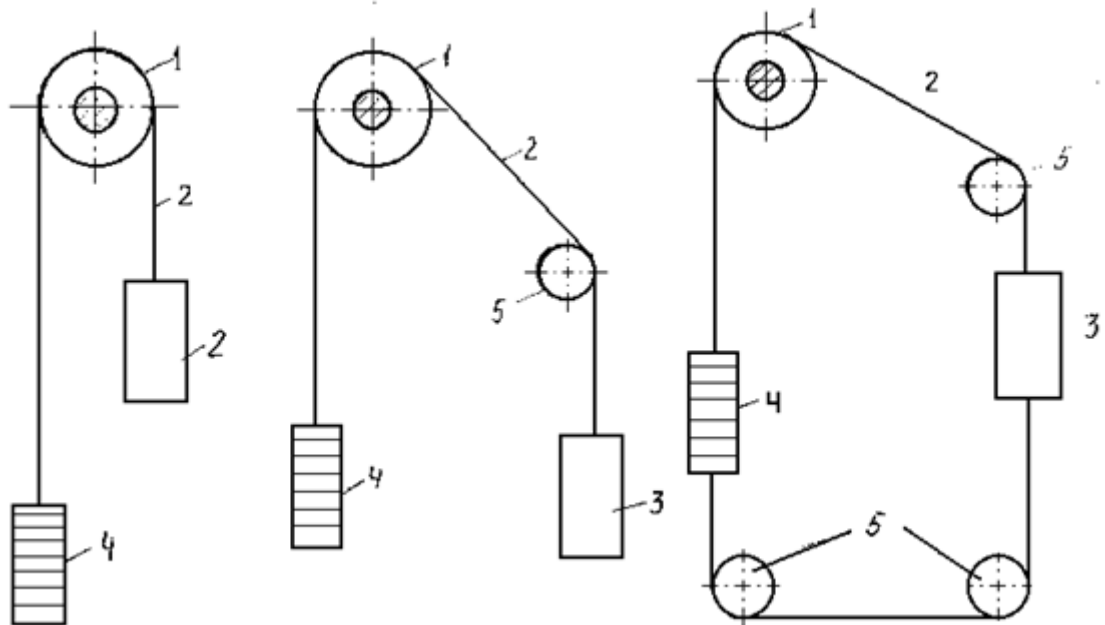


Рисунок 1.2 – Кінематична схема: 1-канатоведучий шків; 2-відвідної блок; 3 кабіна; 4-тяговий канат; 5-підвісний кабель; 6-рівноважуючий канат; 7-противага.



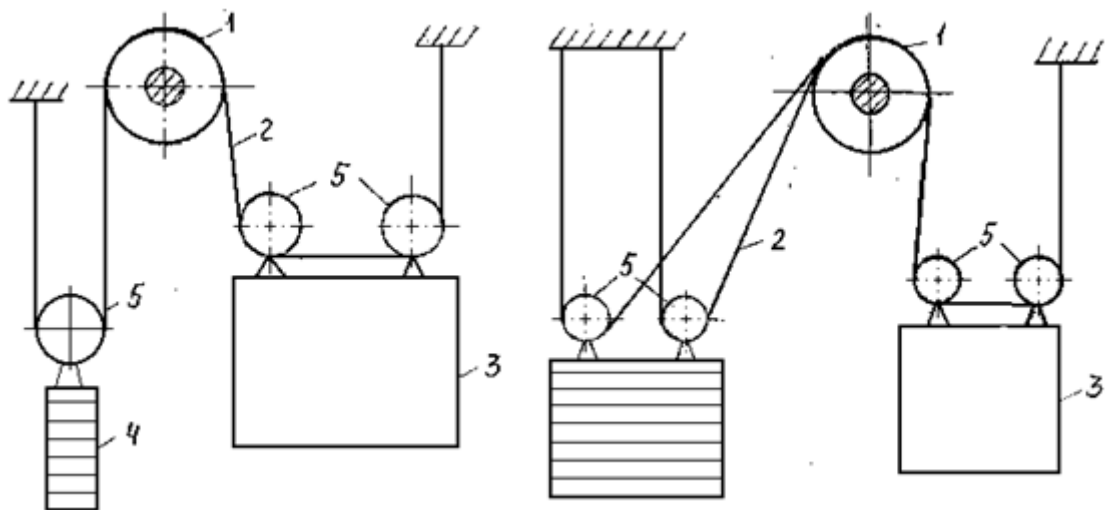


Рисунок 1.3 – Кінематичні схеми ліфтів: 1 - канатоведучий шків; 2 - тяговий канат; 3 - кабіна; 4 - протизавага;

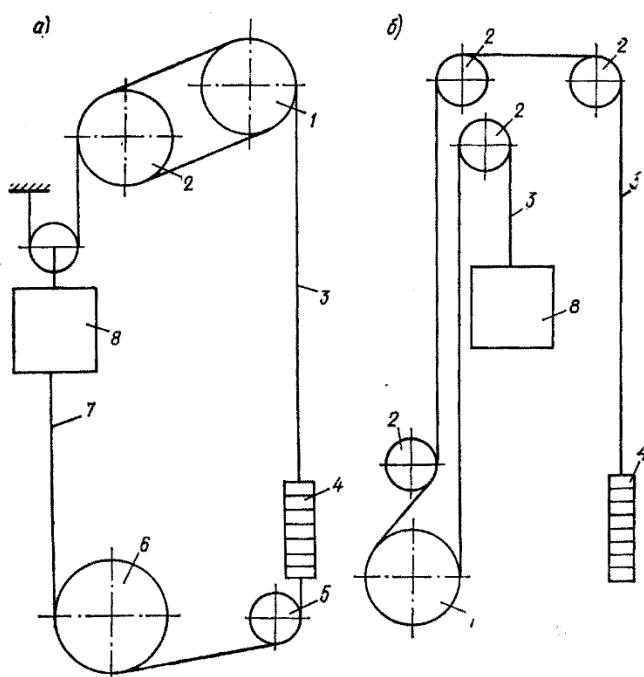


Рисунок 1.5 – Кінематичні схеми

а) Схема поліспастного підвісу з повним обхватом шківів; б) Схема з нижнім розташуванням канатоведучого шківів, зміщеним убік від осі шахти

У першому варіанті (позначка а) представлено конструкцію з використанням поліспадної підвіски, де канати двічі охоплюють канатоведучий шків, створюючи кут обхвату 360° . Такий тип обв'язки дозволяє збільшити силу тертя між тяговим канатом і шківом, що сприяє покращенню зчеплення і надійності приводу [5].

Другий варіант (позначка б) передбачає нижнє розташування канатоведучого шківа, який встановлено збоку шахти. Це рішення найчастіше застосовується у компактних конструкціях ліфтів, де обмежений простір не дозволяє розмістити привід у верхній частині шахти.

Умовні позначення на схемі [5]:

1. Канатоведучий шків – елемент, який забезпечує передавання обертального моменту на тягові канати завдяки тертю;
2. Відвідний блок – шків, що змінює напрям руху каната;
3. Тяговий канат – основний несучий елемент, який передає зусилля між кабіною і противагою;
4. Противага – вантаж, що врівноважує масу кабіни з метою зменшення енергоспоживання;
5. Відвідний блок врівноважувального каната – забезпечує зміну напрямку каната, що з'єднує противагу і кабіну при використанні компенсаційного підвісу;
6. Натяжний блок – елемент, що підтримує стабільну натяжку врівноважувального каната;
7. Врівноважувальний канат – компенсаційний канат, який встановлюється в системах із великою висотою підйому для балансування мас канатів;
8. Кабіна ліфта – пасажирська або вантажна платформа, призначена для транспортування людей або вантажу в межах будівлі.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						17
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після натискання кнопки виклику на зовнішньому посту керування, до електронної системи управління ліфтовим обладнанням надходить керуючий імпульс - електричний сигнал, який ініціює обробку запиту на транспортування. У випадку, якщо кабіна ліфта вже знаходиться на відповідному поверсі, система негайно активує механізм відкриття дверей - як шахтних, так і кабінних. Якщо ж кабіна перебуває на іншому рівні, формується команда на її переміщення до зазначеної зупинки [6].

У процесі запуску до обмотки електродвигуна лебідки та котушки електромагніта гальмівного механізму подається напруга живлення. Це призводить до розблокування гальма, після чого ротор двигуна починає обертатися. Завдяки дії сили тертя між канатоведучим шківом і тяговими канатами, обертання шківа передається системі підвісу, що забезпечує рух кабіни ліфта та противаги в протилежних напрямках.

У момент, коли кабіна наближається до заданого рівня зупинки, сигнал від датчиків уповільнення надходить до системи управління, що перемикає режим роботи електродвигуна на знижені оберти. Це дозволяє плавно зменшити швидкість переміщення кабіни. Після досягнення точної зупинки — коли рівень підлоги кабіни співпадає з рівнем порогу шахти — активується гальмівна система, і кабіна повністю зупиняється. Водночас надходить команда на активацію приводу дверей, і відбувається синхронне відкриття дверей кабіни та шахти.

З метою покращення плавності пуску та зупинки, а також для зменшення навантажень на механічні компоненти системи, сучасні ліфти можуть бути оснащені інверторними блоками частотного регулювання типу OVF-20. Таке обладнання дозволяє реалізувати плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна, покращити енергоефективність та забезпечити комфортні умови для пасажирів.

Для забезпечення можливості екстреного відкривання дверей ліфтової кабіни у зоні зупинки, кнопковий пост управління обладнано спеціальною кнопкою "Двері". Її призначення полягає в тому, щоб дати користувачеві змогу

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						18
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відкрити двері вручну та утримувати їх у відкритому стані до моменту відпускання кнопки. Ця функція особливо важлива у випадках непередбачених ситуацій, коли потрібен примусовий доступ до кабіни або забезпечення безпечного виходу пасажирів [6].

Після прибуття кабіни на визначену посадкову платформу та завершення процесу висадки пасажирів, двері автоматично зачиняються. Подальші дії ліфта залежать від алгоритму, закладеного у програмне забезпечення системи управління: у деяких режимах кабіна залишається на поточній зупинці в режимі очікування, в інших — переміщується до встановленої зони паркування, де перебуває у стані готовності до наступного виклику.

Безпека функціонування ліфта забезпечується системою блокувальних і запобіжних пристроїв, що контролюють коректність роботи основних вузлів. Рух кабіни допускається лише за умови справності всіх елементів безпеки. У разі спрацювання будь-якого із захисних механізмів - наприклад, кінцевих вимикачів, обмежувача швидкості або пристроїв контролю положення дверей - відбувається миттєве розмикання кола управління, що призводить до зупинки кабіни та блокування подальшого руху до усунення причини спрацювання [5].

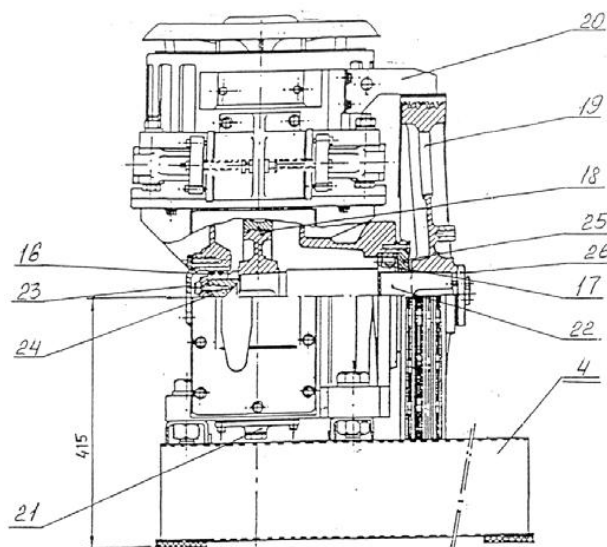


Рисунок 1.6 – Редуктор

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

У межах даного інженерного проєкту ставиться завдання розробки високоефективної автоматизованої електромеханічної системи, призначеної для управління роботою вантажопасажирського ліфта, що експлуатується в дванадцяти п'ятиповерхових секціях житлового будинку. Розроблювана система повинна забезпечити безпечне, комфортне й надійне переміщення користувачів між будь-якими поверхами будівлі, за умови повної відповідності сучасним вимогам щодо енергоефективності, довговічності та технологічної простоти експлуатації [5].

Проектowana ліфтова установка повинна мати наступні основні технічні характеристики [7]:

- Номінальна вантажопідйомність кабіни: до 1000 кілограмів;
- Максимальна швидкість вертикального переміщення: не більше 2,5 метра на секунду;

- Граничне значення прискорення/гальмування: не перевищує $1,5 \text{ м/с}^2$.

Пріоритетними вимогами до системи є:

- висока експлуатаційна надійність;
- повна технічна безпека під час транспортування пасажирів;
- тривала безаварійна робота в режимі багаточасових навантажень;
- оптимальна вартість у розрізі життєвого циклу установки.

Для досягнення вищезазначених показників у системі застосовується інверторне керування приводом - один із найефективніших методів регулювання частоти обертання електродвигуна, що широко впроваджується у сучасних промислових та побутових автоматизованих системах.

Запланована реалізація механічної частини передбачає використання кінематичної конфігурації з верхнім розташуванням електропривода. При цьому врівноважуючий канат у конструкції відсутній, що дозволяє спростити структуру підвісу та зменшити кількість обслуговуваних компонентів.

Основу системи автоматизації становитиме сучасна мікропроцесорна платформа, побудована на програмованому логічному контролері модульного

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						20
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

типу (ПЛК). Цей елемент виконує всі ключові функції [7]: – опитування стану зовнішніх і внутрішніх кнопкових викликів, – керування напрямком і швидкістю руху кабіни, – реєстрація поточного положення кабіни у шахті з точністю до поверху, – відображення інформації про поточний поверх, – зчитування показників перевантаження, – ініціація аварійної зупинки при виникненні небезпечних або позаштатних ситуацій [7].

До складу системи керування та підйомного механізму входять наступні основні елементи [6]:

- Промисловий контролер (ПЛК), який виконує функції логіки управління;
- Редукторна механічна передача, що забезпечує перетворення швидкості обертання;
- Перетворювач частоти (інверторного типу), який забезпечує динамічне регулювання швидкості електродвигуна;
- Трифазний асинхронний двигун змінного струму;
- Привід механізму відкривання/закривання дверей кабіни;
- Сама ліфтова кабіна з системою направляючих і підвісу;
- Система безпеки: обмежувач швидкості, ловителі (уловлювачі), запобіжні контакти та кінцеві вимикачі;
- Електронна система індикації поверхів та напрямку руху ліфта.

У комплексі зазначені компоненти формують інтелектуальну адаптивну систему, яка не лише виконує свою функцію переміщення пасажирів, а й оптимізує роботу за рахунок енергозбереження, зниження зносу компонентів і підвищеної плавності руху, що особливо важливо для сучасного житлового будівництва.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						21
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ЕЛЕКТРОПРИВОД ТА ЙОГО ЕЛЕМЕНТИ

Вихідною основою для виконання інженерного розрахунку параметрів ліфтової установки є комплекс показників, які відображають архітектурні, функціональні та експлуатаційні характеристики будівлі, а також очікувані навантаження на систему підйому пасажирів. Зокрема, до основних розрахункових факторів належать [8]:

- Загальна висота підйому ліфта, що визначає протяжність шахти та довжину тягових елементів;
- Кількість поверхів, які обслуговуються ліфтовою установкою;
- Рівень заповненості будівлі (кількість мешканців або користувачів на одиницю площі);
- Розрахунковий коефіцієнт інтенсивності пасажиропотоку, що характеризує навантаження на систему в пікові періоди доби;
- Категорія транспортного комфорту, досягнення якої вимагається згідно з діючими технічними регламентами;
- Нормативно-технічна база, яка включає положення ДСТУ, будівельних норм та галузевих рекомендацій.

Слід враховувати, що завантаження ліфтової системи протягом доби змінюється за стохастичним (випадковим) законом, тобто не є постійним і підлягає флуктуаціям залежно від часу доби, типу будівлі та сценаріїв використання. У процесі експлуатації рівень навантаження може істотно коливатись, утворюючи характерні пікові інтервали з підвищеною інтенсивністю пасажиропотоку. Такі періоди часто пов'язані з початком робочого дня, перервами, завершенням занять у навчальних закладах тощо [7].

Кількісною характеристикою пасажиропотоку вважається кількість осіб, які переміщуються в одному напрямку за певну одиницю часу (наприклад, за хвилину або п'ятихвилинний інтервал). Для уніфікованого аналізу пасажиронавантаження в будівлях різного функціонального призначення

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						22
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовується поняття інтенсивності 5-хвилинного потоку, що виражається у відсотках від загальної кількості користувачів, які обслуговуються ліфтом упродовж доби.

Орієнтовні значення 5-хвилинної інтенсивності пасажиропотоку (відповідно до типу споруди) [9]:

- Житлові багатоповерхівки стандартної забудови: від 3% до 6%;
- Готелі та гуртожитки: у межах 7–15%;
- Офісні (адміністративні) споруди: 14–20%;
- Громадські будівлі загального користування (торгові центри, поліклініки, вокзали): 15–20%;
- Навчальні заклади (школи, вищі навчальні заклади): 20–35%.

Зазначені значення використовуються як еталонні для виконання попередніх розрахунків кількості ліфтів, їх вантажопідйомності, швидкості та необхідної продуктивності в пікові періоди. Врахування цих показників дозволяє забезпечити оптимальний рівень обслуговування, зменшити час очікування та підвищити транспортну ефективність ліфтової системи [10].

Інтенсивність де $I_n=6\%$.

$$A_5 = \sum_2^n a_i \cdot \frac{I}{100}, \text{чол} / 5\text{хв}; \quad (2.1)$$

$$A_{5-2} = 15 \cdot \frac{6}{100} = 0,9 \text{чол} / 5\text{хв}; \quad (2.2)$$

$$A_5 = 25 \cdot 0,9 = 22,5 \text{чол} / 5\text{хв}; \quad (2.3)$$

$$A_p = 12K \cdot A_5, \text{чол} / \text{год}; \quad (2.4)$$

$$A_p = 12 \cdot K_{np} \cdot A_5 = 12 \cdot 0,8 \cdot 22,5 = 216 \text{чол} / \text{год}; \quad (2.5)$$

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						23
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V = \frac{H}{30} = \frac{77,2}{30} = 2,5 \text{ м/с}; \quad (2.6)$$

$$\text{На підйом: } A_n = 0,66 \cdot A_p = 0,66 \cdot 216 = 142,56 \text{чол/год}; \quad (2.7)$$

$$\text{на спуск: } A_c = 0,34 \cdot A_p = 0,34 \cdot 216 = 73,44 \text{чол/год}; \quad (2.8)$$

Розрахунок місткості ліфтової кабіни здійснюється з урахуванням нормованого (наведеного) інтервалу руху, а також інтенсивності пасажиропотоку в напрямках підйому та спуску. Визначення цього параметра ґрунтується на аналізі очікуваного навантаження системи у години пік, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність ліфта без перевантаження та з урахуванням вимог до комфортності перевезень [11]:

$$\text{на підйом: } E_n = \frac{A_n \cdot t_u}{3600} = \frac{142,56 \cdot 90}{3600} = 3,56 \text{чол}; \quad (2.9)$$

$$\text{на спуск: } E_c = \frac{A_c \cdot t_u}{3600} = \frac{73,44 \cdot 90}{3600} = 1,84 \text{чол}; \quad (2.10)$$

$$Q = q \cdot z = 77 \cdot 13 = 1000 \text{кг}; \quad (2.11)$$

$$\Pi = \frac{3600 \cdot z}{T} \cdot \phi_{cm} = \frac{3600 \cdot 10}{103,796} \cdot 0,6 = 208 \text{чол/год}; \quad (2.12)$$

$$m_k = (500 \div 550) \cdot A \cdot B = 500 \cdot 1,6 \cdot 1,4 = 1120 \text{кг}; \quad (2.13)$$

$$m_n = m_k + \varphi \cdot Q = 1120 + 0,5 \cdot 1000 = 1620 \text{кг}; \quad (2.14)$$

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						24
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_{p2} = \frac{V}{a} = \frac{2.5}{1.5} = 1.7c; \quad (2.15)$$

$$L_{p2} = \frac{a \cdot t_{p2}^2}{2} = \frac{1.5 \cdot 1.7^2}{2} = 2.1675m; \quad (2.16)$$

$$L_y = H - 2 \cdot L_{p2} = 77,2 - 2 \cdot 2.1675 = 72.865m; \quad (2.17)$$

$$t_y = \frac{L_y}{V} = \frac{72,865}{2.5} = 29.146c; \quad (2.18)$$

$$t_{nep} = t_y + 2t_{p2} = 29.146 + 2 \cdot 1.7 = 32.546c; \quad (2.19)$$

$$t_{\text{ц}} = 2 \cdot t_{nep} + 2 \cdot t_0 = 2 \cdot 32.546 + 2 \cdot 5.75 = 65.092 + 11.5 = 76.592c; \quad (2.20)$$

На основі виконаних попередніх розрахунків будується тахограма роботи вантажопасажирської ліфтової установки, яка дозволяє графічно відобразити зміну швидкості руху кабіни у часі на характерному робочому циклі. Такий графік є важливим інструментом для аналізу динаміки підйому та спуску, а також для оцінювання параметрів прискорення, уповільнення та фаз сталого руху.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						25
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

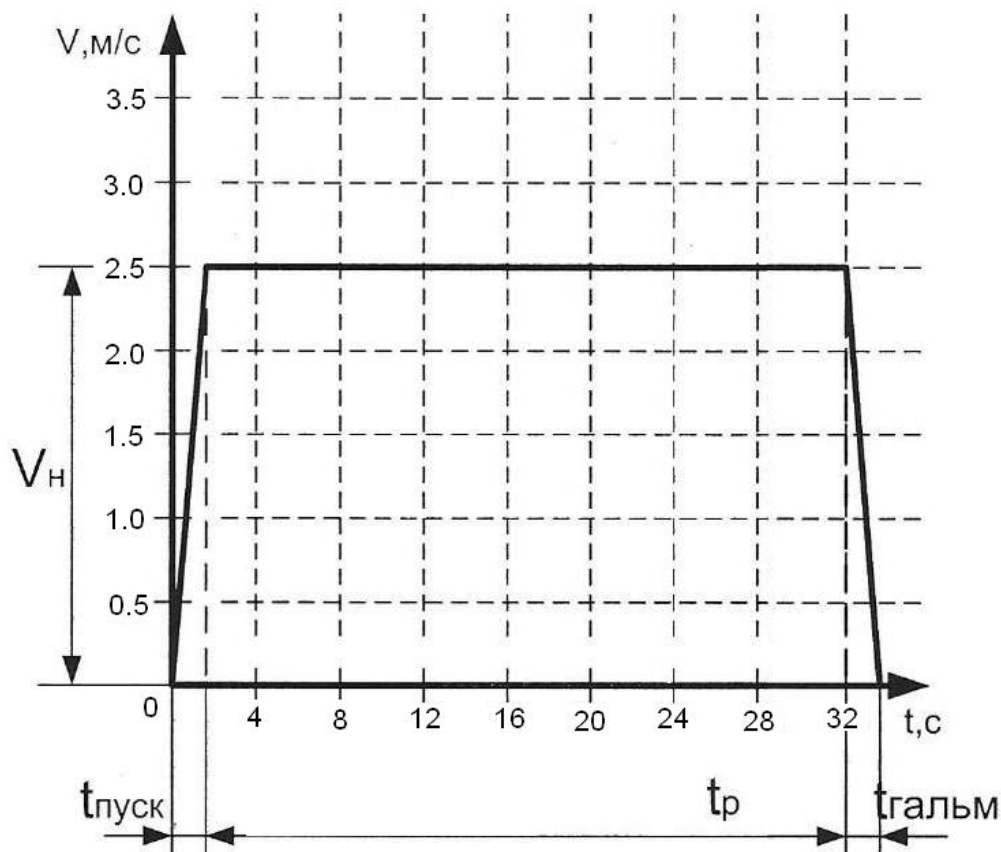


Рисунок 2.1 – Тахограма ЛПУ

Діаграма рушійних зусиль є ключовим інженерним інструментом, що використовується для визначення необхідної потужності електропривода ліфтової установки, а також для аналізу режимів роботи автоматизованої системи керування на окремих фазах робочого циклу (розгін, сталий рух, гальмування, зупинка тощо). Вона дозволяє виявити максимальні та мінімальні значення сили тяги, які виникають у тяговому органі під час експлуатації, і є основою для подальшого розрахунку динамічних навантажень та вибору електродвигуна за потужністю [11].

Для точного моделювання динаміки переміщення кабіни використовується розрахункова кінематична схема, наведена у наступному розділі. Вона відображає компонування основних елементів ліфтового підйомного механізму та їх взаємодію.

З урахуванням того, що висота підйому H не перевищує 50 метрів, конструктивно передбачено відсутність врівноважуючого (хвостового) каната. У зв'язку з цим система підвіски набуває ознаки статичної нестійкості, тобто немає компенсації маси тягових канатів при підйомі або опусканні кабіни, що потребує додаткового врахування змінного навантаження на привод у різних фазах руху [11].

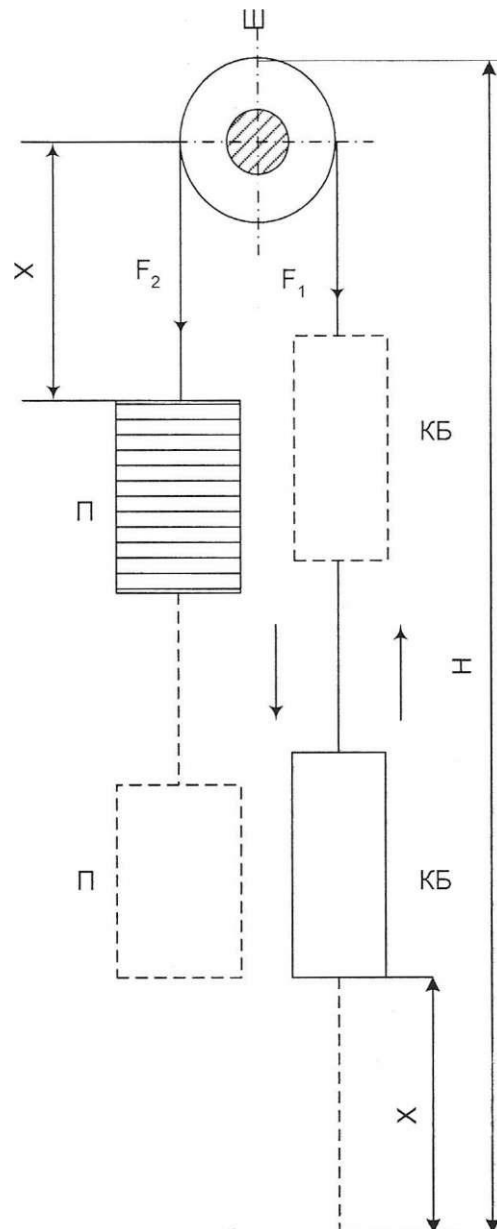


Рисунок 2.2 – Кінематична схема.

Значення рушійного зусилля для ліфтової підйомної установки (ЛПУ) визначається шляхом застосування рівняння динаміки системи, яке враховує взаємодію всіх масово-інерційних і силових факторів, що впливають на рух кабіни. Це рівняння є базовим у процесі розрахунку навантаження на тяговий привід і дозволяє точно встановити значення сили, яку повинен реалізовувати електропривід у кожній фазі руху - як під час розгону, так і при гальмуванні або усталеному русі [10].

$$F_{\text{дин}} = F_{\text{дв}} - F_{\text{см}}; \quad (2.21)$$

Звідки:
$$F_{\text{дв}} = F_{\text{дин}} + F_{\text{см}}; \quad (2.22)$$

$$F_{\text{см}} = G - \alpha \cdot G_H + (H - 2 \cdot X) q_k; \quad (2.23)$$

$$F_{\text{дв}} = G - \alpha G_H + (H - 2X) \cdot q_k + ma = F_{\text{см}} + ma; \quad (2.24)$$

$$G = G_H = Q_n \cdot g = 1000 \cdot 9.8 = 9800H; \quad (2.25)$$

$$X' = 2 \cdot L_{p2} = 2 \cdot 2.1675 = 4.335; \quad (2.26)$$

$$F_{\text{см}0} = G - \alpha \cdot G + (H - 2 \cdot 0) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (77,2 - 2 \cdot 0) \cdot 3.5 = 5170H; \quad (2.27)$$

$$F_{\text{дв}0} = F_{\text{см}0} + (Q + m_k) \cdot a = 5170 + (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 6230H; \quad (2.28)$$

$$F_{\text{см}1} = G - \alpha \cdot G + (H - 2 \cdot L_{p2}) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (77,2 - 2 \cdot 2.1675) \cdot 3.5 = 5155,0275H; \quad (2.29)$$

$$F_{\text{дв}1} = F_{\text{см}1} + (Q + m_k) \cdot a = 5155,0275 + (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 6215,0275H; \quad (2.30)$$

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						28
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Графічне зображення діаграми рушійних зусиль під час вертикального переміщення пасажирів у кабіні ліфта супроводжується трьохфазною тахограмою ліфтової підйомної установки (ЛПУ). Ця комплексна діаграма дозволяє проаналізувати взаємозв'язок між швидкісним режимом руху (розгін – сталий рух – гальмування) та динамічними навантаженнями, які реалізує приводна система у відповідні періоди робочого циклу.

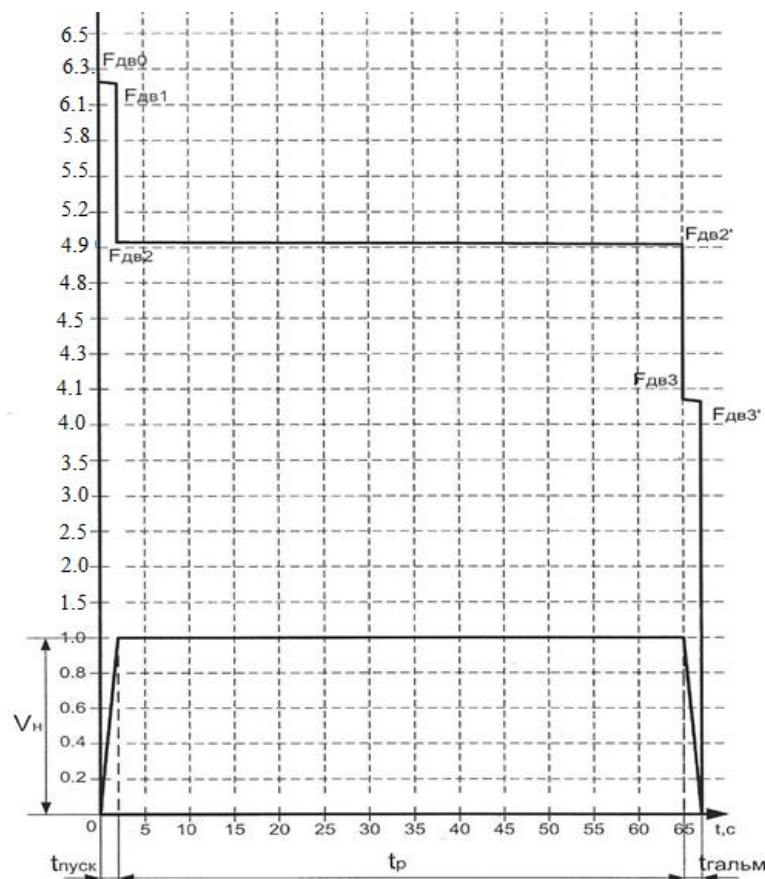


Рисунок 2.3 – Діаграма підйому

Рівняння статичних зусиль у ліфтовій підйомній установці (ЛПУ) для тягового каната при русі кабіни вниз описує розподіл сил у системі у момент, коли ліфт перебуває у стані рівномірного спуску або статичного утримання в нижній фазі переміщення. Це рівняння враховує дію ваги кабіни з пасажирями, противаги, а також опору тертя в напрямних та підшипниках. У загальному вигляді статичне рівняння сили натягу каната при спуску має вигляд [12] :

$$F_{cm} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot X - H) \cdot q_k; \quad (2.37)$$

$$F_{\partial 6} = G - \alpha G_H + (2 \cdot X - H) \cdot q_k + ma = F_{cm} + ma; \quad (2.38)$$

$$F'_{cm0} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot 0 - H) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 0 - 77,2) \cdot 3.5 = 4629,8H; \quad (2.39)$$

$$F'_{\partial 60} = F'_{cm0} + (Q + m_k) \cdot a = 4629,8 + (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 5689,8H; \quad (2.40)$$

$$F'_{cm1} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot L_{p2} - H) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 2.1675 - 77,2) \cdot 3.5 = 4644,9725H; \quad (2.41)$$

$$F'_{\partial 61} = F'_{cm1} + (Q + m_k) \cdot a = 4644,9725 + (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 5704,9725H; \quad (2.42)$$

$$F'_{\partial 62} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot L_{p2} - H) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 2.1675 - 77,2) \cdot 3.5 = 4644,9725H; \quad (2.43)$$

$$F'_{cm2} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot X' - H) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 4.335 - 77,2) \cdot 3.5 = 4660,145H; \quad (2.44)$$

$$F'_{\partial 62} = F'_{cm2} = 4660,145H; \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} F'_{\partial 63} &= G - \alpha \cdot G + (2 \cdot L_{p2} - H) \cdot q_k - (m_k + Q) \cdot a = \\ &= 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 2.1675 - 77,2) \cdot 3.5 - (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 3584,9725H; \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$F'_{cm3} = G - \alpha \cdot G + (2 \cdot X' - H) \cdot q_k = 9800 - 0.5 \cdot 9800 + (2 \cdot 4.335 - 77,2) \cdot 3.5 = 4660,145H; \quad (2.47)$$

$$F'_{\partial 63} = F'_{cm3} - (Q + m_k) \cdot a = 4660,145 - (1000 + 1120) \cdot 0.5 = 3600,145H; \quad (2.48)$$

На наступному графіку подано діаграму рушійних зусиль під час підйому пасажирів, побудовану у поєднанні з тахограмою роботи ліфтової підйомної установки (ЛПУ). Ця діаграма ілюструє зміну зусиль у приводі відповідно до

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						30
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трьохфазного режиму переміщення кабіни: розгін – сталий рух – гальмування, що дозволяє всебічно проаналізувати динамічне навантаження на систему у процесі вертикального транспортування [14].

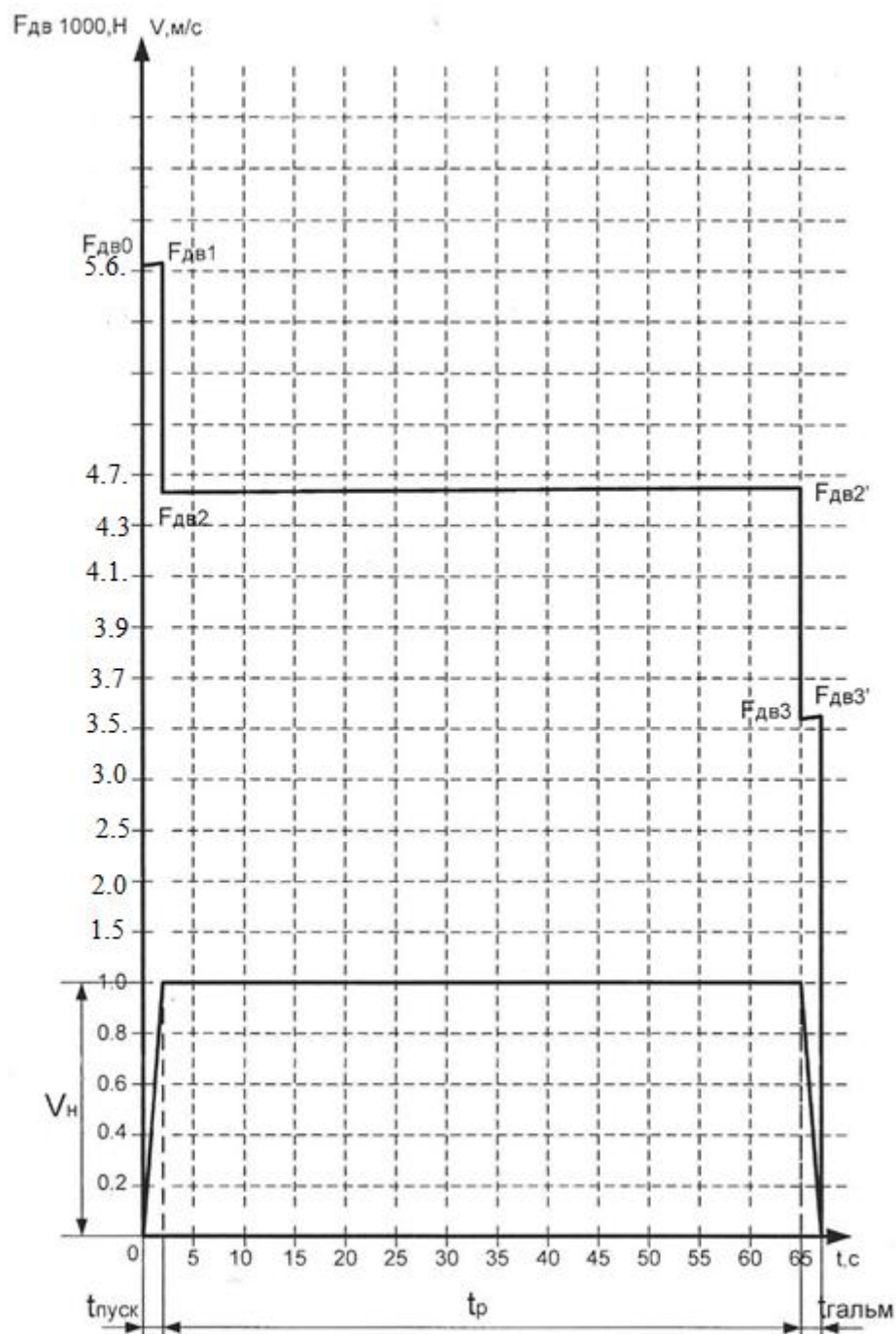


Рисунок 2.4 – Діаграма спуску

У процесі проєктування приводу ліфтової установки можливе використання різних методів розрахунку номінальної потужності електродвигуна, зокрема [15]:

- Метод еквівалентного струму, який ґрунтується на експериментальних даних, отриманих зі струмової діаграми реальної роботи приводу. Цей підхід дає змогу врахувати середньозважене навантаження двигуна в динамічному режимі, однак передбачає, що в розрахунках приведені мас (або моментів інерції) вже наявні попередні оцінки параметрів двигуна. Через те, що конкретна модель електроприводу ще не обрана, значення електромеханічних параметрів приймаються орієнтовно, із дотриманням рекомендацій галузевих нормативів і типових значень [15].

- Метод, заснований на використанні статичних характеристик, передбачає побудову графіків тягових характеристик для кількох ключових сценаріїв роботи підйомного механізму [15]:

- підйом повністю завантаженої кабіни до верхнього поверху;
- підйом порожньої кабіни;
- спуск кабіни з номінальним вантажем;
- спуск пустої кабіни.

Порівняння навантажень у різних режимах дозволяє визначити критичні точки роботи приводу та забезпечити достатній запас потужності на випадок пікових навантажень або втрати стабільності параметрів мережі живлення.

У межах цього проєкту розрахунок потужності приводного електродвигуна буде здійснено на основі формул еквівалентних рушійних зусиль, що відповідають режиму підйому ліфта при повному завантаженні кабіни. Такий підхід дозволяє врахувати максимальне навантаження на систему і забезпечити достатню потужність двигуна для стабільної роботи в умовах інтенсивної експлуатації [14].

$$F_1 = \frac{F_{\partial 60} + F_{\partial 61}}{2} = \frac{6230 + 6215,0275}{2} = 6222,51H; \quad (2.49)$$

$$F_2 = \frac{F_{\partial 62} + F_{\partial 62'}}{2} = \frac{4170,8275 + 5134,855}{2} = 4652,84125H; \quad (2.50)$$

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						32
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_3 = \frac{F_{\partial 63} + F_{\partial 63'}}{2} = \frac{4095,0275 + 4079,855}{2} = 4087,44125H; \quad (2.51)$$

$$F_{екв} = \sqrt{\frac{F_1^2 t_{p2} + F_2^2 t_p + F_3^2 t_{p2}}{T_u}} = \sqrt{\frac{6222,51^2 \cdot 1.7 + 4652,84125^2 \cdot 29,146 + 4087,44125^2 \cdot 1.7}{76,592}} =$$

$$= \sqrt{\frac{65823372,19 + 630979763,3 + 28402199,15}{76,592}} = 3077,080017H; \quad (2.52)$$

$$M_{екв} = F_{екв} \cdot \frac{D}{2} = 3077,080017 \cdot \frac{0.517}{2} = 795,43H \cdot m; \quad (2.53)$$

Для обчислення потужності приводного електродвигуна ліфтової підйомної установки (ЛПУ) необхідно виконати приведення еквівалентного моменту, що діє на канатоведучому шківі, до умов роботи на валу електродвигуна. Це дозволяє врахувати зменшення або збільшення моменту в залежності від передавального відношення редукторного механізму або іншої трансмісійної частини.

Таким чином, загальна потужність двигуна визначається не лише еквівалентним моментом і кутовою швидкістю, а й обов'язково коригується шляхом ділення на ККД системи, що дозволяє врахувати всі внутрішні втрати енергії та забезпечити достовірність розрахунку:

$$M_{екв.дв} = \frac{M_{екв}}{i_p \cdot \eta} = \frac{795,43}{10 \cdot 0.8} = \frac{795,43}{8} = 99,43H \cdot m; \quad (2.54)$$

$$\omega_{дв} = \frac{2 \cdot V \cdot i_p}{D} = \frac{2 \cdot 2.5 \cdot 10}{0.517} = 96.7 \text{ рад / с}; \quad (2.55)$$

$$P_{екв.дв} = M_{екв.дв} \cdot \omega_{дв} \cdot \kappa_3 = 99,43 \cdot 96.7 \cdot 1.1 = 10576,3691Bm; \quad (2.56)$$

$$\text{ПВ}_д = \frac{T_p}{T_u} \cdot 100 = \frac{70}{76} \cdot 100 = 92\%; \quad (2.57)$$

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						33
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{ПВном}} = P_{\text{екв.дв}} \sqrt{\frac{P_{\text{Вд}}}{P_{\text{Вн}}}} = 10576.3691 \cdot \sqrt{\frac{92}{100}} = 10144,5 \text{ Вт}; \quad (2.58)$$

На основі отриманих розрахункових даних щодо необхідного моменту, потужності та швидкісних характеристик приводу, для забезпечення надійної та ефективної роботи ліфтової установки обрано АД 4А160S6У3. Даний тип двигуна відповідає встановленим вимогам щодо енергоспоживання, габаритів, надійності та режиму роботи, а також сумісний із частотним перетворювачем, передбаченим у системі керування.

Для подальшого аналізу режимів роботи приводу виконаємо розрахунок параметрів Т-подібної еквівалентної схеми заміщення, яка дозволяє моделювати електромеханічні характеристики асинхронного двигуна та визначити його поведінку при змінних навантаженнях. Така схема використовується для розрахунку пускового моменту, струму, ковзання та інших динамічних показників у нормальному і перехідному режимах.

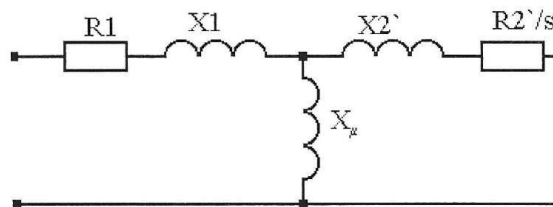


Рисунок 2.5 – Т-подібна схема АД

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{сл}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.393 \text{ В}; \quad (2.64)$$

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2\text{н}}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi} = \frac{11000}{3 \cdot 220 \cdot 0.86 \cdot 0.86} = \frac{11000}{488.136} = 22.5 \text{ А}; \quad (2.65)$$

$$Z_n = \frac{U_{\text{нф}}}{I_{\text{нф}}} = \frac{220}{22.5} = 9.8 \text{ Ом}; \quad (2.66)$$

$$R_1 = R_1' \cdot Z_n = 0.073 \cdot 9.8 = 0.714 \text{ Ом}; \quad (2.67)$$

$$R_2 = R_2'' \cdot Z_n = 0.0429 \cdot 9.8 = 0.42 \text{ Ом}; \quad (2.68)$$

$$X_1 = X_1' \cdot Z_n = 0.128 \cdot 9.8 = 1.2544 \text{ Ом}; \quad (2.69)$$

$$X_2 = X_2'' \cdot Z_n = 0.128 \cdot 9.8 = 1.2544 \text{ Ом}; \quad (2.70)$$

$$X_\mu = X_\mu' \cdot Z_n = 1.7952 \cdot 9.8 = 17.59296 \text{ Ом}; \quad (2.71)$$

На наступному етапі розрахунку визначимо електромагнітні параметри асинхронного двигуна, зокрема [16]:

- індуктивність полів розсіювання для обмоток статора та ротора;
- індуктивність обмоток статора й ротора, що враховує не лише розсіювання, а й основний потік;
- індуктивність магнітного контуру намагнічування, яка характеризує здатність осердя до створення основного потоку збудження.

Обчислення зазначених параметрів є необхідним для формування повної Т-подібної еквівалентної схеми заміщення, яка застосовується для моделювання електромагнітних процесів у приводі під час запуску, сталого режиму та гальмування [17].

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3} = 104.72 \text{ рад / с}; \quad (2.72)$$

$$L_{\sigma 1} = \frac{X_1 \cdot Z_n}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.128 \cdot 9.8}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0.00399 \Gamma_{\text{H}}; \quad (2.73)$$

$$L_{\sigma 2} = \frac{X_2 \cdot Z_n}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0.128 \cdot 9.8}{314.16} = 0.00399 \Gamma_{\text{H}}; \quad (2.74)$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}' \cdot Z_n}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1.7952 \cdot 9.8}{314.16} = 0.056 \Gamma_{\text{H}}; \quad (2.75)$$

$$L_1 = L_{\mu} + L_{\sigma 1} = 0.056 + 0.00399 = 0.06 \Gamma_{\text{H}}; \quad (2.76)$$

$$L_2 = L_{\mu} + L_{\sigma 2} = 0.056 + 0.00399 = 0.06 \Gamma_{\text{H}}; \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} J_m &= (m_K + m_{\Pi} + q_K \cdot H + Q) \cdot \left(\frac{R_{\text{ш}}}{i_p} \right)^2 = \\ &= (945 + 1345 + 3.5 \cdot 76 + 800) \cdot \left(\frac{0.517}{2 \cdot 10} \right)^2 = 2.242555 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \end{aligned} \quad (2.78)$$

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_m = 2.242555 + 0.138 = 2.38 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.79)$$

$$X_K = X_1 + X_2 = 1.2544 \cdot 2 = 2.5088 \text{ Ом}; \quad (2.80)$$

Згідно з розрахунковим передаточним числом та визначеним значенням потужності, що передається на швидкохідний вал, для даної конструкції обрано черв'ячний редуктор, зокрема РГСЛ–160, у якій ведучим елементом виступає колесо.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Встановлення та експлуатація редуктора допускаються лише за умови під колесом, що забезпечує оптимальні умови мастила та тепловідведення. Даний тип редуктора ефективно працює як за постійних, що супроводжуються періодичними пусками й зупинками, у режимі як однонаправленого обертання черв'яка, так і реверсивного руху.

У випадках, коли редуктор експлуатується у безперервному режимі роботи, для забезпечення надійної довготривалої роботи необхідно знизити 40% від номінального значення.

Однією з основних переваг, що відрізняє цей тип редуктора у складі ліфтового приводу, є його здатність витримувати на вихідному валу. При цьому зберігається стабільний обертальний момент, незалежно від передаточного числа трансмісії, що є особливо важливим для забезпечення рівномірного та плавного підйому/спуску кабіни [15].

Згідно з умовами типового використання, редуктор розрахований на роботу при номінальній частоті обертання черв'яка 1000 об/хв. У разі підвищення частоти до 1500 об/хв допускається експлуатація за умови зменшення обертального моменту на 20% від номінального значення.

Редуктор виконаний у литому корпусі з ліхтарем, який передбачає фланцеве кріплення електродвигуна, що забезпечує компактне та жорстке з'єднання у приводному вузлі. Конструкція корпусу включає основну кришку редуктора, а також кришки підшипникових вузлів, які, як і корпус, виготовлені з високоміцного сірого чавуну, що забезпечує достатню жорсткість і вібраційну стійкість.

Глобоїдний черв'як виготовляється з термічно обробленої легованої сталі, що забезпечує високу зносостійкість, міцність і довговічність поверхонь зачеплення. У свою чергу, вінець глобоїдного колеса виконаний із високоолов'янистої бронзи, що забезпечує оптимальне поєднання із сталевим черв'яком та сприяє зниженню коефіцієнта тертя, підвищуючи загальний ККД передачі [16].

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						37
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обертальні вузли редуктора змонтовані на комбінованих підшипниках - кулькових та роликових радіально-наполегливих, які забезпечують одночасне сприйняття осьових і радіальних навантажень, що виникають у процесі роботи редуктора при перемінних моментах.

Особливістю глобоїдної пари, використаної в даному редукторі, є її розрахунок за спеціалізованими параметрами геометрії зачеплення, що дозволяє [17]:

- значно скоротити період прироблення (прихоплювання та припасування робочих поверхонь),
- підвищити плавність роботи під час пусків, реверсуваннн й сталого режиму,
- зменшити динамічні навантаження на привод і підвищити ресурс експлуатації.

На підставі розрахованого номінального струму обмотки статора та величини потужності електродвигуна, що використовується в приводі ліфтової установки, було обґрунтовано вибір частотного перетворювача фірми АВВ. Цей виробник є одним із лідерів у галузі інтелектуального електроприводу, а його обладнання забезпечує високоточне регулювання швидкості, захист двигуна від перевантажень, енергозбереження та можливість налаштування параметрів роботи відповідно до умов експлуатації ліфта [15].

Крім того, з урахуванням передаточного числа та особливостей кінематичної схеми приводу, для забезпечення необхідного обертового моменту на валу було обрано черв'ячний редуктор з глобоїдним зачепленням, у якому ведучим елементом є колесо. Така передача забезпечує високу навантажувальну здатність, стабільну роботу при змінних навантаженнях, а також плавність ходу - що є критично важливим для ліфтових систем.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						38
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ САК

Для моделювання роботи асинхронного електроприводу у складі ліфтової системи буде застосовано стандартний алгоритм непрямого векторного керування асинхронним двигуном (АД). Цей метод є одним з найбільш ефективних у сучасних системах змінного струму та широко використовується в приводах, що вимагають високої точності регулювання моменту і швидкості, зокрема в ліфтових, кранах, екструдерах тощо [16].

Керування електромагнітним моментом та модулем вектора потокозчеплення ротора здійснюється шляхом реалізації асимптотично точної орієнтації по вектору магнітного потоку ротора. Це досягається шляхом впровадження нелінійного алгоритму регулювання, який забезпечує декореляцію струмів збудження та моменту, подібно до принципу керування в двигунах постійного струму.

Структура цього векторного алгоритму містить такі функціональні компоненти [17]:

1. Блок оцінювання потокозчеплення ротора - виконує розрахунок вектора потоку за допомогою моделей струму та напруги;
2. Блок генерації вектора струму збудження - формує струм у напрямку вектора магнітного потоку (d-компоненту);
3. Контур регулювання моменту - управляє q-компонентом струму, яка безпосередньо пов'язана з моментом двигуна;
4. Інверсна модель двигуна (зворотна модель) - необхідна для розрахунку команд напруги на основі заданих струмів;
5. ШІМ-модулятор (широтно-імпульсний модулятор) - формує сигнали керування для транзисторів перетворювача частоти;
6. Система зворотного зв'язку за швидкістю і струмами - забезпечує стабілізацію режимів та корекцію похибок в реальному часі.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						39
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування цього алгоритму дозволяє досягти високої динаміки приводу, енергоефективності та плавності керованого руху, що є критичним для комфортного та безпечного функціонування ліфтової установки.

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = e^{J\varepsilon_0} \left[\sigma \begin{pmatrix} -\omega_0 i_q + v_d \\ \omega i_d + v_q \end{pmatrix} \right],$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = e^{-J\varepsilon_0} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix}; e^{J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix};$$
(3.1)

$$i_d^* = \frac{\psi^*}{L_m},$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\psi^*};$$
(3.2)

$$v_d = -k_{id1} \tilde{i}_d + x_d,$$

$$\dot{x}_d = -k_{ii} \tilde{i}_d;$$
(3.3)

$$i_q^* = \frac{1}{\mu} (K_\omega \cdot \tilde{\omega} + x_\omega);$$

$$\dot{x}_\omega = K_{i\omega} \cdot \tilde{\omega};$$
(3.4)

$$v_q = -k_{iq1} \tilde{i}_q + x_q,$$

$$\dot{x}_q = -k_{ii} \tilde{i}_q.$$
(3.5)

Структурна схема стандартного алгоритму непрямого векторного керування асинхронним двигуном (АД) представлена далі. Вона демонструє логічну побудову системи регулювання, що реалізує розділення каналів керування струмом збудження (d-компонента) та моментотворного струму (q-

компонента), забезпечуючи тим самим незалежне керування електромагнітними процесами у машині змінного струму.

Основними параметрами алгоритму (відповідно до рівнянь (3.1)–(3.5)) є коефіцієнти підстроювання пропорційної (Р) та інтегральної (І) складових ПІ-регуляторів струму. Їх налаштування здійснюється відповідно до моделі лінійної динамічної системи другого порядку, яка використовується як еталонна для побудови контурів струмового регулювання [16].

Типова процедура синтезу передбачає, що регулятори налаштовуються так, щоб забезпечити бажану динамічну якість реакції системи, при цьому використовуються характеристичні рівняння системи другого порядку, вигляд яких дозволяє контролювати [17]:

- швидкість відпрацювання завдання;
- стійкість та відсутність коливань;
- точність відтворення бажаного струму.

У процесі налаштування забезпечується виконання співвідношень між коефіцієнтами ПІ-регуляторів, які гарантують відповідність заданим значенням часів наростання, перерегулювання та сталого режиму. Таке підходить забезпечує швидке та стабільне відстеження струму в обмотках двигуна, що критично важливо для векторного керування, де точність формування струмів напряду впливає на динаміку моменту та швидкості [18].

$$k_{ii} = \frac{k_p^2}{4} \text{ при } \xi = 1,$$

$$k_{ii} = \frac{k_p^2}{2} \text{ при } \xi = \sqrt{2}/2, \quad (3.6)$$

У межах моделювання системи керування асинхронним двигуном змінного струму було обрано алгоритм непрямого векторного керування, який забезпечує незалежне регулювання швидкості обертання ротора та модуля потокозчеплення.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						41
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний підхід передбачає реалізацію орієнтації координатної системи відносно вектора магнітного потоку ротора, що дозволяє досягти якісного керування електромагнітними процесами в машині змінного струму на основі принципів, аналогічних до регулювання двигунів постійного струму.

Однією з ключових властивостей даної системи керування є її локальна експоненціальна стійкість. Це означає, що при наявності малих початкових збурень або відхилень, що можуть бути викликані незначними змінами в початкових умовах або впливом шумів, система повертається до рівноваги з експоненційною швидкістю. Інакше кажучи, всі динамічні змінні, які піддаються регулюванню (зокрема - швидкість обертання і значення потокозчеплення), з часом збігаються до своїх заданих значень, що забезпечує стабільне функціонування приводу в межах робочого діапазону [18].

Також зазначений векторний алгоритм гарантує асимптотичне регулювання вихідних параметрів системи, тобто поступове й надійне зменшення відхилення реальних координат стану від бажаних у процесі керування. За умови правильно підібраних параметрів регуляторів та у разі відсутності суттєвих нелінійностей чи зовнішніх збурень, система демонструє високу точність стабілізації та швидкодію.

Наявність точних і постійних значень цих параметрів - критично важлива умова, оскільки на їх основі формується математична модель приводу, яка використовується в алгоритмі керування. У реальних умовах експлуатації значення цих параметрів можуть змінюватися внаслідок температурних коливань, старіння матеріалів, механічного зносу або нестабільності навантаження. Такі зміни можуть призвести до погіршення якості регулювання, збільшення похибки або навіть втрати стійкості в крайніх випадках [19].

Щоб компенсувати цей вплив, в системи непрямого векторного керування доцільно впроваджувати адаптивні або робастні методи регулювання, які дозволяють автоматично коригувати модель керування у відповідь на зміну параметрів реального об'єкта. Це забезпечує високу надійність, стійкість і

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						42
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точність керування навіть в умовах невизначеності або часткової деградації системи.

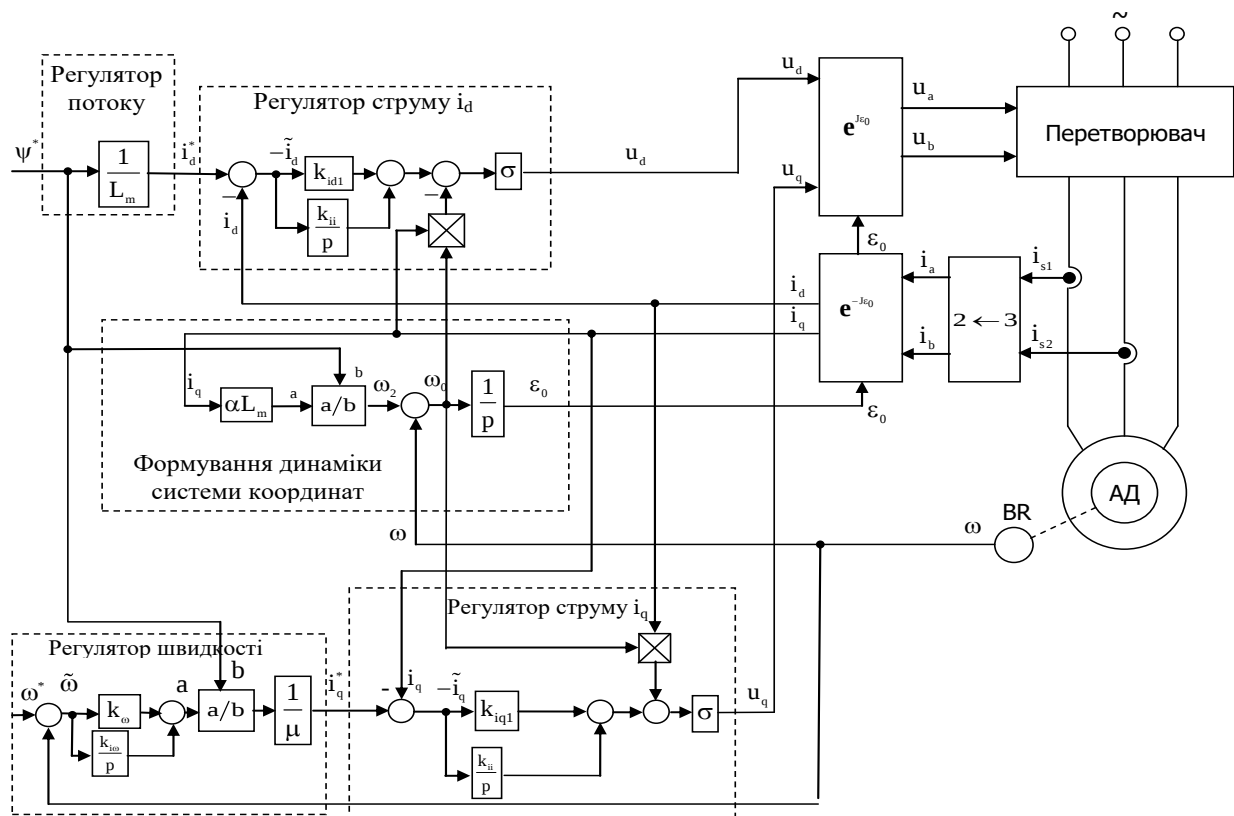


Рисунок 3.1 – Структурна схема АД з ВУ [20]

З метою аналізу динамічних характеристик асинхронного електропривода, який працює під керуванням алгоритму непрямого векторного регулювання, доцільно реалізувати математичну модель об'єкта керування у середовищі Simulink програмного пакета MATLAB версії 7.9. Це середовище надає широкі можливості для моделювання нелінійних багатоконтурних систем автоматичного керування у режимі реального часу [14].

Побудова такої моделі дозволяє дослідити переходи між режимами, поведінку системи при зміні навантаження, пуску, гальмуванні, а також за зовнішніх збурень. Особливу увагу буде приділено впливу параметрів регуляторів (Р, І-компонентів), характеристикам двигуна, моделі інвертора та точності орієнтації за вектором потокозчеплення.

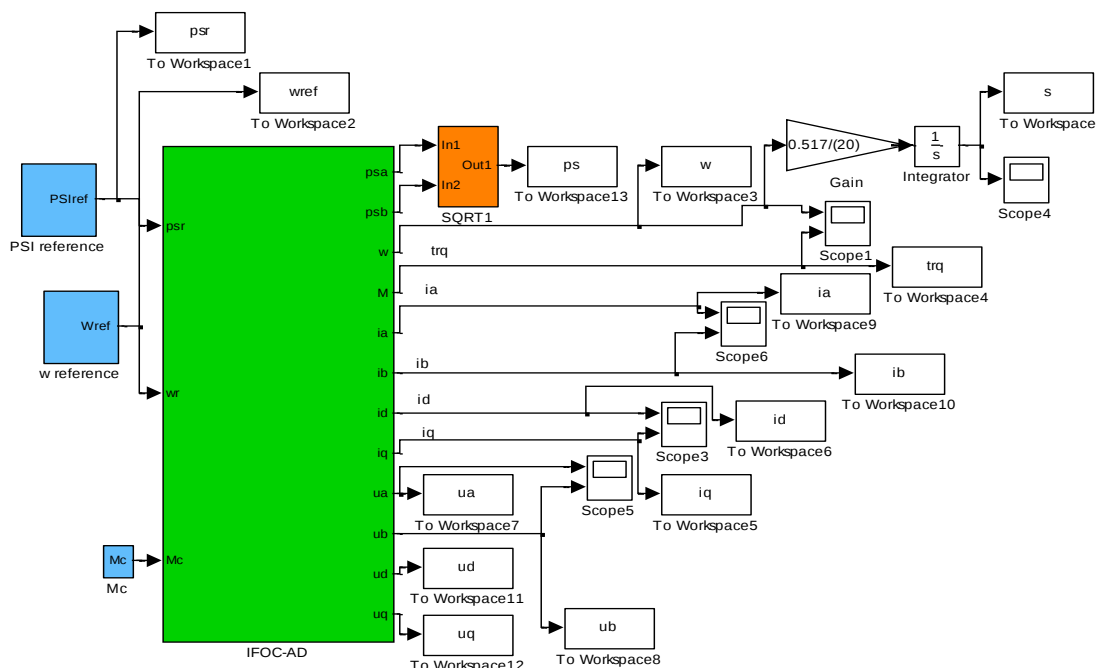


Рисунок 3.2 – Блок IFOC

Для забезпечення детального аналізу функціонування системи керування асинхронним двигуном у режимі векторного керування, нижче подано структуру блоку IFOC-AD (Indirect Field-Oriented Control of Asynchronous Drive), яка реалізована в середовищі Simulink (MATLAB 7.9) у вигляді ієрархічної моделі з окремими функціональними підсистемами [21].

Блок IFOC-AD являє собою центральний елемент моделі векторного електроприводу, який включає такі основні функціональні вузли [21]:

1. Блок перетворення координат (Clark, Park, Inverse Park): Забезпечує перехід між тривимірними координатами фазної системи (ABC) та двовимірними ортогональними системами ($\alpha\beta$ та dq), необхідними для реалізації векторного керування.
2. Контури струмового регулювання (d та q -компоненти): Складені з ПІ-регуляторів, які відповідають за стабілізацію струму збудження та

моментотворного струму, з урахуванням налаштувань, що забезпечують бажану динаміку.

3. Блок оцінювання потокозчеплення ротора: Використовує математичну модель АД для обчислення вектора магнітного потоку ротора на основі виміряних струмів і напруг.

4. Обчислювач кутової швидкості поля (ω_e) та генератор кута: Формує сигнал орієнтації для системи координат, який визначає напрямок потоку в dq-системі.

5. Інверсна модель двигуна (зворотне перетворення струмів у напругу): Використовується для генерації сигналів керування на вхід інвертора (ШІМ-блок).

6. ШІМ-модулятор (PWM): Генерує імпульсні сигнали для керування силовими ключами частотного перетворювача згідно з командами напруги.

7. Модель інвертора та силової частини: Імітує динаміку силового електронного перетворювача та формує напругу на вході двигуна.

8. Модель асинхронного двигуна (АД): Реалізує електромеханічну модель АД у dq-координатах з урахуванням масо-інерційних параметрів і навантаження.

9. Система зворотного зв'язку: Забезпечує подачу виміряних/розрахованих значень струмів, швидкості, потоку на регулятори.

Загальна структура блоку IFOC-AD забезпечує повний замкнутий цикл регулювання, що дозволяє досліджувати перехідні процеси, відгук на навантаження, вплив зміни параметрів двигуна, а також якість формування моменту і швидкості в динамічних режимах.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						45
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

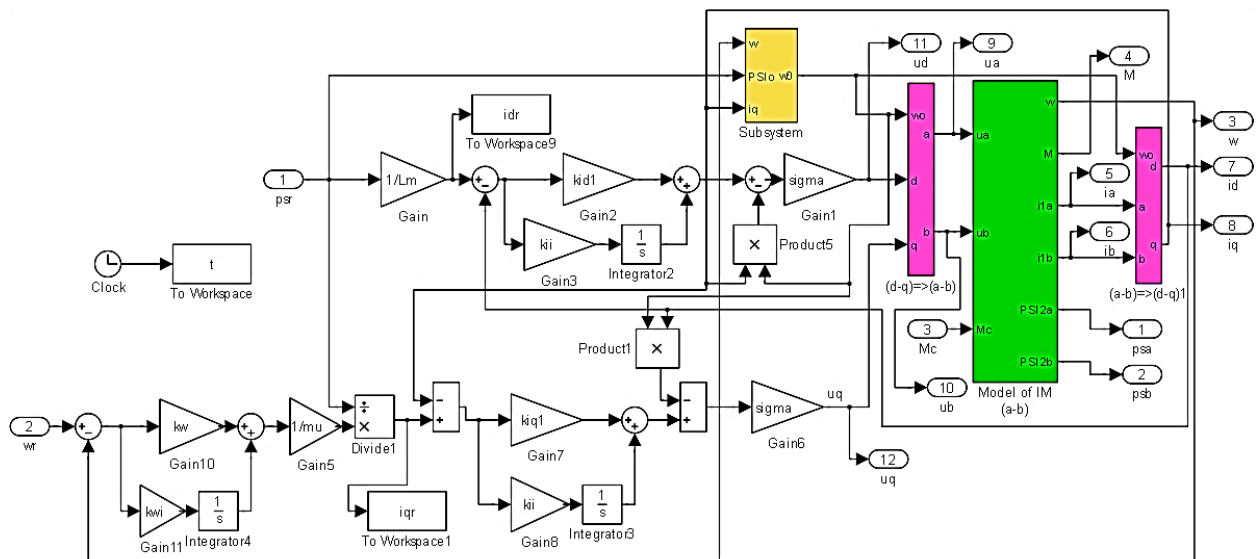


Рисунок 3.3 – Блок IFOC-AD

У структурі моделі векторного керування важливою складовою є блок Model of IM (a-b), який реалізує математичне відображення асинхронного двигуна у двофазній координатній системі $\alpha\beta$ (або a-b), отриманій внаслідок перетворення Кларка. Такий підхід дозволяє спростити опис електромагнітних процесів, скоротивши кількість змінних і забезпечуючи зручність для реалізації у векторних методах керування [21].

Зміст функціональних елементів цього блоку базується на розглянутій вище математичній моделі асинхронного двигуна, яка включає рівняння для обмоток статора та ротора з урахуванням взаємних індуктивностей, ковзання, електромагнітного моменту та механіки обертального руху.

У модулі Model of IM (a-b) враховуються такі ключові процеси [22]:

- Електрична взаємодія між фазами статора та ротора;
- Вплив взаємної індукції та розсіювання на формування потокозчеплення;
- Генерація електромагнітного моменту на основі взаємодії полів;
- Механічна динаміка - обертання ротора з урахуванням моменту інерції та зовнішнього навантаження;
- Облік опору, індуктивності, ковзання, а також зміни частоти.

Вихідними параметрами цього блоку є [23]:

- електромагнітний момент двигуна;
- кутова швидкість ротора;
- миттєві значення струмів у фазах або у двофазній площині;
- потокозчеплення в α - β координатах.

Структурна реалізація блоку Model of IM (a-b) наведена у наступному розділі. Вона включає функціональні підсистеми для обробки електричних та механічних рівнянь, що дає змогу відтворити динаміку АД з високим ступенем наближення до реальних умов [23].

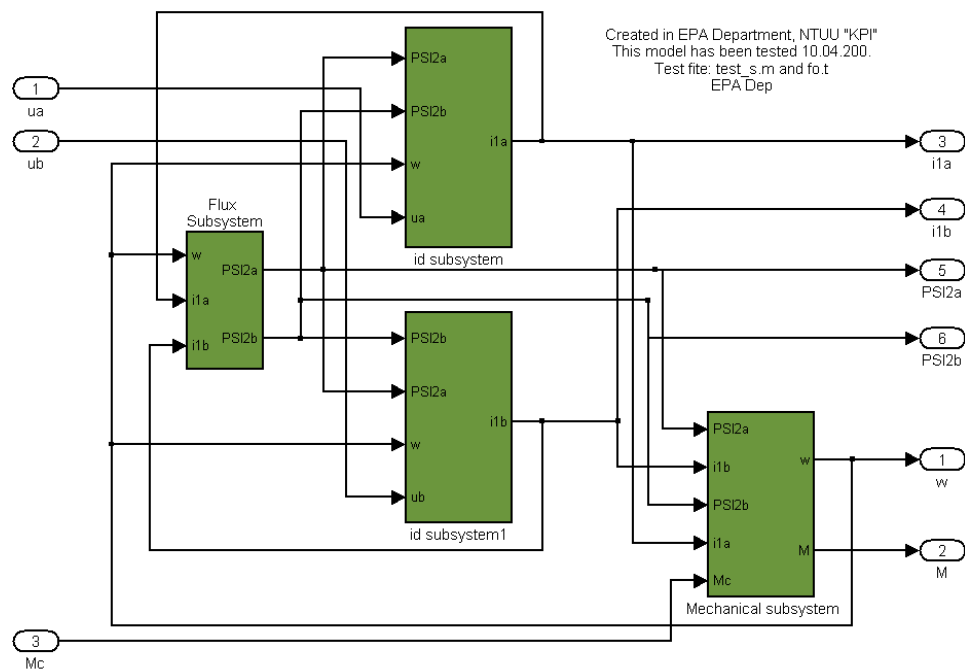


Рисунок 3.4 – Model of IM (a-b)

До даного блоку входять наступні елементи:

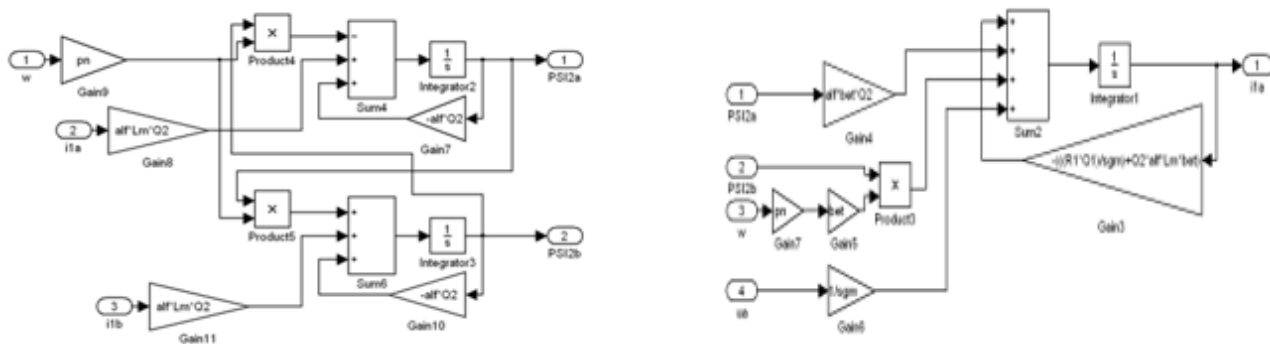


Рисунок 3.5 – Flux Subsystem та i_d Subsystem

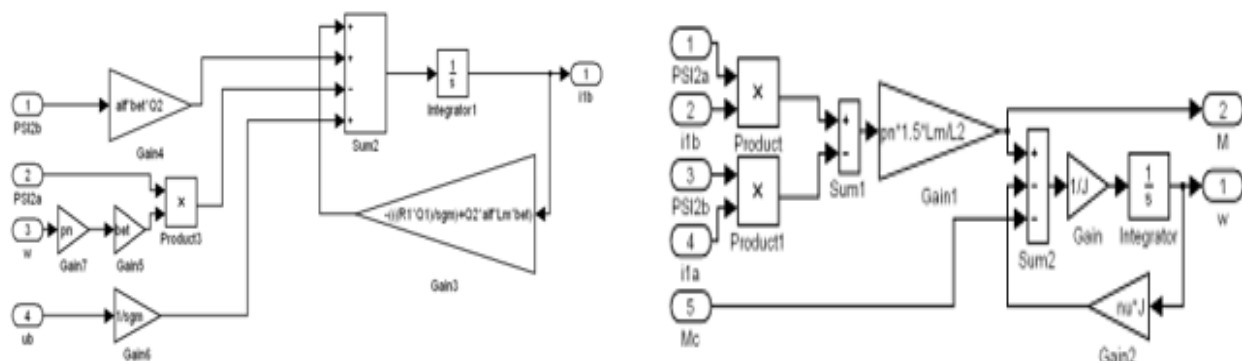


Рисунок 3.6 – Блок i_d Subsystem1 та Mechanical Subsystem

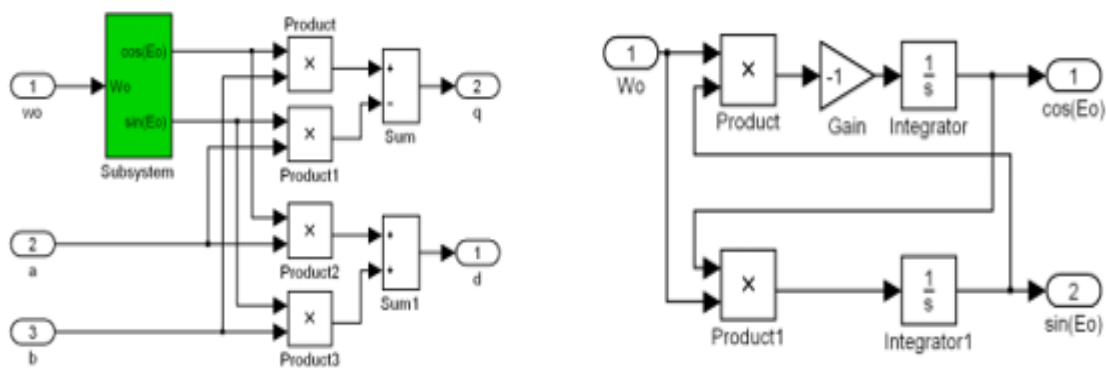


Рисунок 3.7 – Блок (d-q) - (a-b) та Subsystem

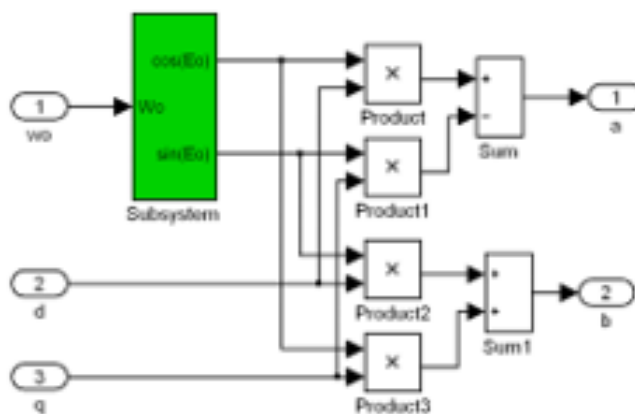


Рисунок 3.8 – Блок (а-б) - (d-q)

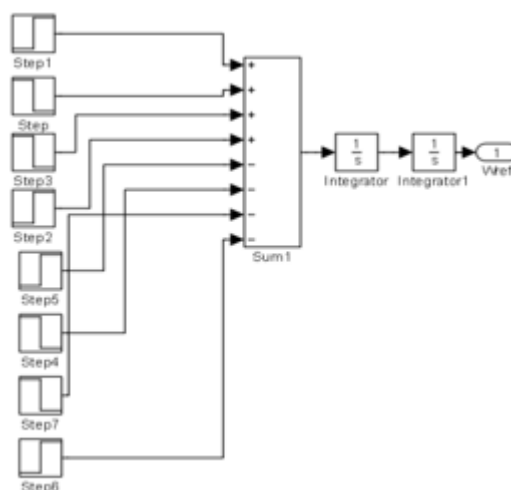


Рисунок 3.9 – Склад блоку W_{ref}

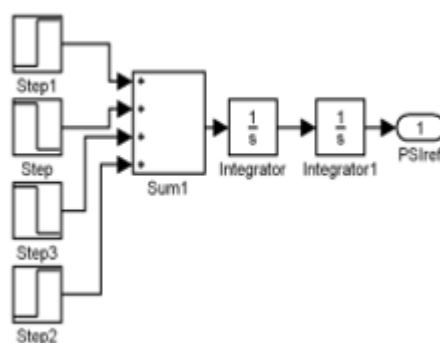


Рисунок 3.10 – Склад блоку PSI_{ref}

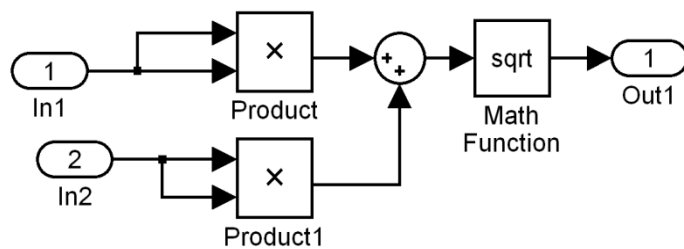


Рисунок 3.11 – Склад блоку SQRT1

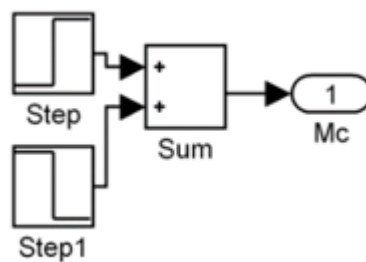


Рисунок 3.12 – Склад блоку Mc

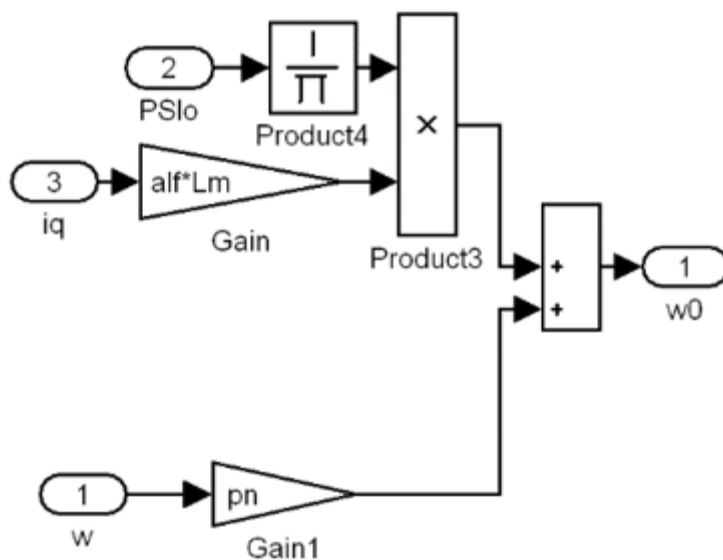


Рисунок 3.13 – Блок Subsystem

Для оцінки поведінки системи в умовах реальної експлуатації було виконано моделювання динамічних режимів роботи підйомного механізму ліфта при русі кабіни на максимальну висоту переміщення. Дослідження проводиться для сценарію, що відповідає підйому пасажирської кабіни на верхній - 25-й поверх, що у фізичному вимірі становить лінійне переміщення 77,2 метра [25].

Для підвищення достовірності результатів розгляд проводиться за умови повного завантаження кабіни, яке приймається на рівні 1000 кг, що відповідає номінальному вантажопідйомному навантаженню ліфта.

У ході моделювання враховуються [26]:

- динамічні характеристики асинхронного електропривода;
- поведінка системи керування в межах алгоритму непрямого векторного регулювання;
- вплив масоінерційних складових;
- параметри підйомного механізму, включаючи редуктор і підвіску.

Графіки перехідних процесів, які ілюструють зміну основних динамічних параметрів (таких як кутова швидкість, струм, момент, положення кабіни тощо) під час підйому на задану висоту, наведено у наступному розділі. Вони дозволяють оцінити якість регулювання, динаміку розгону і гальмування, а також відповідність системи заданим умовам експлуатації.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						51
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

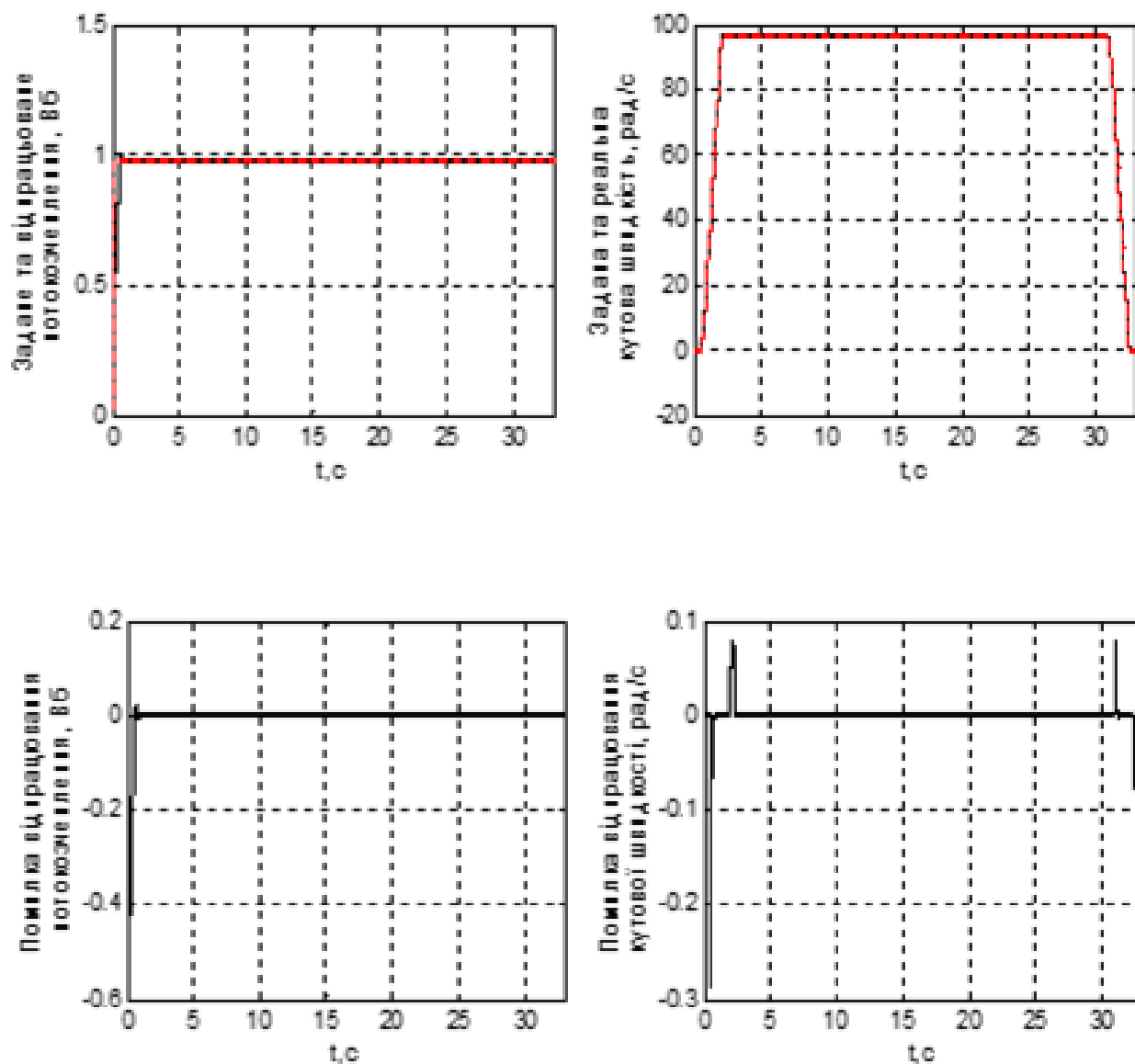


Рисунок 3.14 – Задане ψ^* , помилка $\tilde{\psi}$, задана кутовашвидкість ω^* , реальна швидкість ω , помилка швидкості $\tilde{\omega}$.

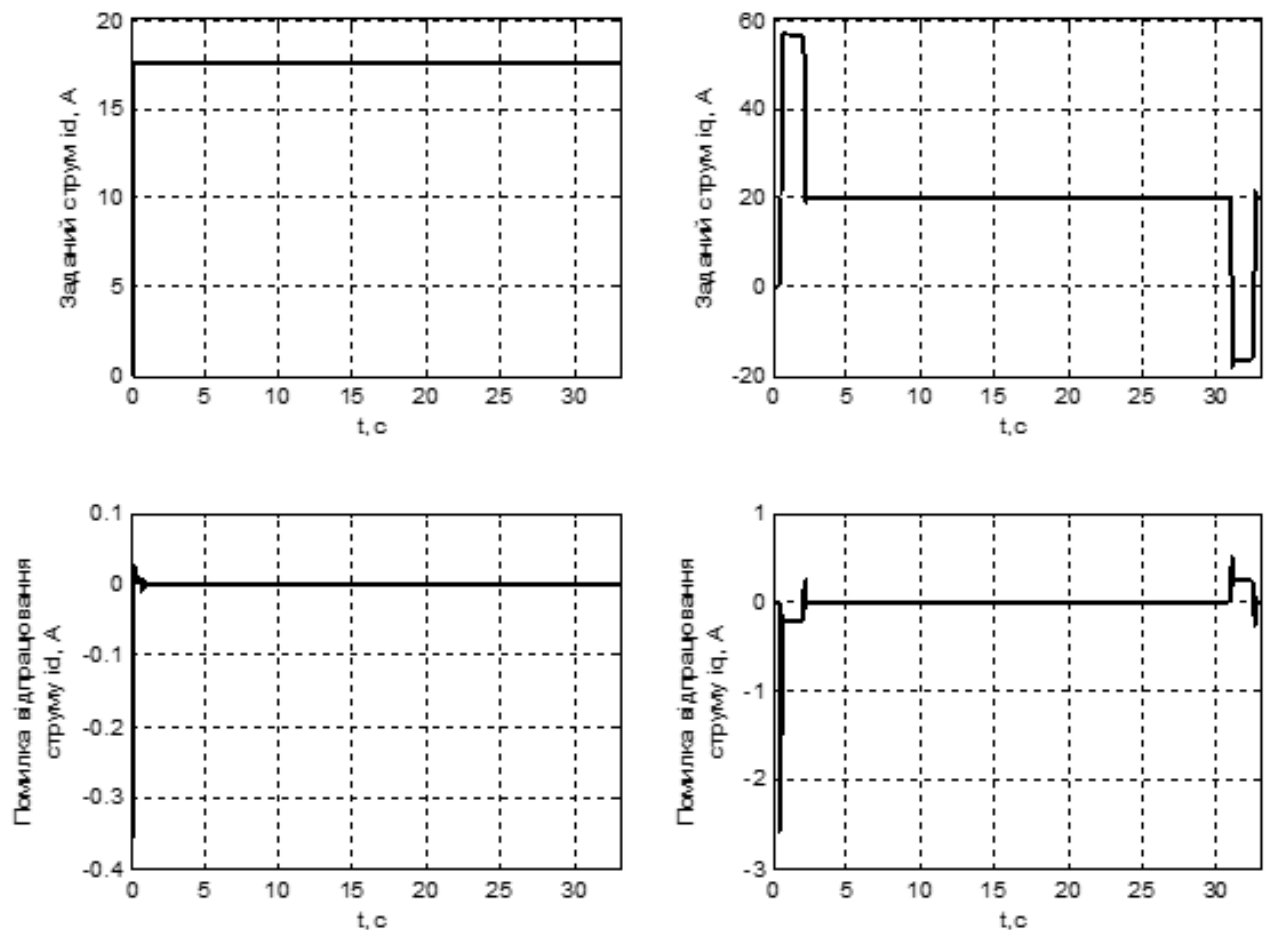


Рисунок 3.15 – Заданий струм та помилка статора.

Для імітації функціонування електроприводної системи ліфта в умовах реального навантаження була прийнята послідовність дій, що відображає типовий режим підйому кабіни на задану висоту. Керування реалізовано у вигляді послідовного сценарію динамічного збудження, розгону, стабілізації та навантаження системи, з урахуванням фізичних обмежень механізму підйому.

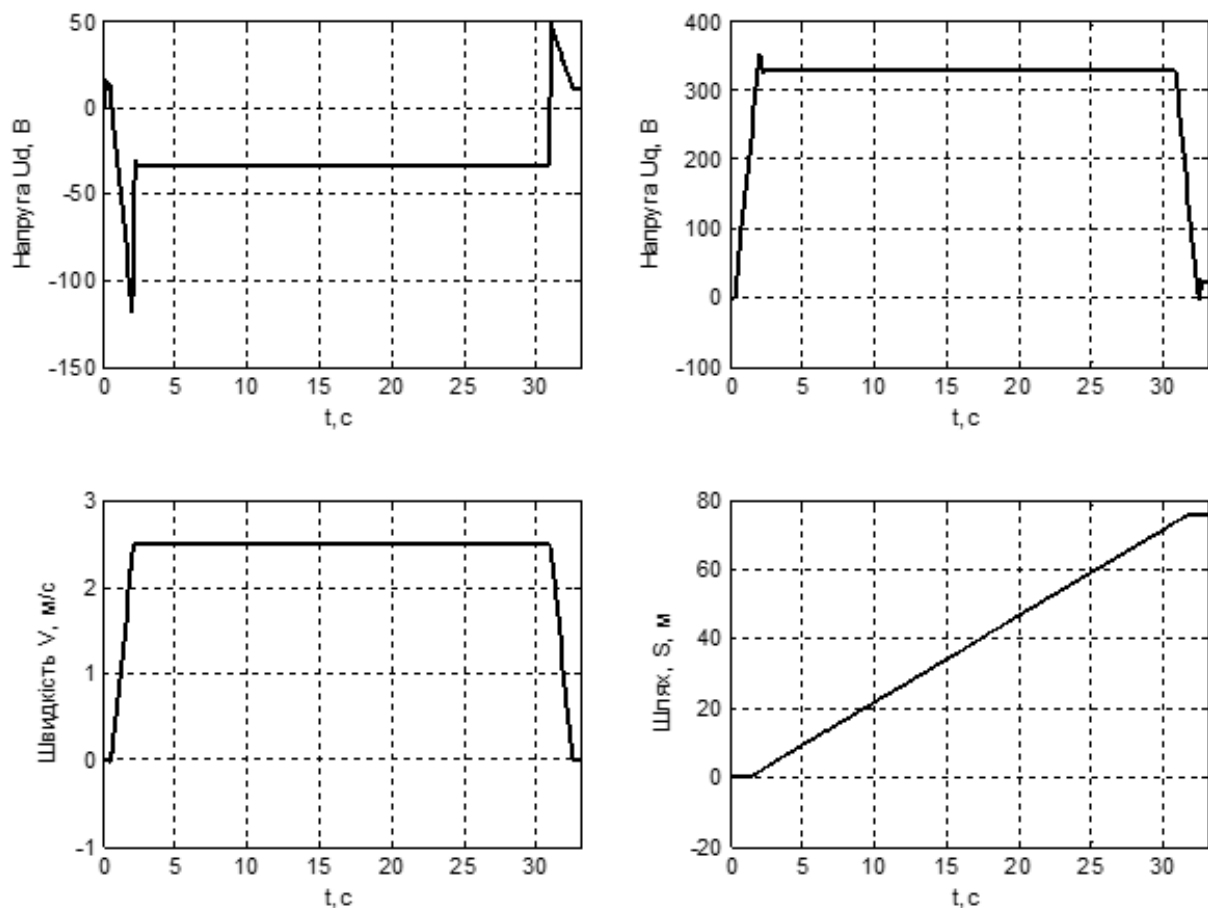


Рисунок 3.19 – Компоненти статора U_d та U_q , швидкість, шлях.

У початковий момент часу, протягом інтервалу від 0 до 0.25 с, відбувається процес збудження асинхронного двигуна. На цій фазі модуль потокозчеплення плавно зростає від початкового значення, рівного приблизно 0 Вб, до 0.96 Вб. Приріст потоку реалізується за лінійною траєкторією з першою похідною (темпом приросту) 3.76 Вб/с, що забезпечує контрольований і плавний перехід у робочий режим.

Починаючи з моменту $t = 0.5$ с, системі подається завдання на розгін до кутової швидкості 96.7 рад/с. Траєкторія зміни швидкості передбачає лінійне прискорення з першою похідною 63.28 рад/с² та другою похідною (тобто «ривком») — 372 рад/с³, що відповідає кінематичним обмеженням механізму.

Одночасно, в цю ж мить на систему накладається зовнішній статичний момент навантаження, що імітує підйом повністю завантаженої кабіни (1000 кг).

Як свідчать результати моделювання, розгін двигуна відбувається відповідно до заданої лінійної траєкторії з прискоренням 1.5 м/с^2 , що повністю відповідає граничному допустимому значенню для системи пасажирського ліфта згідно з нормами комфорту.

Оцінка якості відпрацювання сигналів керування

У початковій фазі відпрацювання траєкторії спостерігається невелика похибка за модулем потокозчеплення, яка досягає максимуму 0.48 Вб. Вона обумовлена нульовим стартовим значенням потоку та швидким переходом до робочого режиму, однак швидко компенсується регулюючим контуром.

При накладанні навантаження виникає перехідна похибка по швидкості розміром 0.28 рад/с, яка практично миттєво усувається ПІ-регулятором швидкості завдяки високій динаміці регулювання.

Компонента струму збудження (i_d), що відповідає за підтримання магнітного потоку, чітко повторює траєкторію потокозчеплення. В усталеному режимі вона сягає значення 17.5 А, а відхилення від траєкторії помітні лише у початковій фазі, де ПІ-регулятор ефективно компенсує похибку.

Моментна компонента струму (i_q) на етапі розгону зростає до 56.8 А, стабілізується на рівні 20.1 А при русі з постійною швидкістю та зменшується до 16.5 А під час гальмування. Похибка струму i_q під час зміни навантаження не перевищує 2.6 А і також повністю усувається регулятором струму.

Максимальна напруга по q-осі (U_q) в усталеному стані досягає 327.8 В, що є допустимим рівнем для стандартної силової частини частотного перетворювача.

Кінематичні параметри кабіни

Лінійна швидкість переміщення кабіни повністю корелює з профілем кутової швидкості приводу і досягає максимального значення 2.5 м/с, що також відповідає встановленим нормативам. Криву переміщення вдалося отримати з

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

точністю, яка забезпечує позиціонування з похибкою не більше 0.5 мм, що вважається дуже високим результатом для систем ліфтового типу.

Було зроблена реалізація алгоритму непрямого векторного керування в моделі приводу ліфтової системи демонструє високу точність і динамічну стабільність відпрацювання швидкісного завдання, навіть за умов миттєвого прикладання навантаження. Система повністю відповідає технічним вимогам до обмеження швидкості (до 2.5 м/с) і лінійного прискорення (до 1.5 м/с²). Похибка позиціонування кабіни є мінімальною, що свідчить про високу ефективність векторного керування при реалізації функції точного підйому та зупинки.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ВИСНОВКИ

У рамках дипломної роботи було комплексно досліджено та реалізовано електромеханічну систему частотного регулювання положення на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором. На початковому етапі було проведено класифікацію подібних систем, а також виконано огляд та аналіз найпоширеніших кінематичних схем, що використовуються в подібних електроприводах. На основі технічного та функціонального порівняння було обґрунтовано доцільність вибору конкретної кінематичної структури, яка й стала основою для побудови системи в межах даного проєкту.

У подальшому було сформульовано та деталізовано технічні вимоги до автоматизованої системи електроприводу, яка забезпечує частотне регулювання положення виконавчого органу. Для реалізації приводу було здійснено розрахунок електродвигуна, на підставі якого було обрано асинхронну машину серії 4A160S6Y3 з номінальною потужністю 11 кВт. Також було виконано розрахунок статичних навантажень, побудовано діаграми рушійних зусиль, що дозволили оцінити механічне навантаження в робочих режимах системи.

Особливу увагу приділено системі керування електроприводом. В дипломному проєкті було детально описано та реалізовано стандартний алгоритм непрямого векторного керування асинхронним двигуном, що забезпечує незалежне керування потокозчепленням і моментом. Для верифікації теоретичних рішень розроблено математичну модель електроприводної системи в середовищі Simulink (MATLAB 7.9). Всі функціональні блоки моделі були описані, а результати моделювання проаналізовано для різних динамічних режимів.

					ЕМКС 209006 000 ПЗ	Арк.
						57
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		