

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,  
ІНФОРМАЦІЙНОЇ  
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**СТВОРЕННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО  
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНИХ  
ЛІФТОВИХ ЛЕБІДОК**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

**Здобувач:**

Владислав ЛИПСЬКИЙ  
гр. ЕТ 2022-1

**Керівник:**

Віталій КОЛОТІЛО  
Старш. викл, к.т.н.

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної  
інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ

2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

**Липський Владислав Віталійович**

прізвище, ім'я, по батькові

1. **Тема роботи:** Створення регульованого частотно-керованого асинхронного електропривода для безредукторних ліфтових лебідок

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи Колотіло Віталій Іванович, к.т.н.

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

затверджені наказом університету від 22.05.2026 №440-03

2. **Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи**  
15.06.2026 р.

3. **Вихідні дані до бакалаврської роботи** Матеріали переддипломної практики, статистичні дані по надійності та відмовам транспортних засобів, літературні джерела по експлуатації, обслуговуванню та ремонту обладнання.

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

4.1. **Стан питання (огляд, аналіз, оцінка)**

Огляд стану парку ліфтів в Україні. Конструкція та робота ліфтів.

4.2. **Розробка технічного завдання (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо, розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)**

Розробка математичної моделі механічної та електричної частини

4.3 **Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення)**

Підбор обладнання. Будова системи управління. Та моделювання

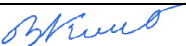





4.4. **Охорона праці.**

Шкідливі фактори при роботі обладнання та небезпека

## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

1. Титульний.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Мета, задачі, актуальність роботи.
4. Загальний вид ліфта
5. Кінематичні схеми
6. Типи лебідок
7. Математичні моделі
8. Характеристики тихохідного асинхронного двигуна
9. Обладнання лебідки
10. Система керування електроприводом підйомної лебідки ліфта
11. Результати моделювання
12. Висновки

## 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

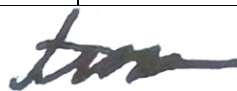
Розділ	Ім'я Прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Віталій КОЛОТІЛО		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	В'ячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 16.05.2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	23.05 – 29.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	30.05 – 05.06.2026	
3	Розрахункова частина	06.06 – 12.06.2026	
4	Охорона праці	06.06 – 12.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	06.06 – 12.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	12.06 – 20.06.2026	

Здобувач




**Владислав ЛИПСЬКИЙ**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи



**Віталій КОЛОТІЛО**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## Анотація

Випускна кваліфікаційна робота включає 76 сторінки та містить 24 рисунків, 10 таблиць, 11 джерел та 4 додатків.

*Ключові слова:* тихохідний асинхронний двигун, перетворювач частоти, ліфт, без редукторна лебідка.

Основна мета дослідження - виконати розрахунок та провести аналіз електроприводу ліфта на базі системи "перетворювач частоти - асинхронний двигун з короткозамкненим ротором", оснащеною без редукторною лебідкою, а також здійснити підбір необхідного обладнання.

В рамках роботи проведено огляд різних ліфтових систем, обґрунтовано вибір тихохідного асинхронного двигуна, безредукторної ліфтової лебідки та елемента керування.

Були виконані розрахункові та аналітичні роботи з обраного асинхронного двигуна та його механічної системи. Побудовано механічні та електромеханічні характеристики двигуна.

Результати дослідження представлені у вигляді перехідних характеристик, одержаних з використанням розробленої імітаційної моделі у середовищі MATLAB R2014b. Усі розрахункові дані опрацьовані із застосуванням програми MATHCAD 15.

### Визначення

У рамках цієї роботи застосовуються такі терміни з їх відповідними значеннями:

**Асинхронний двигун** - електрична машина змінного струму, у якої частота обертання ротора відрізняється від частоти обертання магнітного поля, створюваного струмом в статорній обмотці.

**Буфер** - пристрій, призначений для амортизації і зупинки кабіни, що рухається, або противаги при виході за межі робочих положень.

**Ліфтова лебідка** – електромеханічний пристрій, що створює тягове зусилля, необхідне забезпечення вертикального переміщення кабіни ліфта.

**Ліфт** - стаціонарний вантажопідйомний засіб, що працює в режимі періодичного включення; використовується для переміщення людей або вантажів вгору та вниз.

**Ліфтове обладнання** – окремі компоненти, що входять до складу повної ліфтової установки.

**Уловлювачі** – система безпеки, призначена для зупинки та фіксації кабіни або противаги у напрямних при перевищенні допустимої швидкості роботи або обриві тягових елементів.

**Машинне приміщення** – приміщення, в якому розміщується обладнання до роботи ліфта.

**Перетворювач частоти** – пристрій, що перетворює змінний струм (напруга) однієї частоти змінний струм (напруга) іншої частоти.

**Точність зупинки кабіни** – вертикальна відстань між рівнем підлоги кабіни та поверховим майданчиком після автоматичної зупинки кабіни.

**Шахта** – простір, в якому розташовуються елементи ліфтової системи, включаючи кабіну, противагу та уловлювачі.

**Електричний привід** - електромеханічний пристрій, призначений для приведення в рух виконавчих частин обладнання та управління їх роботою, забезпечуючи виконання заданого технологічного процесу.

## Зміст

ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ.....	7
ВСТУП .....	8
1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	11
1.1. Стан ліфтового господарства.....	11
1.2. Різновиди ліфтових установок.....	12
1.3. Пристрій та принцип дії .....	14
1.4. Формування списку вимірюваних технологічних параметрів та керуючих впливів, встановлення необхідної точності їх вимірювання та регулювання.....	18
1.5. Розробка ключових вимог щодо здійснення технологічного процесу, визначення критеріїв якості та встановлення цілей управління. ....	19
1.6. Основні вимоги до електроприводу.....	20
1.7. Ліфтові лебідки.....	21
1.8. Тихохідні асинхронні двигуни .....	24
1.8.1 Аналіз тихохідного асинхронного двигуна .....	25
1.9. Перетворювачі частоти для ліфтових механізмів.....	28
2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТИХОХІДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА І МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛІФТОВОЇ ЛЕБІДКИ .....	31
2.1 Математична модель тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....	31
2.2 Математичний опис механічної частини .....	39
3. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ.....	48
3.1 Розрахунок потужності двигуна та його вибір .....	48
3.1.1 Побудова механічних і електромеханічних характеристик.....	49
3.2 Вибір перетворювача частоти.....	51
3.2.1. Технічні характеристики.....	52

3.2.2. Особливості.....	54
3.3 Вибір без редукторної ліфтової лебідки.....	55
3.4 Моделювання без редукторного елекпривода ліфта на основі тихохідного асинхронного двигуна.....	56
3.4.1. Моделювання ТАД у нерухомій системі координат. ....	56
3.5 Створення системи управління ТАД.....	58
3.6 Структурна схема нелінійної системи керування ТАД з векторним керуванням з датчиком швидкості.....	59
3.7 Моделювання тихохідного електроприводу з без редукторною ліфтовою лебідкою.....	61
ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
4.1 Вступ.....	64
4.2 Опис та аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	64
4.2.1. Мікроклімат у приміщенні.....	64
4.2.2. Шум та вібрація.....	65
4.2.3. Недостатня освітленість.....	66
4.3 Аналіз небезпечних факторів.....	66
4.2.4. Загоряння (пожежа).....	67
4.2.5. Електроураження.....	67
4.2.6. Розробка прийняття рішень щодо утилізації відходів.....	68
4.4 Запобігання НС та усунення наслідків.....	68
4.5 Правові та організаційні питання забезпечення безпеки.....	68
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТОК А.....	721
ДОДАТОК Б.....	732

ДОДАТОК В .....	73
ДОДАТОК Г .....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	75

## ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ

**АВ** – автоматичний вимикач.

**ТАД**- Тихохідний асинхронний двигун.

**АІН** – автоматичний інвертор напруги. **ВКР** – випускна кваліфікаційна робота.

**ДСТУ** – державний стандарт.

**КВШ**- канатоведучий шків.

**ККД**- Коефіцієнт корисної дії.

**НД**- Наукове дослідження.

**НТД**- Науково-технічне дослідження.

**НПЛ**– норми пожежної безпеки.

**НС**- Навколишнє середовище.

**ТВ** – тривалість включення.

**ПВБЕЛ** – правила влаштування та безпечної експлуатації ліфтів.

**ПЧ**- Перетворювач частоти.

**ПЗВ**– пристрій захисного вимкнення.

**ШИМ** - широтно-імпульсна модуляція.

**ЕП** – електричний привід.

**ЕП**- Електропостачання.

## ВСТУП

Ліфт є спеціалізованим транспортним пристроєм, призначеним для переміщення людей і вантажів між різними поверхами будівель. Завдяки його використанню стали можливі швидкі та зручні вертикальні перевезення, що особливо важливо для багатоповерхових будівель та шахт. Однією з ключових особливостей ліфта є простота його експлуатації: керувати ним здатний будь-який пасажир, який перебуває у кабіні. Це стало реальністю завдяки впровадженню автоматизованих технологій.

Будучи складним електромеханічним пристроєм, проектування ліфта вимагає дотримання суворих технічних норм та стандартів, встановлених Правилами устрою та безпеки експлуатації ліфтів (ПУБЕЛ). Контроль над виконанням цих вимог всіх етапах – від установки до експлуатації – здійснюють органи та його регіональні підрозділи.

Ліфтові установки поділяються на два основні типи: електричні та гідравлічні. З них найбільшу популярність отримали електричні ліфти завдяки своїй універсальності та високим експлуатаційним характеристикам. Центральним елементом таких ліфтів є підйомний механізм, реалізований з урахуванням електропривода. Крім того, існує безліч варіантів реалізації конструкцій ліфтових систем, що дозволяє адаптувати їх до різних умов експлуатації.

Ця робота присвячена аналізу існуючих ліфтових систем та вивченню перспектив їх подальшого розвитку. В рамках дослідження буде розроблено регульований електропривод із використанням безредукторної ліфтової лебідки. Будуть побудовані механічні та електромеханічні характеристики обраного електродвигуна. Перевірку коректності проектних рішень буде продемонстровано за допомогою комп'ютерної імітаційної моделі, що включає як електропривод, так і механічну частину системи.

## 1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1. Стан ліфтового господарства

Після 25 років експлуатації ліфт має пройти обстеження. Воно показує, чи можна продовжувати роботу обладнання та які вузли потребують ремонту чи заміни. У Києві, наприклад, станом на 01.01.2025 експлуатується 24 999 ліфтів, і 43,4% парку мають термін експлуатації понад 25 років. Ситуацію ускладнюють постійні відключення електроенергії: мешканці очікують не тільки на стабільну роботу ліфта, а й на керований сценарій у разі зупинки — зокрема можливості безпечного завершення поїздки.

Коли повна заміна ліфта фінансово недосяжна за один бюджетний цикл, будинки дедалі частіше обирають модернізацію у форматі капітального ремонту: із заміною ключових вузлів та можливістю планувати оновлення поетапно.

У побуті це часто називають "комплектом", але фактично йдеться про конфігурацію робіт, яку складають з окремих модулів під конкретний ліфт та підтверджений бюджет. Залежно від технічного стану такий ремонт можуть входити вузли управління (станція управління, пости виклику, панель управління в кабіні), механізми дверей кабіни і шахти, елементи кабіни, система автоматичної евакуації. Для більш глибокого оновлення додають тягові та силові вузли, а також елементи безпеки.

Для ОСББ це означає зрозумілий перелік замін та прогнозований кошторис — без "зайвих" позицій, які не підтверджені обстеженням або розпорядженням.

Найчастіше модернізацію планують у двох обсягах.

Базовий варіант вибирають, коли за результатами обстеження потрібно оновити керування та дверну групу, а тягові вузли не мають розпорядження на обов'язкову заміну. Зазвичай це: заміна станції керування, постів виклику та панелі керування в кабіні, механізмів дверей кабіни, стулок дверей шахти,

окремих елементів кабіни, а також встановлення системи автоматичної евакуації.

Розширений варіант потрібен, коли знос стосується також тягових або вузлів безпеки. Тоді, крім базового переліку, додають заміну лебідки з частотним регулюванням, тягових канатів, вузлів безпеки (обмежувач швидкості, натяжний пристрій) та ширший обсяг робіт із дверима шахти.

Окремий блок рішень – станція управління. Для типових 9-поверхових будинків пріоритетом є цінова доступність модернізації та адаптація під масовий житловий фонд. У цьому сегменті застосовують, зокрема, універсальну станцію управління ARCUBE (для ліфтів від 1 до 16 поверхів) у заводській комплектації із сертифікованим складом та доступом до технічної підтримки виробника. Це зменшує ризики несумісності та спрощує подальше технічне обслуговування.

На рішення впливають три фактори: вимоги обстеження та розпорядження інспектора; бюджет будинку та можливості співфінансування; додаткові опції, які підвищують комфорт та доступність (індикація, рішення для маломобільних мешканців тощо). Якщо припис містить конкретний перелік вузлів для заміни, він зазвичай стає основою кошторису і заявок у рамках програм підтримки.

Якщо модернізація включає заміну основних технічних елементів, а не лише косметичні зміни, вона юридично класифікується як капітальний ремонт і може бути включена до програм співфінансування.

Тому тема кваліфікаційної роботи є актуальною.

## **1.2.Різновиди ліфтових установок**

Ліфти стали невід'ємною частиною сучасного світу, і зараз існує безліч їх різновидів залежно від сфери застосування.

Класифікація ліфтів:

1. За призначенням:

- Пасажирські: використовуються виключно для перевезення людей.

- Вантажопасажирські: призначені для транспортування як людей, так і вантажів.

- Лікарняні: спеціально розроблені для медичних закладів, щоб перевозити пацієнтів.

- Вантажні: використовуються тільки для переміщення вантажів.

- Спеціальні: виготовляються за специфічними технічними вимогами для особливих умов експлуатації.

2. За типом приводу підйомного механізму:

- Електричні: з електроприводом постійного чи змінного струму.

- Гідравлічні: привід працює через гідроциліндр або лебідку з гідродвигуном.

3. За механізмом передачі руху кабіні:

- Канатні: пересування здійснюється за допомогою тягових канатів.

- Ланцюгові, рейкові та гвинтові\*\*: використовують ланцюги для переміщення кабіни.

4. За способом передачі руху від лебідки до канатів:

- Ліфти з барабанною лебідкою.

- Ліфти з канатоведучим шківом (КВШ).

5. За способом впливу на кабіну:

- З верхньою канатною підвіскою.

- Вижимні, де канати охоплюють кабіну знизу.

6. За схемою запасу тягових канатів:

- З прямою та поліспаотною підвіскою.

- З канатним мультиплікатором.

7. За розташуванням машинного приміщення:

- З верхнім машинним приміщенням.

- З нижнім машинним приміщенням.

8. По конструкції приводу лебідки:

- Редукторний привід.

- без редукторний привід.

9. За швидкістю руху кабіни:

- Тихохідні зі швидкістю до 1 м/с.
- Швидкісні зі швидкістю 1,4–2 м/с.
- Швидкісні (понад 2 м/с).

10. За точністю зупинки:

- Точні системи зупинки.
- Без системи точної зупинки.

Основні технічні характеристики ліфтів:\*\*

- Вантажопідйомність: Максимальна маса, яку може підняти ліфт, що знаходиться в кабіні.

- Швидкість руху: Номінальні значення можуть змінюватись і становлять стандартний ряд від 0,25 до 8 м/с.

- Висота підйому: Визначається проектом будівлі та може обмежуватися втратою корисного об'єму.

Вантажопідйомність визначає місткість кабіни, яка розраховується за формулою, де  $Q$  - розрахункова вантажопідйомність, а  $QП$  - середня маса пасажера (80 кг).

Продуктивність ліфта - критичний параметр, що залежить від висоти будівлі, вантажопідйомності та інтенсивності використання.

### **1.3. Пристрій та принцип дії**

Ключові компоненти ліфта включають кабіну, противагу, електропривод лебідки, обмежувач швидкості, тягові канати, що направляють для кабіни, а також електричне обладнання та проводку.

Опис кінематичної схеми ліфта (Рисунок 1) включає в себе опис принципу роботи та основних компонентів системи.

Тягові канати з кріпильним введенням огинають поліспастичні блоки, встановлені на кабіні ліфта та противазі, а їх кріплення здійснюється у машинному відділенні на верхньому перекритті шахти.

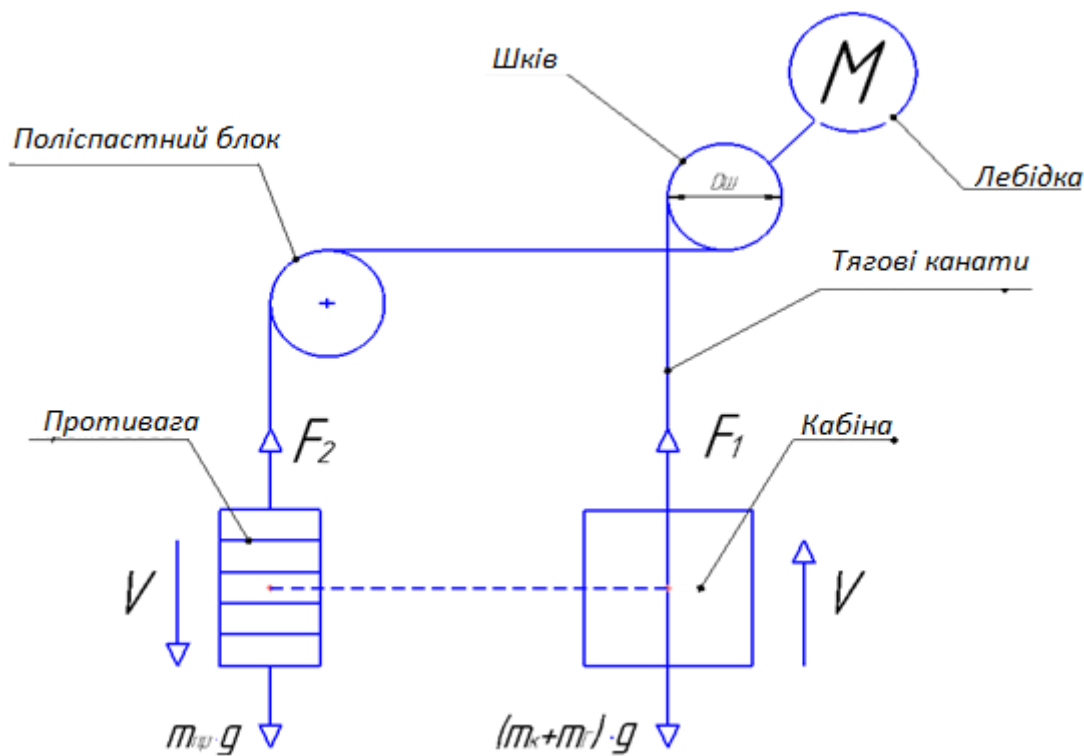


Рисунок 1 – Кінематична схема ліфта

Рух кабіни та противаги забезпечується ліфтовою лебідкою, використовуючи тягові канати. У машинному приміщенні додатково встановлюються гальмівний пристрій, шафа управління, сервоконтролер, пристрій введення, захисні системи та інші елементи управління.

Ліфт можна керувати безпосередньо з кабіни, що надає можливість його виклику пасажиром. При натисканні кнопки виклику сигнал передається до станції керування. Контролер обробляє сигнал та визначає відповідну дію. Якщо кабіна вже знаходиться на викликаному поверсі, подається команда для відкриття дверей. Якщо кабіна знаходиться на іншому рівні, ліфт прямує до потрібного поверху. У разі руху ліфта під час виклику система приймає рішення на основі напрямку ліфта: якщо він рухається у бік виклику, здійснюється зупинка на вказаному поверсі; якщо напрямок протилежний, сигнал зберігається, і завдання виконується після завершення поточної команди.

Для забезпечення точної зупинки кабіни та підвищення рівня комфорту для пасажирів використовуються датчики точної зупинки. Ці рецептори розміщуються залежно від розрахункової швидкості ліфта і забезпечують

переведення електроприводу на знижену частоту обертання перед зупинкою. Коли підлога кабіни збігається з рівнем поверху, рух припиняється, активується гальмо, двері автоматично відчиняються. Використання безредукторної лебідки у поєднанні з перетворювачем частоти виключає ривки при розгоні та зупинці завдяки плавному регулюванню швидкості.

Ліфти класифікуються як електроустаткування підвищеної безпеки. Для запобігання небажаним ситуаціям, таким як замикання пасажирів у кабіні або раптова зупинка між поверхами, рух кабіни можливий тільки при системах, що справно працюють. Будь-який збій у роботі блокувань або запобіжних пристроїв призводить до негайного розмикання системи керування та блокує рух (за винятком аварійних кнопок та кнопки зв'язку з диспетчером).

Ключовим елементом системи підйому є електричний привід ліфтової лебідки. Перевезення пасажирів здійснюється в герметичній кабіні ліфта, яка є закритим приміщенням без вікон та інших відкритих елементів. Спеціальні блокувальні пристрої перешкоджають руху кабіни при відчинених дверях.

Для уникнення поперечного розгойдування кабіни використовуються напрямні, що розміщені по всій висоті шахти ліфта. В аварійних ситуаціях ці напрямні спільно з уловлювачами забезпечують миттєве гальмування та фіксацію кабіни до її звільнення. Міф про "падіння ліфта" практично відійшов у минуле завдяки сучасному обладнанню, яке зводить до мінімуму ймовірність таких подій. Проте забезпечення безпеки залишається пріоритетом галузі: механізм аварійної зупинки продовжує залишатися невід'ємною частиною конструкції. Робота уловлювачів ініціюється при перевищенні граничної швидкості руху: обмежувач швидкості фіксує перевищення та активує уловлювачі. Останні встановлюються з обох боків каркаса кабіни (або противаги) і приводяться в дію канатом, з'єднаним з шківом обмежувача.

Найнижча частина шахти - прямок - призначена для розміщення захисного обладнання: упорів або буферів, які відповідають за зниження швидкості кабіни в крайньому положенні.

Станція управління, як правило, розташовується в машинному відділенні, яке може бути або на верхньому поверсі будівлі, або в підвалі. Електричне з'єднання між обладнанням кабіни та станцією керування забезпечується підвісним кабелем, встановленим вздовж стіни шахти.

Більшість датчиків також монтуються всередині шахти ліфта: це датчики точної зупинки, уповільнення та системи контролю дверей кабіни.

На схемі (Рисунок 2) представлено розташування обладнання ліфта: у машинному приміщенні розміщено шафу керування, електродвигун та лебідку; всередині шахти знаходяться кабіна ліфта, протитяги, тягові канати, напрямні системи, уловлювачі та різні датчики.

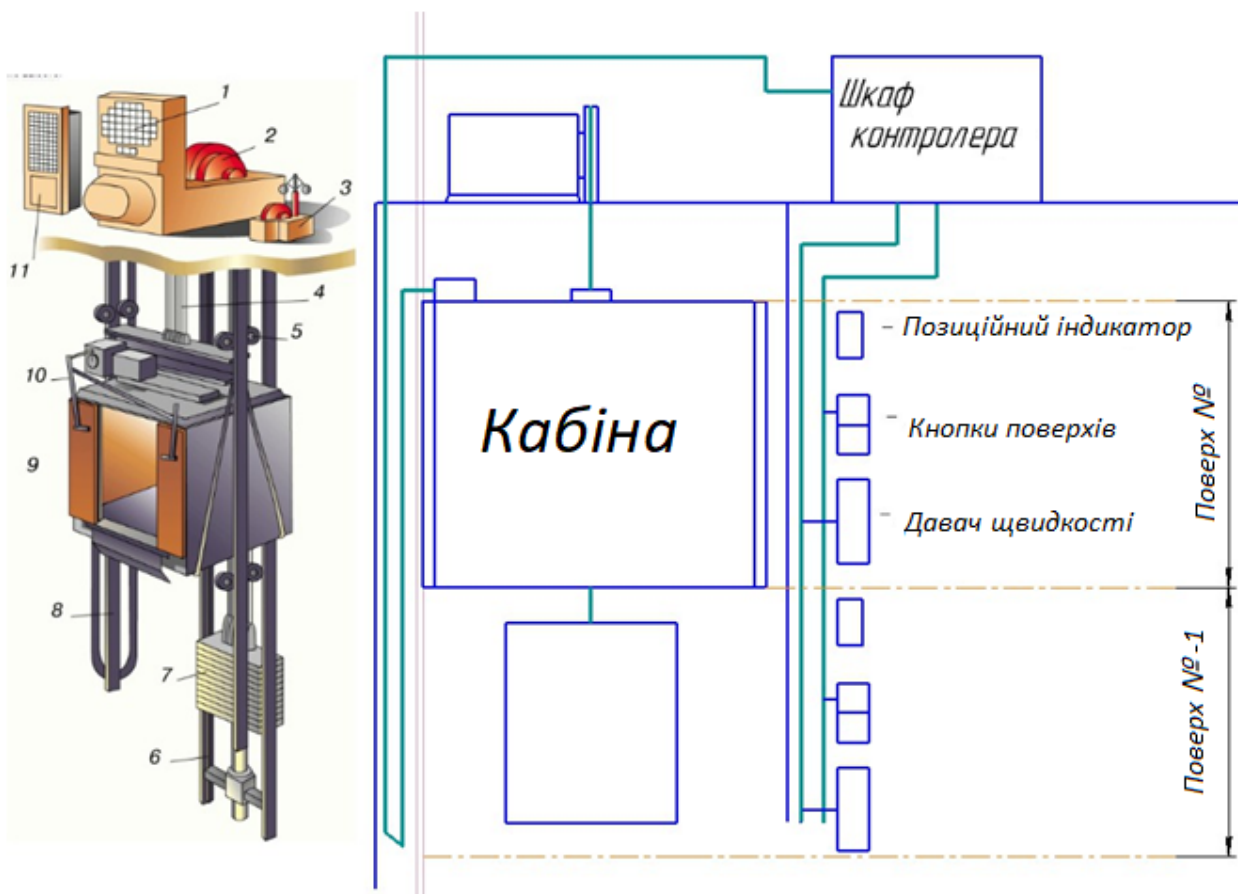


Рисунок 2 – Технологічна схема обладнання:

Склад: 1–станція управління; 2– електродвигун, у нашій роботі використовуватиметься тихохідний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором; 3- Система управління гальмом; 4- Трос підвісу кабіни; 5– напрямні ролики; 6, 8 - напрямні рейки; 7 - противага; 9 – кабіна; 10 – привід дверей кабіни; 11 - шафа електричного обладнання.

#### **1.4.Формування списку вимірюваних технологічних параметрів та керуючих впливів, встановлення необхідної точності їх вимірювання та регулювання**

Головною частиною будь-якого ліфтового обладнання є електропривод лебідки, тому більшість змінних, що визначають його роботу, пов'язані саме з ним. Розглянемо ключові їх [4]:

- Змінна вага кабіни, яка змінюється в залежності від кількості пасажирів. Це призводить до постійної мінливості моменту на валу двигуна.

- Положення кабіни у шахті ліфта, що визначається кутом повороту шківів. Це також впливає на поточну напругу та струми у двигуні.

- швидкість руху ліфтової кабіни.

Для точного керування ліфтовим обладнанням необхідно враховувати та обробляти ці параметри.

Процес управління організовано кількох рівнях. Основним елементом регулювання роботи електроприводу лебідки є перетворювач частоти, який застосовує метод векторного керування асинхронним двигуном. Цей підхід дозволяє підтримувати плавну зміну швидкості двигуна в широкому діапазоні, що дуже важливо для забезпечення м'якого розгону та зупинки кабіни. Хоча перетворювач частоти може функціонувати автономно, така схема керування не вважається надійною і практично не використовується у стандартних ліфтових установках.

Завдання електроприводу формуються за допомогою спеціалізованого мікроконтролера або сервоконтролера. Цей контролер отримує дані від різних датчиків, а потім передає їх на головний електропривод та привід

дверей, формуючи оптимальні команди для їхньої роботи. Крім того, сигнали про помилки або аварійні ситуації автоматично відправляються на диспетчерську станцію, де оператор може оперативно відреагувати на проблеми, що виникають.

### **1.5. Розробка ключових вимог щодо здійснення технологічного процесу, визначення критеріїв якості та встановлення цілей управління.**

Основним завданням управління рухом кабіни ліфта є забезпечення комфортного та безпечного пересування, а також точну зупинку на рівні необхідного поверху.

Існують ключові критерії якості, яким має відповідати робота ліфта:

- Плавність руху. Відповідно до вимог правил будови та безпечної експлуатації ліфтів (ПББЕЛ), комфортний рівень прискорення для переміщення пасажирів не повинен перевищувати  $2 \text{ м/с}^2$ . При цьому фізична дія на людський організм безпосередньо залежить від тривалості дії прискорення. Якщо воно триває менше 0,4 секунд, то людина здатна комфортно витримувати прискорення до  $30\text{-}40 \text{ м/с}^2$ . Таким чином, при керуванні рухом кабіни допускається короткочасне високе прискорення або гальмування без шкоди пасажирам.

Комфорт роботи ліфта не обмежується лише показниками прискорення. Існують і інші фактори, що визначають зручність експлуатації:

- Час очікування ліфта. Це проміжок часу, протягом якого пасажир очікує прибуття кабіни на сходовому майданчику. У високоповерхових будинках доцільно передбачення функції підвищеної швидкості під час руху порожнього ліфта. Однак у нашому випадку, враховуючи невисоку поверховість будівлі, цілком достатньо використання номінальної швидкості пересування.

- Плавність та точність зупинки. Ці параметри досягаються за рахунок використання датчиків точної зупинки. При наближенні до необхідного

поверху система подає сигнал зниження швидкості. Завдяки тому, що в даному ліфті встановлено без редукторний електродвигун з векторним керуванням на базі перетворювача частоти, забезпечується легкість налаштування плавного гальмування та якісної зупинки.

- Рівень шуму під час руху. Цей параметр також є важливою характеристикою комфорту. Без редукторні електроприводи мають помітну перевагу перед редукторними системами: вони забезпечують мінімальний рівень шуму за рахунок скорочення кількості механічних вузлів та тертя.

Таким чином, комфорт та надійність роботи ліфтів залежать не тільки від грамотного управління прискоренням та гальмуванням, але й від урахування інших факторів, таких як час очікування, шумові характеристики та точність роботи механізмів останньої стадії зупинки. Завдяки використанню сучасних технологій, таких як без редукторні електроприводи та системи точної зупинки, надаються можливості для задоволення найвищих вимог до якості ліфтового обладнання.

## **1.6. Основні вимоги до електроприводу**

Електропривод є ключовим елементом ліфтового обладнання. Тому на етапі проектування важливо визначити основні вимоги, які пред'являтимуться до електроприводів у пасажирських ліфтових установках **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

- Надійність, високий рівень безпеки;
- Мала шумність;
- Простота експлуатації;
- Обмеження прискорення кабіни;
- Плавність початку руху та зупинки;
- наявність ревізійної швидкості;
- Точність зупинки лише на рівні поверху.

## 1.7. Ліфтові лебідки

Ліфтова лебідка є пристроєм, призначеним для приведення кабіни ліфта в рух. Забезпечення якості та безпеки таких механізмів регулюється положеннями ПББЕЛ (Правил будови та безпечної експлуатації ліфтів) [7].

Основні вимоги ПУЕБЕЛ до ліфтових лебідок включають такі аспекти:

- Конструкція лебідки повинна бути здатною витримувати максимальні експлуатаційні навантаження.
- Для барабанних лебідок та лебідок із зірочкою встановлюється обмеження швидкості руху до 0,63 м/с. Використання противаги у поєднанні з такими лебідками суворо заборонено.
- Обов'язковою умовою є наявність кінематичного зв'язку, що не розмикається, між гальмівним шківом і канатоведущим вузлом.
- Лебідка має бути оснащена струбциною, що забезпечує можливість переміщення кабіни у разі відключення електроживлення.
- Штурвал допускається як знімного, так і незнімного типу. Застосування кривошипної рукоятки неприпустиме. Знімний штурвал повинен зберігатись у машинному приміщенні.
- На штурвалі та на самій лебідці потрібне чітке маркування, що вказує на належність до певної установки та напрямок руху кабіни при повороті штурвала.
- Машинне приміщення має передбачати можливість моніторингу положення кабіни.

У сучасній ліфтовій індустрії найбільше широко використовується привід з асинхронним електродвигуном, відомим своєю надійністю. Удосконалення області перетворювачів частоти значно розширили можливості управління швидкістю обертання асинхронних двигунів, що забезпечило їх перевагу над аналогами з двигунами постійного струму. Завдяки впровадженню частотного та векторного управління досягаються високі показники регулювання швидкості. На сьогоднішній день асинхронні

приводи практично повністю витіснили своє постійне струмове обладнання. Однак асинхронні двигуни дещо поступаються за характеристиками синхронним двигунам із постійними магнітами. Останні, незважаючи на свій потенціал, знаходяться на ранньому етапі впровадження в ліфтобудуванні, що стримує їхнє поширення на світовому ринку.

Приводи на основі гідродвигунів оберտального типу застосовуються виключно для ліфтів у будинках малої поверховості.

Відповідно до типу канатоведучого органу лебідки поділяються на барабанні (Рисунок 3, а), з канатоведучим шківом (Рисунок 3, б) та із зірочкою. У сучасних ліфтах переважно використовується лебідка з канатоведучим шківом, що з її конструктивними і експлуатаційними перевагами.

За характером кінематичного зв'язку між мотором і канатоведучим вузлом виділяють редукторні та без редукторні лебідки. У редукторних системах рух передається від двигуна через редуктор, який здійснює перетворення частоти обертання та моменту. Це дозволяє знизити швидкість обертання робочого органу в порівнянні з приводним механізмом і одночасно збільшити момент, що крутить.

Безредукторні лебідки (Рисунок 4) використовують у ліфтах високошвидкісного чи преміального класу. Їх конструктивна особливість полягає в тому, що канатоведучий і гальмівний шків розміщуються безпосередньо на валу електродвигуна з низькою швидкістю обертання. Для забезпечення плавного регулювання швидкості руху кабіни в таких системах застосовуються частотні перетворювачі, що сприяє покращенню показників точності пуску та гальмування.

На даний момент підприємства виробляють пасажирські ліфти зі швидкістю руху кабіни до 4 м/с, задовольняючи сучасні вимоги комфорту та безпеки користувачів.

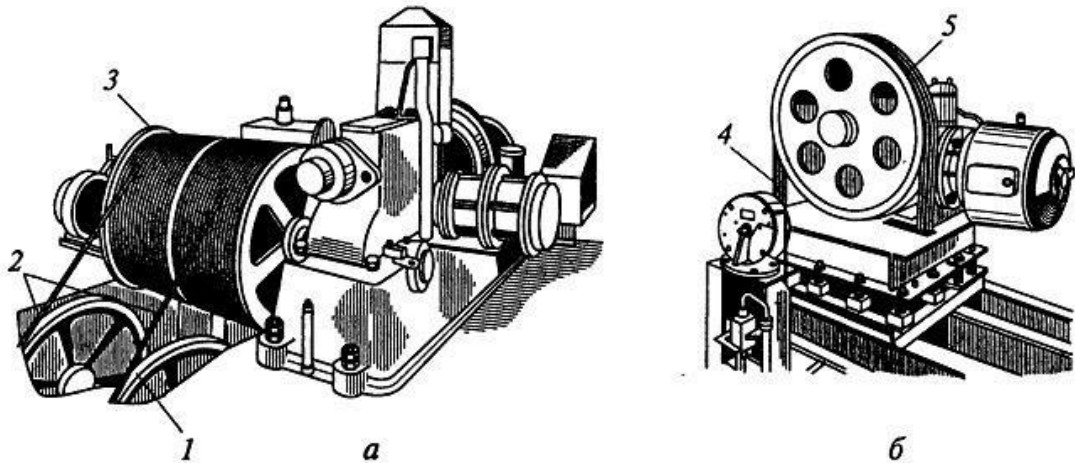


Рисунок 3 - Лебідки: а - барабанного типу; б - з канатоведучим шківом; 1 - блок, що відхиляє; 2, 4 - канати; 3 - барабан; 5 – канатоведучий шків

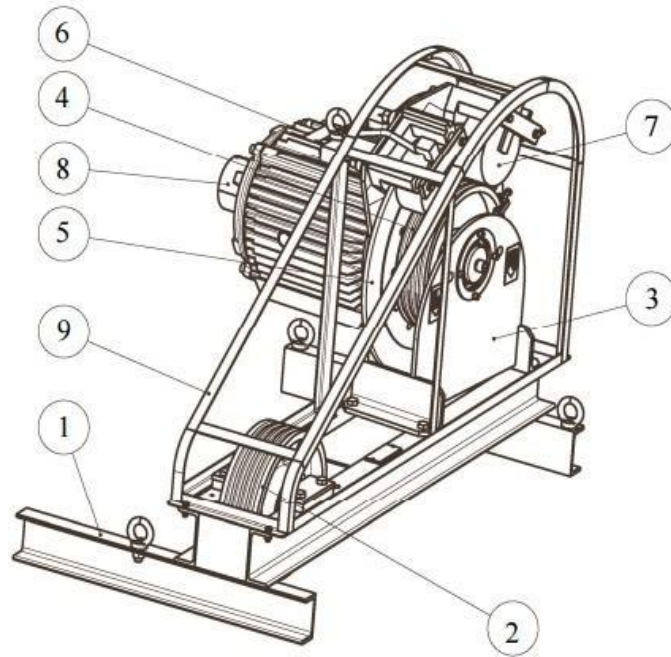


Рисунок 4 - Без редукторна лебідка з тихохідним асинхронним електродвигуном змінного струму:

1- рама; 2-відвідний блок; 3 - опора приводу; 4 - канатоведучий шків;  
 5 - гальмівний диск; 6 - електродвигун; 7 — електромагнітне гальмо; 8 – датчик зворотного зв'язку за швидкістю (енкодер); 9 – ПЧ та блок гальмівних резисторів

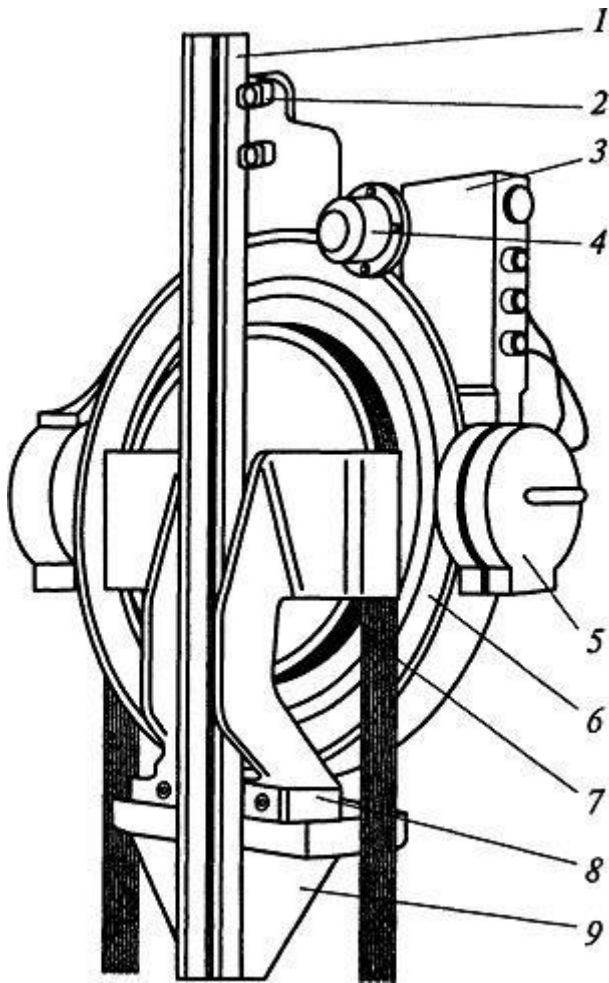


Рисунок 5 – Без редукторна лебідка з дисковим електродвигуном змінного струму EcoDisk:

1- напрямна кабіни; 2, 8 - притискні планки кріплення лебідки; 3 - Клемна коробка; 4 - тахогенератор системи управління роботою двигуна; 5 - електромагніт, що розгальмовує; 6 - дисковий ротор з канатоведучим і гальмівним шківками; 7 - тягові канати; 9 - корпус лебідки

### 1.8.Тихохідні асинхронні двигуни

У сучасній ліфтовій індустрії більшість електроприводів для ліфтових лебідок будуються на базі двошвидкісного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, редуктора, гальмівного механізму та релейно-контакторної схеми керування. Однак цей підхід має кілька суттєвих недоліків.

До основних проблем можна віднести низьку надійність релейно-контакторних схем, що призводить до зміни параметрів. Це, своєю чергою, викликає збільшення пускових струмів в асинхронному двигуні. На боці механічної частини систем також спостерігаються такі недоліки, як жорсткі механічні властивості і високі динамічні моменти, що з недосконалістю системи управління.

З розвитком напівпровідникових технологій та мікропроцесорної техніки на ринок прийшли частотно-регульовані електроприводи змінного струму. Це призвело до сталої тенденції переходу від редукторних систем до без редукторних електроприводів, заснованих на поєднанні частотного перетворювача та асинхронного двигуна. Без редукторні рішення мають ряд значних переваг:

- усунення редуктора, що призводить до скорочення обсягів механічної частини системи;
- підвищений комфорт за рахунок зниження рівня шуму, більш плавного початку руху та м'якої зупинки;
- Зниження вібрацій та механічних шумів завдяки відмові від застосування редуктора.

Найперспективнішим напрямом у розвитку безредукторних ліфтових систем є впровадження низькошвидкісних високомоментних асинхронних двигунів (так званих тихохідних асинхронних двигунів або ТАД).

Електроприводи на основі ТАД істотно відрізняються від традиційних промислових приводів. Серед їх ключових характеристик можна виділити низьку номінальну швидкість обертання валу (в межах 50-300 об/хв), високий момент, що крутить, меншу частоту напруги статора, а також зниження величини пускових струмів в 2-3 рази.

До того ж використання сучасних мікропроцесорів та мікроконтролерів для управління ТАД дозволяє реалізовувати адаптивні алгоритми роботи. Це забезпечує високу точність позиціонування кабіни на старті та при зупинці, підвищує загальну комфортабельність руху ліфта та оптимізує характеристики електроприводу загалом.

#### 1.8.1 Аналіз тихохідного асинхронного двигуна

Як уже зазначалося, використання стандартних загальнопромислових двигунів для забезпечення роботи на вкрай низькій частоті обертання при високих моментах, що крутять, є вкрай неефективним. Для вирішення цієї

проблеми потрібна розробка спеціалізованого двигуна, що має характеристики, що відрізняються від серійних моделей.

Однією із ключових особливостей роботи двигуна на малих частотах (менше 5–10 Гц) є наявність значних втрат в обмотках статора та ротора. При цьому механічні втрати і втрати стали мінімальні завдяки низькій частоті живлення і невеликій швидкості обертання. Таким чином, у практичних розрахунках цими видами втрат можна знехтувати.

Виходячи з цього, основний наголос при виборі матеріалу статора повинен бути зроблений не на зниження питомих втрат, а на здатність магнітної системи функціонувати при підвищених рівнях індукції з мінімальним струмом намагнічування. Це дозволяє значно знизити втрати міді статора за рахунок зменшення споживаного струму від перетворювача частоти.

Для підвищення перевантажувальної здатності двигуна необхідно мінімізувати активні та індуктивні опори як ротора, так і статора. У роторі зниження індуктивного опору досягається шляхом зменшення висоти паза та збільшення його розкриття. Крім того, скорочення параметрів опору  $R'R$  і  $X'R$  можливе через вибір більшої кількості пазів на роторі в порівнянні із загальнопромисловими двигунами, ґрунтуючись на співвідношенні  $ZR \geq 1,2 ZS$ .

При цьому кількість полюсів статора вибирають таким чином, щоб частота напруги живлення знаходилася не нижче 4 Гц. Конструкція статорних пазів повинна забезпечувати оптимальний баланс між провідністю розсіювання та основного магнітного потоку для досягнення максимального робочого моменту. Пази слід робити максимально широкими із максимально допустимим розкриттям. Число пазів статора повинно забезпечувати коефіцієнт  $q$  не менше ніж 2.

Обмотка має бути сконструйована так, щоб мінімізувати довжину лобових частин, що можливо завдяки оптимальній укороченій двошаровій обмотці або застосуванню технології розподілу в одношарових обмотках.

Основні параметри співвідношення числа пазів статора і ротора для високомоментних асинхронних двигунів, що працюють від низькочастотних перетворювачів частоти, представлені у відповідній таблиці.

Таблиця 1 - Основні співвідношення чисел пазів

$2p$	$Z_s$	$Z_R$	$q$
6	54	66	3
6	72	86	4
8	72	86	3
8	96	114	4
10	60	74	2
10	90	108	3
12	72	86	2
12	108	130	3

Використання овального паза ротора (Рисунок 6) суттєво знижує індуктивний опір розсіювання. Це досягається за рахунок збільшення ширини паза ротора до 22 мм з переходом на висоті 1 мм до розширеної верхньої частини паза. Таке конструктивне рішення, у поєднанні з певним співвідношенням числа пазів ротора та статора, зазначеним у таблиці, підвищує максимальний момент двигуна, що значно збільшує його здатність до перевантаження. Ця особливість є особливо важливою при запуску ліфтових електродвигунів, які характеризуються високим моментом інерції.

Крім того, відсутність скосу сприяє зниженню додаткових втрат, спричинених поперечними струмами найвищих гармонік, особливо коли кількість пазів ротора перевищує кількість пазів статора. Це одночасно зменшує значення  $X_R$ , що позитивно позначається на енергетичній ефективності двигуна. Такі зміни збільшують як здатність перевантажувального двигуна при роботі в руховому режимі, так і його ефективність в генераторному режимі.

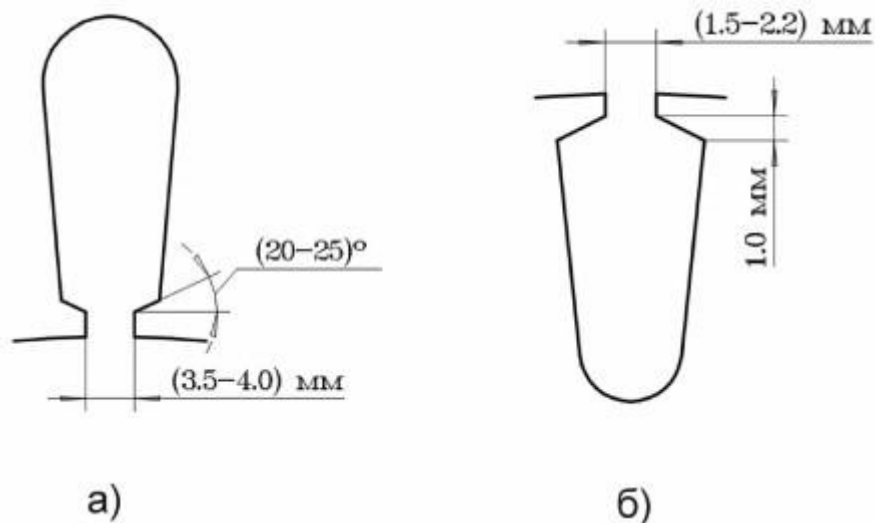


Рисунок 6 – Пазова геометрія: а) паз статора; б) Паз ротора

Конструкція паза статора представлена на Рисунок 6, а. Вона передбачає розкриття паза до 4 мм з метою зниження індуктивного опору розсіювання паза. Заокруглення верхньої частини паза виконане у вигляді арочної конструкції, що підвищує жорсткість магнітної системи. Таке рішення покращує віброакустичні характеристики двигуна, особливо у разі відсутності скосу пазів ротора. Крім того, аркова форма забезпечує максимальний коефіцієнт заповнення паза, що сприяє скороченню активного опору статора, зниженню активних втрат та покращенню тепловіддачі від найбільш нагрітого елемента двигуна - обмотки статора. Сукупність цих факторів сприяє збільшенню максимального моменту двигуна. Реалізація оптимально ефективного двигуна для роботи з низькочастотним перетворювачем частоти забезпечується використанням повної сукупності запропонованих технічних рішень. Застосування лише одного з перерахованих заходів не дозволить досягти необхідних експлуатаційних характеристик.

### 1.9.Перетворювачі частоти для ліфтових механізмів

Введення ринку перетворювачів частоти справило значні зміни у процесі технічного розвитку, забезпечивши помітне поліпшення характеристик управління електродвигунами. Вони дозволили досягти

високої точності регулювання швидкості асинхронних електродвигунів, що якісно перевершує традиційні системи, такі як ТРН-АТ та інші системи, що використовують регулювання швидкості через зміну напруги на статорі обмотках.

Використання перетворювачів частоти в електроприводах ліфтів [6] забезпечило усунення підвищених пускових струмів під час початку руху та зупинки, дозволяючи досягти високої точності позиціонування кабіни на рівні поверху. Удосконалення системи руху кабіни сприяє збільшенню довговічності механічних компонентів, включаючи тягові канати, напрямні, підвіски противаг, гальмівні колодки та електропроводку. Особливо важливо, що перетворювачі частоти уможливили відмову від редуктора завдяки використанню без редукторних лебідок у поєднанні з низькообертові асинхронними двигунами або синхронними двигунами з постійними магнітами.

Однак управління рухом ліфтової кабіни є складним процесом, що робить використання стандартних перетворювачів частоти не виправданим. Отже, до ліфтових перетворювачів частоти пред'являється ряд додаткових специфічних вимог:

1. Реалізація номінального моменту на нульовій швидкості та підвищення динамічних характеристик завдяки застосуванню векторного керування асинхронним двигуном.

2. Універсальність, яка передбачає можливість роботи як з асинхронними, так і з синхронними двигунами, а також із двигунами спеціального виконання (наприклад, ТАД) для без редукторних лебідок.

3. Наявність S-подібного задавач інтенсивності для забезпечення плавного розгону та гальмування двигуна.

4. Відповідність інтерфейсу та програмного забезпечення особливостям експлуатації: управління гальмівною системою двигуна та контакторами, інтеграція із сервоконтролером.

5. Функція аварійного доведення кабіни до найближчого поверху під час спрацьовування захисту.

6. Можливість автоматичного перемикання живлення на резервне джерело під час аварійного вимкнення основного джерела.

7. Підвищена надійність устаткування.

8. Здатність рекуперації енергії у мережу під час роботи у режимі гальмування.

9. Відповідність нормативам з електромагнітної сумісності для житлових будинків.

Розвиток без редукторних частотно-регульованих електроприводів став важливим чинником формування зазначених вимог. Такі приводи знайшли широке застосування у високошвидкісних ліфтах, системах високої комфортності, а також об'єктах висотного будівництва та будинках без машинного приміщення. Виняток редуктора з конструкції приводу значно покращило його масогабаритні показники, спростило обслуговування та підвищило екологічність.

З урахуванням вищевказаних критеріїв найбільшого розвитку отримали синхронні двигуни з постійними магнітами і низькообертові асинхронні двигуни. Це зумовлено необхідністю досягнення низької номінальної частоти обертання двигуна під час використання без редукторних лебідок для забезпечення необхідної швидкості переміщення ліфтової кабіни.

## 2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТИХОХІДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА І МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛІФТОВОЇ ЛЕБІДКИ

Для математичного опису електроприводу ліфтової лебідки потрібно подати його електричну та механічну складові (Рисунок 6).

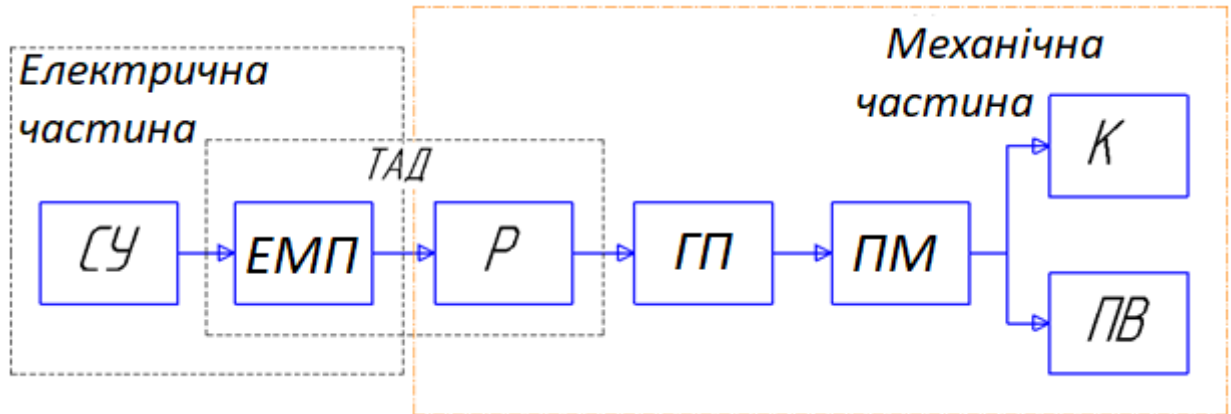


Рисунок 7 - Розділена блок-схема без редукторного електроприводу ліфтової лебідки

Електрична частина включає такі компоненти: систему управління (СУ), яка складається з перетворювача частоти, сервоконтролера і станції управління ліфтом; а також електромеханічний перетворювач (ЕМП) на базі тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Механічна частина електроприводу складається з наступних елементів: ротора (Р) тихохідного асинхронного двигуна, гальмівного пристрою (ГП), передавального механізму (ПМ), що включає канатоведучий шків та пружні зв'язки, кабіни ліфта (К) та противаги (ПВ).

### 2.1 Математична модель тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Для побудови математичної моделі асинхронного двигуна (АД) приймається низка стандартних припущень [7]:

1. Параметри обмоток усіх фаз вважаються симетричними.
2. Магнітне поле розподіляється вздовж повітряного зазору синусоїдально.

3. Напруга на перетворювачі частоти (ПЧ) також приймається синусоїдальною; вплив взаємного зв'язку між АД та ПЧ по силовому каналу не враховується.

4. Втрати в сталі, спричинені вихровими струмами та перемагнічуванням, вважаються незначними та ігноруються.

5. Насичення магнітного ланцюга АД не береться до уваги.

6. Ефект витіснення струмів у провідниках ротора вважається несуттєвим, оскільки частота струмів ротора при подачі від ПЧ знаходиться в межах робочого діапазону механічної характеристики.

У системі з використанням перетворювача частоти (ПЧ) та тихохідного асинхронного двигуна (ТАД) живлення подається на ТАД зі зниженою частотою напруги. Статор ТАД має більшу кількість витків порівняно із звичайним асинхронним двигуном. При цьому фазна напруга, що подається на ТАД від ПЧ, може бути досить високою навіть при невеликій частоті напруги живлення. Це призводить до явного прояву насичення магнітного ланцюга ТАД шляхом основного магнітного потоку.

Виходячи з перерахованих припущень і спираючись на другий закон Кірхгофа, рівняння для електрорушійної сили (ЕРС) в обмотках статора та ротора АТ можна подати так:

Для ланцюгів статора:      Для ланцюгів ротора:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{SA} = R_{SA} I_{SA} + \frac{d\Psi_{SA}}{dt} \\ U_{SB} = R_{SB} I_{SB} + \frac{d\Psi_{SB}}{dt} \\ U_{SC} = R_{SC} I_{SC} + \frac{d\Psi_{SC}}{dt} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{RA} = R_{RA} I_{RA} + \frac{d\Psi_{RA}}{dt} \\ U_{RB} = R_{RB} I_{RB} + \frac{d\Psi_{RB}}{dt} \\ U_{RC} = R_{RC} I_{RC} + \frac{d\Psi_{RC}}{dt} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

У наведеній системі рівнянь використовуються такі позначення:

$R_{SA} = R_{SB} = R_{SC} = R_S$  – активні опори фаз статору

$R_{RA} = R_{RB} = R_{RC} = R_R$  – активні опори фаз ротора ;

$U_{SA} = U_{SB} = U_{SC} = U_{RA} = U_{RB} = U_{RC}$  – миттєві напруги фаз та ротора статора та ротора;

$I_{SA} = I_{SB} = I_{SC} = I_{RA} = I_{RB} = I_{RC}$  - миттєві струми фаз та ротора статора та ротора;

$\Psi_{SA} = \Psi_{SB} = \Psi_{SC} = \Psi_{RA} = \Psi_{RB} = \Psi_{RC}$  - миттєві потокозчеплення фаз та ротора статора та ротора;

Для зв'язку між потокозчеплення і струмами в обмотках скористаємося законом Ампера для статора та ротора відповідно:

$$\begin{cases} \Psi_{SA} = L_{SA} I_{SA} + L_{SASB} I_{SB} + L_{SASC} I_{SC} + L_{SARA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SARC} I_{RC} \\ \Psi_{SB} = L_{SBSA} I_{SA} + L_{SB} I_{SB} + L_{SBSC} I_{SC} + L_{SBRA} I_{RA} + L_{SBRB} I_{RB} + L_{SBRC} I_{RC} \\ \Psi_{SC} = L_{SCSA} I_{SA} + L_{SCSB} I_{SB} + L_{SC} I_{SC} + L_{SCRA} I_{RA} + L_{SARB} I_{RB} + L_{SCRC} I_{RC} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \Psi_{RA} = L_{RASA} I_{SA} + L_{RASB} I_{SB} + L_{RASC} I_{SC} + L_{RA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RARC} I_{RC} \\ \Psi_{RB} = L_{RBSA} I_{SA} + L_{RBSB} I_{SB} + L_{RBSC} I_{SC} + L_{RBRA} I_{RA} + L_{RB} I_{RB} + L_{RBRC} I_{RC} \\ \Psi_{RC} = L_{RCSA} I_{SA} + L_{RCSB} I_{SB} + L_{RCSC} I_{SC} + L_{RCRA} I_{RA} + L_{RARB} I_{RB} + L_{RC} I_{RC} \end{cases}$$

Рівняння потокозчеплення демонструють взаємозв'язок між струмами у кожній з обмоток за допомогою ефекту взаємної індукції. У представлених вище математичних виразах коефіцієнти, такі як  $L_{SA}$ ,  $L_{SB}$ ,  $L_{SC}$ ,  $L_{RA}$ ,  $L_{RB}$  і  $L_{RC}$ , характеризують власні індуктивності відповідних обмоток, тоді як параметри описують взаємні індуктивності між цими обмотками. Формула для електромагнітного моменту може бути сформульована таким чином:

$$M = \frac{z_p}{\sqrt{3}} = [I_{RA} (\Psi_{RB} - \Psi_{RC}) + I_{RB} (\Psi_{RC} - \Psi_{RA}) + I_{RC} (\Psi_{RA} - \Psi_{RB})], \quad (2.3)$$

де  $z_p$  це число пар полюсів аналізованого АД.

На підставі другого закону Ньютона можна записати рівняння, що описує рух та рівновагу моментів на валу АД:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{\text{нав.}} \quad (2.4)$$

де  $J$  – момент інерції валу,  $\omega_r$  – кутова швидкість ротора,  $M$  – крутний момент двигуна,  $M_{нав}$  – момент навантаження, прикладений до валу двигуна.

Розглядаючи різні режими роботи асинхронного двигуна (АД) у складі електроприводу з навантажувальним моментом та враховуючи раніше зроблені припущення, можна вважати допустимим використання еквівалентної двофазної математичної моделі для аналізу його поведінки. Для спрощення цієї моделі було застосовано метод просторового вектора. Цей метод дозволяє суттєво скоротити систему рівнянь, перетворюючи її на компактну та зручну форму з використанням векторних змінних стану.

Суть методу полягає у перетворенні миттєвих значень симетричних трифазних змінних стану (наприклад, напруги, струмів і потокозчеплень) в єдиний просторовий вектор. Таке уявлення значно спрощує математичний апарат і уможливорює поєднання рівнянь руху та електричної частини машини в єдину систему.

Сформулюємо систему рівнянь, виражену через векторні змінні стани, у разі довільної орієнтації системи координат.

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{sx} I_{sy} + \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J = \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{нав} \end{array} \right. \quad (2.4)$$

У даному випадку  $U_s$ ,  $U_r$ ,  $I_s$ ,  $I_r$ ,  $\Psi_s$  і  $\Psi_r$  позначають двокомпонентні вектори, що представляють напруги, струми та потокозчеплення в рамках двофазної системи координат з довільною орієнтацією. Кожна з них розкладена на компоненти відповідних координатних осей. Змінна  $\omega_k$

визначає довільну частоту обертання обраної системи координат, що дозволяє враховувати динамічні зміни. Константа  $j$  по суті є матричною операцією, що забезпечує поворот або зміну орієнтації компонентів векторних змінних. Це дозволяє спростити математичну обробку та оптимізувати аналітичне рішення системи рівнянь.

$$\bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_s - L_y \cdot \bar{I}_s}{L_m}, \quad \bar{I}_r = \frac{\bar{\Psi}_r - L_m \cdot \bar{I}_s}{L_r}. \quad (2.6)$$

Однак у представлений системі спостерігається надмірність невідомих змінних, що ускладнює її розв'язання. У зв'язку з цим їх кількість буде скорочено шляхом виключення деяких змінних  $L_r$  та  $L_s$  для підвищення зручності аналізу.

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_s &= L_s \cdot \bar{I}_s = \frac{L_m}{L_r} \cdot (\bar{\Psi}_s - L_m \cdot L_s) \\ \bar{\Psi}_s &= \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r + \left( L_s + \frac{L_m}{L_r} \right) \cdot \bar{I}_s \\ U_r &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega \bar{\Psi}_s = \\ &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right). \end{aligned} \quad (2.7)$$

Формуємо систему рівнянь з урахуванням поєднання раніше виведених виражень. При цьому з огляду на те, що для тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором  $U_r$  дорівнює нулю, отримуємо таку систему рівнянь:

$$\begin{aligned}
U_r &= R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \cdot \bar{\Psi}_r = \\
&= R_r \cdot \left( \frac{\bar{\Psi}_r - L_m \cdot \bar{I}_s}{L_r} \right) + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \cdot \bar{\Psi}_r = \\
&= \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{L_r} - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot L_s = \\
&= \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left[ j(\omega_k - \omega_r z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right] \bar{\Psi}_r - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot L_s.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

З даного рівняння отримуємо виріз  $\frac{d\bar{\Psi}_r}{dt}$  та підставляємо в попереднє

$$\begin{aligned}
U_s &= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{d\bar{I}_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{I}_s = \\
&= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r - \frac{L_m}{L_r} \left( j(\omega_k - \omega_r z_p) - \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot I_s + \\
&+ \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{I_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot I_s.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Спростуємо

$$\begin{aligned}
U_s &= \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r + \left( R_s + R_r \cdot \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) I_s + \\
&+ \frac{L_m}{L_r} \cdot \left( j\omega_k \cdot z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \bar{\Psi}_r - \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{\bar{I}_s}{dt}. \\
&= R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \bar{U}_r - \frac{L_m}{L_r} \left( j(\omega_k - \omega_r z_p) - \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r + R_r \cdot \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot + \\
&+ \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{I_s}{dt} + j\omega_k \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r + j\omega_k \left( L_s + \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot I_s.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Складаємо систему рівнянь, комбінуючи отримані рівняння. З урахуванням того, що для тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором  $U_r = 0$ .

Тоді отримані рівняння матимуть такий вигляд:

$$\begin{cases} U_s = \left( R_s + R_r \cdot \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \bar{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \left( j\omega_k \cdot Z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \cdot \bar{\Psi}_r - \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + \left( j(\omega_k - \omega_r Z_p) + \frac{R_r}{L_r} \right) \bar{\Psi}_r - R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \bar{I}_s \\ M = \frac{3}{2} Z_p (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{\text{нагр}}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Розглянемо класичні допоміжні коефіцієнти, які дозволять спростити формулювання системи рівнянь:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad L_3 = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad R_3 = R_s + R_r \cdot K_r^2, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r}. \quad (2.12)$$

До того ж необхідно врахувати зміну  $L_m = f(I_m)$ :

$$\begin{aligned} K_r(I_m) &= \frac{L_m(I_m)}{L_r(I_m)}; \\ L_3(I_m) &= L_s(I_m) - \frac{L_m^2(I_m)}{L_r(I_m)}; \\ R_3(I_m) &= R_s + R_r \cdot K_r^2(I_m); \\ A_r(I_m) &= \frac{R_r}{L_r(I_m)}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Врахування насичення магнітного ланцюга реалізується перерахунком допоміжних коефіцієнтів

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s(I_m) \cdot \bar{I}_s + j\omega_k L_s(I_m) I_s + K_r(I_m) \cdot (j\omega_k \cdot z_p - A_r(I_m)) \cdot \bar{\Psi}_r - L_s(I_m) \cdot \frac{d\bar{I}_s}{dt} \\ 0 = \frac{d\Psi_r}{dt} - R_r \cdot K_r(I_m) \cdot \bar{I}_s + A_r(I_m) - j\omega_k \bar{\Psi}_r - \omega_r z_p \bar{\Psi}_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{\text{напр}}) \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Виразимо довільні вектори струмів та потокозчеплення:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{I}_s}{dt} = \frac{1}{L_s(I_m)} \cdot (U_s - R_s(I_m) \cdot \bar{I}_s + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \bar{\Psi}_r - K_r(I_m) \cdot j\omega_r \cdot z_p \cdot \bar{\Psi}_r) - j\omega_k \bar{I}_s \cdot \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot \bar{I}_s - A_r(I_m) \cdot \bar{\Psi}_r - j\omega_k \bar{\Psi}_r + \omega_r j \cdot z_p \bar{\Psi}_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\bar{\Psi}_r \cdot \bar{I}_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{\text{напр}}) \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Розглянемо перетворення цієї системи на скалярне уявлення. Для цього вектори  $\Psi_r$  та  $I_s$  слід замінити їх компонентами по координатних осях  $x$  та  $y$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_s(I_m)} \cdot (U_{sx} - R_s(I_m) \cdot dI_{sx} + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \Psi_{rx} - K_r(I_m) \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \Psi_{ry}) + \omega_k \cdot I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} = \frac{1}{L_s(I_m)} \cdot (U_{sy} - R_s(I_m) \cdot dI_{sy} + K_r(I_m) \cdot A_r(I_m) \cdot \Psi_{ry} - K_r(I_m) \cdot \omega_r \cdot z_p \cdot \Psi_{rx}) - \omega_k \cdot I_{sx} \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot I_{sx} - A_r(I_m) \cdot \Psi_{rx} - \omega_k \Psi_{ry} - \omega_r \cdot z_p \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r \cdot K_r(I_m) \cdot I_{sy} - A_r(I_m) \cdot \Psi_{ry} - \omega_k \Psi_{rx} - \omega_r \cdot z_p \Psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r(I_m) (\Psi_{rx} \cdot I_{sy} - \Psi_{ry} \cdot I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_{\text{напр}}) \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Отже, виклад процесів ТАД у вигляді диференціальних рівнянь вважатимуться завершеним. Наведений математичний опис надає основу для розробки імітаційної моделі даного процесу.

## **2.2 Математичний опис механічної частини**

Для математичного опису механічної частини безредукторної ліфтової лебідки прийнято модель тьохмасової механічної системи. Такий підхід дозволяє розглядати динамічні процеси підйомних механізмів, застосовуючи спрощені розрахункові схеми із зменшеним числом ступенів волі. Ці схеми моделюють поведінку системи шляхом подання її у вигляді абсолютно жорстких точкових мас, з'єднаних пружними невагомими зв'язками і схильних до впливу зовнішніх навантажень.

Характерною рисою використовуваної розрахункової схеми є облік канатів, які представлені як пружні зв'язки, що працюють на розтягування, а також вантажів, що характеризуються статичною навантаженням, завжди спрямованої вниз незалежно від траєкторії руху системи.

Чим більше факторів та параметрів закладається в математичну модель, тим вища точність розрахункових результатів. Однак це неминуче спричиняє ускладнення моделі. Тому в інженерній практиці найбільшого поширення набули двомасові та тримасові розрахункові схеми, які дозволяють отримати перехідні процеси із задовільним рівнем точності для практичного застосування.

Основні припущення моделі такі:

- механічна частина розглядається як сукупність абсолютно жорстких мас, що описуються зосередженими моментами інерції.
- Зосереджені маси лебідки з'єднані між собою пружними зв'язками.
- Деформація пружних зв'язків нелінійна, але підпорядковується закону Гука.
- Гасіння коливань здійснюється за рахунок внутрішніх сил в'язкого тертя матеріалу у місцях деформації пружних зв'язків. Ці сили пропорційні

різниці швидкостей зосереджених мас, що взаємодіють, розташованих по обидві сторони від відповідного зв'язку.

Параметри кінематичної схеми механічної частини зведено таблицю 2.

Таблиця 2. Параметри кінематичної схеми

Позначення	Величина/од.вим.	Опис
$\gamma_3$	$7,8 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Щільність сталі
$J_{ТАД}$	0,07 кг · м <sup>2</sup>	Момент інерції ТАД
$D_{КВШ}$	0,32 м	Діаметр канатоведучого шківів
$L_{КВШ}$	0,06 м	Товщина канатоведучого шківів
$D_T$	0,35 м	Діаметр гальмівного диска
$L_T$	0,01 м	Товщина гальмівного диска
$L_2$	0,8 м	Відстань між канатоведучим шківом і відповідною опорою
$E_{тр}$	$1,25 \cdot 10^{12}$ Н / м <sup>2</sup>	Модуль поздовжньої пружності для сталевих тросів
$L_{тр}$	40 м	Довжина тросів
$L_{трк}$	1,3...40 м	Довжина тросів з боку кабіни
$L_{трпрот}$	40.....1 м	Довжина тросів зі сторони противаги
$d_{тр}$	$8 \cdot 10^{-3}$ м	Діаметр одного троса
$N_{тр}$	3	Кількість паралельно з'єднаних тросів
$k_3$	0,5	Коефіцієнт заповнення перерізу тросів
$m_{п}$	400 кг	Максимальна вантажопідйомність
$m_{до}$	800 кг	Маса кабіни
$m_{прот}$	1000 кг	Маса противаги
$\rho = \frac{D_{КВШ}}{2}$	0,16 м	Радіус приведення
$\lambda_{вт}$	0,15	Логарифмічний декремент згасання механічних коливань під впливом внутрішніх сил в'язкого тертя

Складаємо систему, описуючу три масову систему електроприводу з безредукторною ліфтовою лебідкою (Рисунок 8):

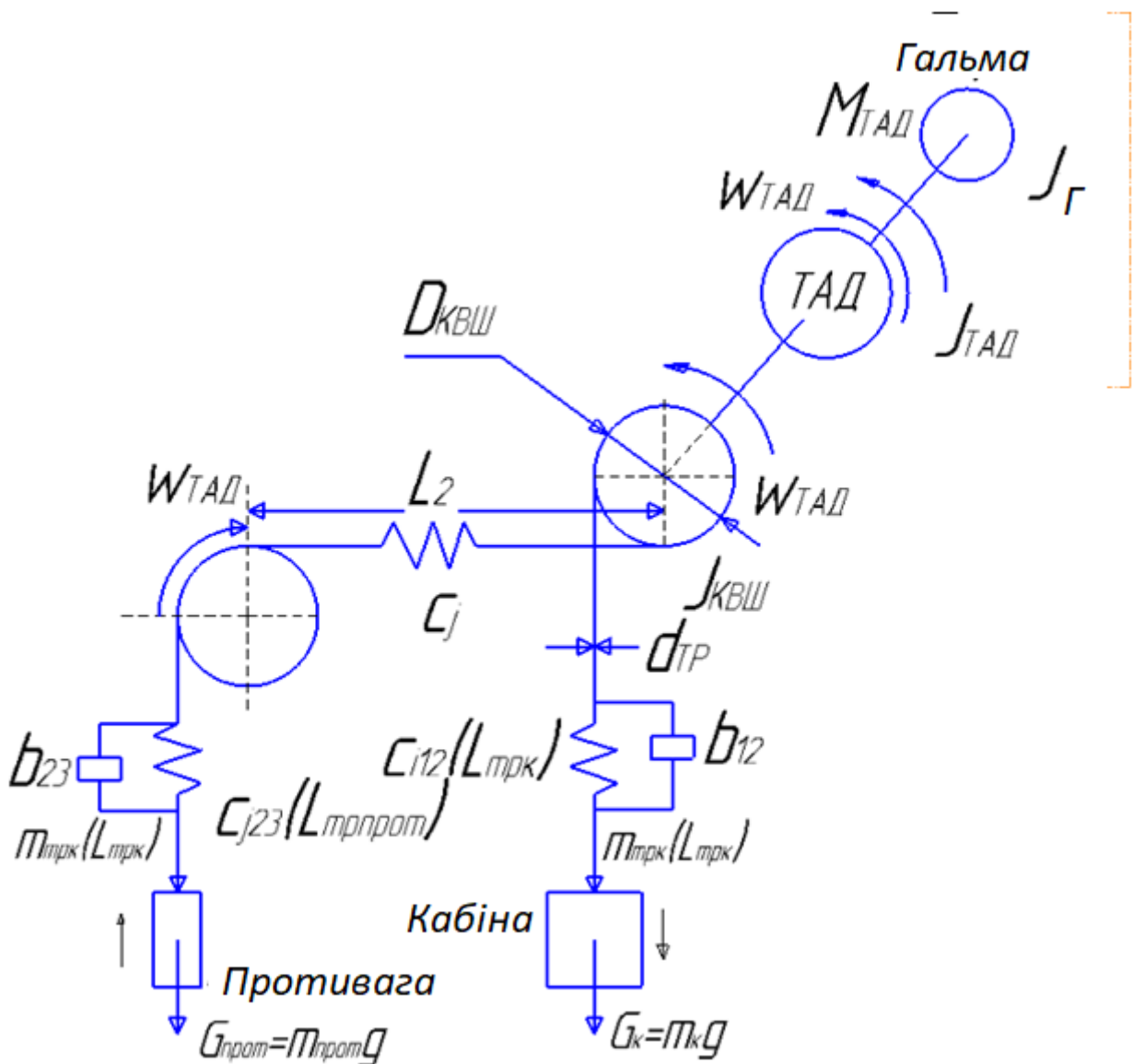


Рисунок 8 – Кінематична схема безредукторної ліфтової лебідки

Зосереджена маса, пружність та нелінійні залежності дозволяють трактувати безредукторну лебідку як коливальну систему з наявністю нелінійних характеристик. Еквівалентний момент інерції електроприводу можна виразити так:

$$J_{ЕК} = J_{ТАД} + J_{ТД} + J_{КВШ}, \quad (2.17)$$

де:

-  $J_{ТАД}$  - момент інерції тягової асинхронної рухової частини (ТАД);

- $J_{ТД}$  – момент інерції гальмівного диска;
- $J_{КВШ}$  - момент інерції канатоведучого шківа.

Момент інерції гальмівного диска розраховується за такою формулою:

$$J_{ТД} = \gamma_C \cdot \frac{\pi}{32} \cdot D_T^4 \cdot L_{ТД} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot 0,35^4 \cdot 0,01 = 0,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.18)$$

де:

- $\gamma_C$  - щільність сталі, що становить  $7,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;
- $D_T$  - Діаметр гальмівного диска (0,354 м);
- $L_{ТД}$  – товщина гальмівного диска (0,01 м).

Момент інерції канатоведущого шківа визначається аналогічним чином:

$$J_{КВШ} = \gamma_C \cdot \frac{\pi}{32} \cdot D_{КВШ}^4 \cdot L_{КВШ} = 7,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi}{32} \cdot 0,32^4 \cdot 0,06 = 0,482 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.19)$$

де:

- $\gamma_C$  – щільність сталі ( $7,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$ );
- $D_{КВШ}$  - діаметр канатоведучого шківа (0,324 м);
- $L_{КВШ}$  – товщина канатоведучого шківа (0,06 м).

Об'єднуємо результати у формулу еквівалентного моменту інерції:

$$J_{ЕК} = J_{ТАД} + J_{ТД} + J_{КВШ} = 0,07 + 0,115 + 0,482 \approx 0,667 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Лінійна жорсткість тросів кабіни змінюється залежно від довжини троса  $\Delta L_{тр}$  у процесі роботи ліфта. Розрахунок лінійної жорсткості при розтягуванні здійснюється за такою формулою:

$$c_j(L_{тр}) = \frac{E_{тр} \cdot S_{тр}}{L_{тр}}, \quad (2.20)$$

де:

- $E_{тр}$  - модуль поздовжньої пружності сталевих тросів;
- $S_{тр}$  – площа поперечного перерізу троса ( $\text{м}^2$ );
- $L_{тр}$  - Довжина троса.

Площа поперечного перерізу троса обчислюється так:

$$S_{\text{ТР}} = k_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ТР}}^2}{4} \cdot N_{\text{ТР}} = 0,5 \cdot \frac{3,14 \cdot (8 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 3 = 9,425 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad (2.21)$$

де:

- $d_{\text{ТР}}$  – діаметр троса;
- $k_3$  - коефіцієнт заповнення перерізу тросів;
- $N_{\text{ТР}}$  – кількість паралельно з'єднаних тросів.

На графіці, представленою на Рисунок 9, наведено залежність лінійної жорсткості троса з його довжини:  $c_j = f(L_{\text{ТР}})$ .

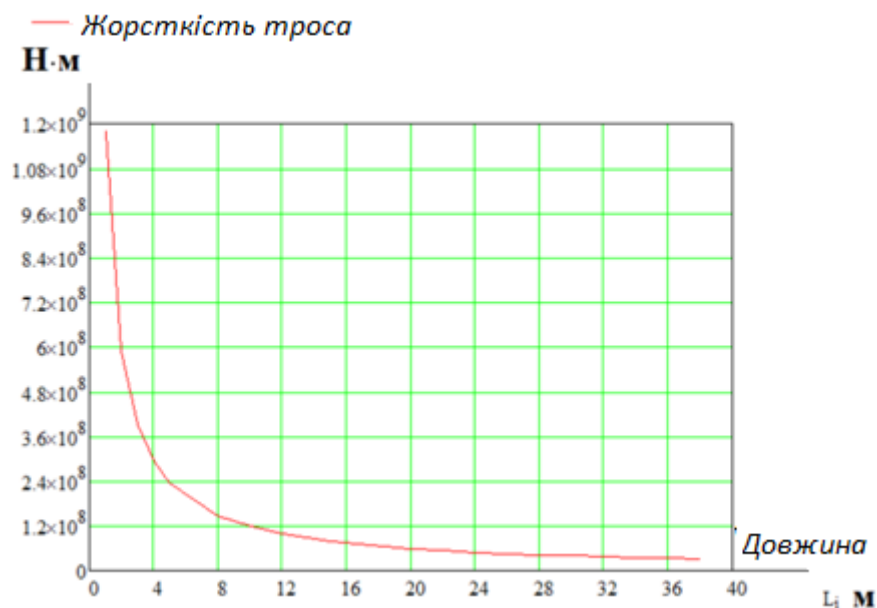


Рисунок 9 - Лінійна залежність жорсткості троса від його довжини

$$c_j = f(L_{\text{ТР}}).$$

З метою спрощення кінематичної схеми механічної частини приймемо припущення, вважаючи ділянку троса довжиною  $L_2$  абсолютно жорсткою ланкою. В результаті спрощена кінематична схема буде представлена в такий спосіб (Рисунок 10) [5].

Далі слід врахувати зміну маси тросів  $m_{\text{ТРК}}$ , викликане зміною їх довжини в процесі експлуатації ліфтової лебідки.

$$m_{\text{ТРК}}(L_{\text{ТРК}}) = 0,349 \cdot N_{\text{ТР}} \cdot L_{\text{ТРК}}, \quad (2.22)$$

де  $L_{ТРК}$  - Сумарна довжина троса, пов'язаного з кабіною.

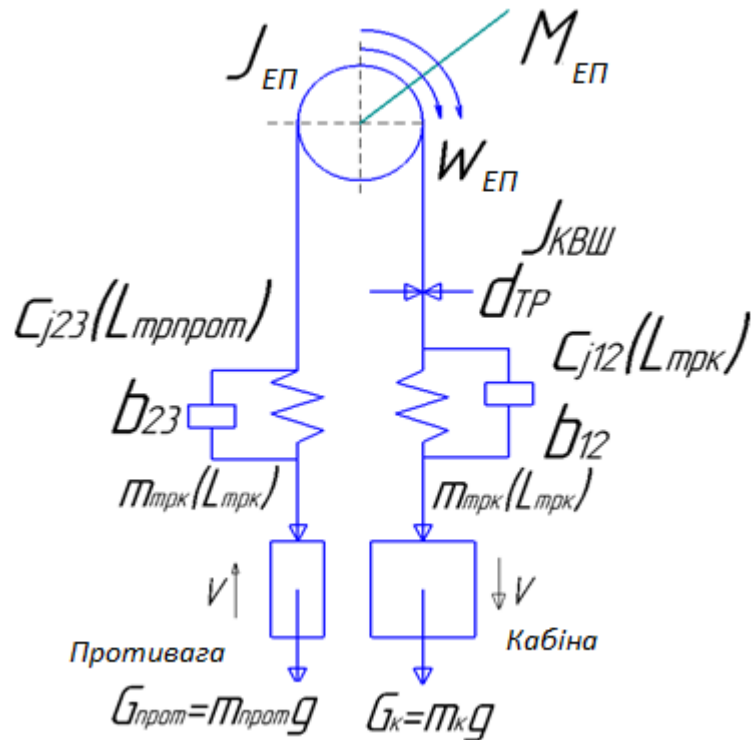


Рисунок 10 – Спрощена кінематична схема безредукторної лебідки

Для точного визначення резонансних частот коливань багатомасової системи розглядаємо параметри маси та довжини тросів, а також їх вплив на наведені моменти інерції. В даному аналізі враховуються кабіна та противага, з'єднані з електроприводом.

Аналогічно записується маса троса для противаги:

$$m_{\text{прот}}(L_{\text{прот}}) = 0,349 \cdot N_{\text{ТР}} \cdot L_{\text{ТРпрот}}, \quad (2.23)$$

де  $L_{\text{ТРпрот}}$  - загальна довжина тросів з боку противаги.

На основі зазначених мас окремо визначаються наведені моменти інерції для кабіни та противаги. Момент інерції кабіни можна обчислити за такою формулою:

$$J_{\text{кабіни}}(L) = (m_{\text{В}} - m_{\text{К}} - m_{\text{ТРК}}(L_{\text{ТРК}})) \times r^2, \quad (2.24)$$

де:

- $m_{\text{В}}$  - маса вантажу в кабіні, що включає вагу пасажирів;
- $m_{\text{К}}$  - власна маса кабіни;

- $m_{\text{ТРК}}(L_{\text{ТРК}})$  - маса тросів, закріплених з боку кабіни;
- $\rho$  - радіус приведення.

Момент інерції противаги визначається так:

$$J_{\text{прот}}(L) = (m_{\text{ПРОТ}} - m_{\text{ТРПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}})) \times \rho^2, \quad (2.25)$$

де:

- $m_{\text{ПРОТ}}$  - маса противаги;
- $m_{\text{ТРПРОТ}}(L_{\text{ТРПРОТ}})$  - маса тросів, з'єднаних з противагою;
- $\rho$  - радіус приведення.

З розрахованих наведених мас і моментів інерції можна визначити резонансні частоти вібраційних коливань тьохмасової системи. Ця система складається з наступних компонентів: момент інерції електроприводу, момент інерції кабіни, а також момент інерції противаги.

Резонансні частоти залежать від властивостей пружного підвісу (тросова система), маси елементів та взаємодії між ними, що може бути виражене з урахуванням моментного аналізу системи. Таким чином, точне обчислення частот вимагає побудови математичної моделі, що включає рівняння руху для системи безредукторної лебідки.

$$\omega_{12,23} = \sqrt{\frac{\omega_{01}^2 \cdot \gamma_1 + \omega_{03}^2 \cdot \gamma_2}{2}} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_{01}^2 \gamma_1 + \omega_{03}^2 \cdot \gamma_2}{2}\right)^2 - \gamma_2 \cdot \omega_{01}^2 \cdot \omega_{03}^2},$$

где  $\omega_{01}^2 = \frac{c_{\phi 12}}{J_1} = \frac{c_{\phi 12} \cdot \rho^2}{J_K}$ ,  $\omega_{03}^2 = \frac{c_{\phi 23}}{J_3} = \frac{c_{\phi 22} \cdot \rho^2}{J_{\text{прот}}}$ ,

$$\gamma_1 = \frac{J_1 + J_2}{J_2} = \frac{J_K(L_{\text{ТРК}}) + J_{\text{прк}}}{J_{\text{ЭП}}}, \gamma_2 = \frac{J_2 + J_3}{J_2} = \frac{J_{\text{ЭП}} + J_{\text{прот}}(L_{\text{ТРПРОТ}})}{J_{\text{ЭП}}},$$

$$\gamma_3 = \frac{J_1 + J_2 + J_3}{J_2} = \frac{J_K(L_{\text{ТРК}}) + J_{\text{ЭП}} + J_{\text{ПРОТ}}(L_{\text{ПРОТ}})}{J_{\text{ЭП}}}.$$
(2.27)

Коефіцієнти демпфування можна розрахувати за такою формулою:

$$b = \frac{\lambda_{BT} \cdot c_{\varphi}}{\pi \cdot \omega} = \frac{\lambda_{BT} \cdot c_{\varphi} \cdot \rho^2}{\pi \cdot \omega}, \quad (2.28)$$

де  $\lambda_{BT}$  є логарифмічний декремент загасання коливань, викликаних впливом внутрішніх сил в'язкого тертя.

Таким чином, розрахункову тримасову систему відповідає наступна система диференціальних рівнянь, яка може бути застосована для аналізу динамічних характеристик електроприводу безредукторної ліфтової лебідки. Ці рівняння є базою для поглибленого вивчення динаміки системи та її поведінки у різних експлуатаційних режимах.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{\text{ЭП}} \cdot \frac{d\omega_{\text{ЭП}}}{dt} = M_{\text{ЭП}} - M_{12} + M_{23} - M_{\text{ТР}} \\ J_{\text{К}} (L_{\text{ТРК}}) \frac{d\omega_{\text{К}}}{dt} = M_{12} - M_{\text{К}} \\ J_{\text{ПРОТ}} (L_{\text{ТРПРОТ}}) \frac{d\omega_{\text{ПРОТ}}}{dt} = M_{23} - M_{\text{ПРОТ}} \\ M_{12} (L_{\text{ТРК}}) = c_{\varphi 12} (L_{\text{ТРК}}) \cdot (\varphi_{\text{ЭП}} - \varphi_{\text{К}}) + b_{12} \cdot (\omega_{\text{ЭП}} - \omega_{\text{К}}) \\ M_{23} (L_{\text{ТРПРОТ}}) = c_{\varphi 23} (L_{\text{ТРПРОТ}}) \cdot (\varphi_{\text{ЭП}} - \varphi_{\text{ПРОТ}}) + b_{23} \cdot (\omega_{\text{ЭП}} - \omega_{\text{ПРОТ}}) \\ M_{\text{ТР}} = M \cdot \text{sign}(\omega_{\text{ЭП}}) \end{array} \right. \quad (2.29)$$

Тут представлені параметри, що характеризують динамічну модель системи:

$J_{\text{ЭП}}$ ,  $J_{\text{К}}$ ,  $J_{\text{ПРОТ}}$  - моменти інерції електроприводу, кабіни та противаги відповідно;

$M_{\text{ЭП}}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{23}$  - момент електроприводу та сумарні моменти, що передаються через пружні зв'язки;

$c_{\varphi 12}$ ,  $c_{\varphi 23}$  - коефіцієнти жорсткості пружних зв'язків;

$b_{12}$ ,  $b_{23}$  - коефіцієнти внутрішнього демпфування;

$\text{sign}(\omega_{\text{ЭП}})$  — функція обліку реактивного характеру моменту тертя  $M_{\text{ТР}}$ :

$\text{sign}(\omega_{\text{ЭП}})$  дорівнює 1 при  $\omega_{\text{ЭП}} \geq 0$  і дорівнює -1 при  $\omega_{\text{ЭП}} \leq 0$ ;

$M$  - величина моменту тертя, яка є постійною ( $M = \text{const}$ ).

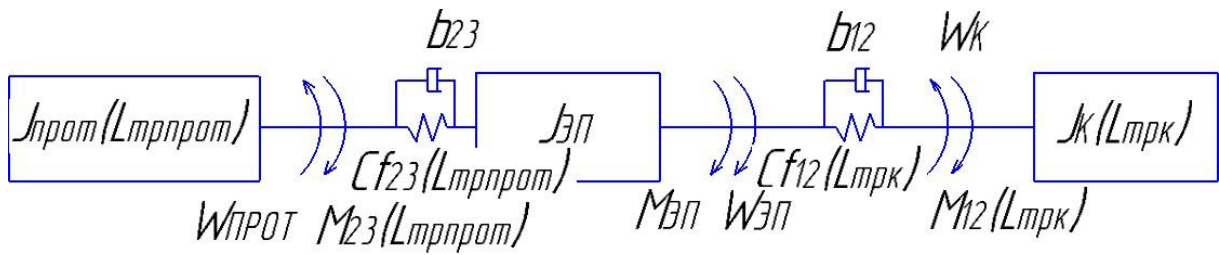


Рисунок 11 - Розрахункова схема тьохмасової системи електроприводу

Відмінність від традиційного розуміння тьохмасової системи полягає в тому, що момент, що задає, прикладається до ланки з моментом інерції JЭП, при цьому ланки з моментами інерції Jпрот і Jк рухаються в протилежних напрямках. Для вивчення перехідних процесів та розробки імітаційної моделі механічної частини безредукторної лебідки пасажирського ліфта, використовуючи вказані вище рівняння, складається структурна схема тьохмасової механічної системи (Рисунок 12).

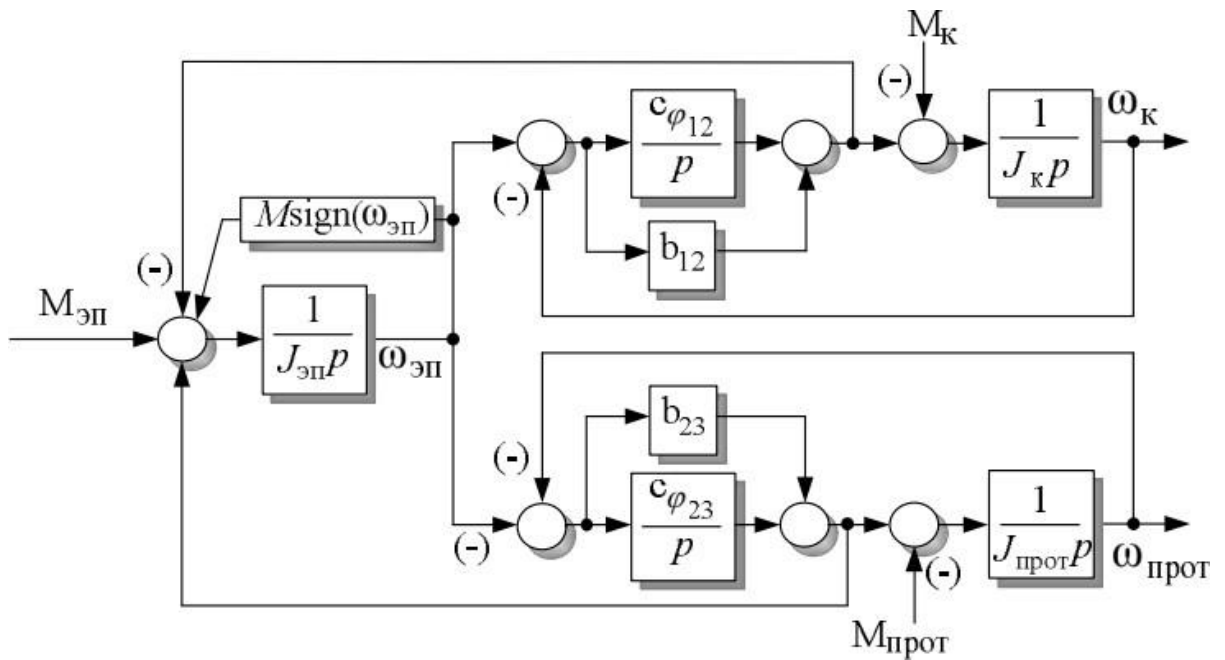


Рисунок 12 - Структурна схема тьохмасової механічної частини безредукторної ліфтової лебідки

### 3. ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

#### 3.1 Розрахунок потужності двигуна та його вибір

Технічні параметри проектованого ліфта наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Задані параметри ліфта

Вантажопідйомність, G	Вага кабіни, G <sub>0</sub>	Вага противаги	Швидкість підйому, v	ККД ліфта, η	ПВ
400 кг	800 кг	1000 кг	1 м/с	0,8	60%

Розрахуємо потужність при підйомі:

$$P_{\text{под}} = \frac{G + G_0 - G_{\text{пр}}}{102 \cdot \eta} = \frac{800 + 400 - 1000}{102 \cdot 0.8} = 2,451 \text{ кВт} \quad (3.1)$$

Як уже згадувалося, застосування стандартного промислового двигуна у конструкції безредукторної ліфтової лебідки вважається неефективним. У зв'язку з цим необхідно віддати перевагу тихохідного асинхронного двигуна.

Однак масове серійне виробництво тихохідних двигунів на даний момент практично не організоване, і їхнє виготовлення зазвичай здійснюється під індивідуальні замовлення в рамках спеціалізованих серій.

Для створення тихохідних двигунів на базі стандартних асинхронних двигунів загальнопромислового призначення з числом полюсів  $2p = 6-12$  існує велика кількість розроблених методик.

У таблиці 4 наведено перелік діючих зразків тихохідних двигунів відповідної потужності.

Таблиця 4 - Тихохідні асинхронні двигуни

ТИП	P <sub>ном</sub> , кВт	ККД, %	Cos φ	I <sub>ном</sub> , А	M <sub>макс</sub> /M <sub>ном</sub>
5AF200M8	2,41	47,1	0,87	10	1,23
ЧРАД200L8	2,5	50,2	0,85	9,6	1,38
5AF225M8	2,6	55,6	0,756	5,1	1,36

Ми зупинили вибір на двигуні 5AF225M8, оскільки його номінальний струм статорної обмотки є найнижчим серед варіантів, що розглядаються. Такий вибір дозволяє значно знизити витрати на придбання перетворювача частоти, і на загальне енергоспоживання.

Таблиця 5. Паспортні дані двигуна 5AF225M8:

Паспортні дані		Параметри схеми заміщення	
$P_{НОМ} = 2600$ Вт	<i>Потужність</i>	$R_S = 8,15$ Ом	<i>Активний опір статора</i>
$U_{НОМ} = 323$ В	<i>Фазна напруга</i>	$L_S = 0,261$	<i>Індуктивність статора</i>
$I_{НОМ} = 5,1$ А	<i>Фазний струм</i>	$R_r = 3,9$ Ом	<i>Активний опір ротора</i>
$n_{НОМ} = 51$ об/хв	<i>Номінальна частота обертання</i>	$L_r = 0,285$ Гн	<i>Індуктивність ротора</i>
$\cos\varphi_{НОМ} = 0,75$	<i>Коефіцієнт потужності</i>	$L_m = 0,19$ Гн	<i>Індуктивність ланцюга намагнічення</i>
$\eta_{НОМ} = 55,6\%$	<i>ККД</i>	$J = 0,07$ кг м <sup>2</sup>	<i>Момент інерції двигуна</i>
$f_{НОМ} = 40$ Гц	<i>Номінальна частота</i>		

### 3.1.1 Побудова механічних і електромеханічних характеристик

Давайте, спираючись на дані таблиці 5, створимо механічні та електромеханічні характеристики нашого обраного двигуна. Розрахунок механічної характеристики проведемо за формулою [5]:

$$M(\omega) = \frac{m \cdot U_s^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \left[ (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 \right]}, \quad (3.2)$$

де  $m$ - кількість фаз статора;  $U_s^2$  – напруга фази обмотки статора;  $\omega_0$  - синхронная угловая скорость;  $s$  – ковзання;  $R_1 X_{1\sigma}$ ,  $R_2 X_{2\sigma}$  активні та індуктивні опори стора та ротора.

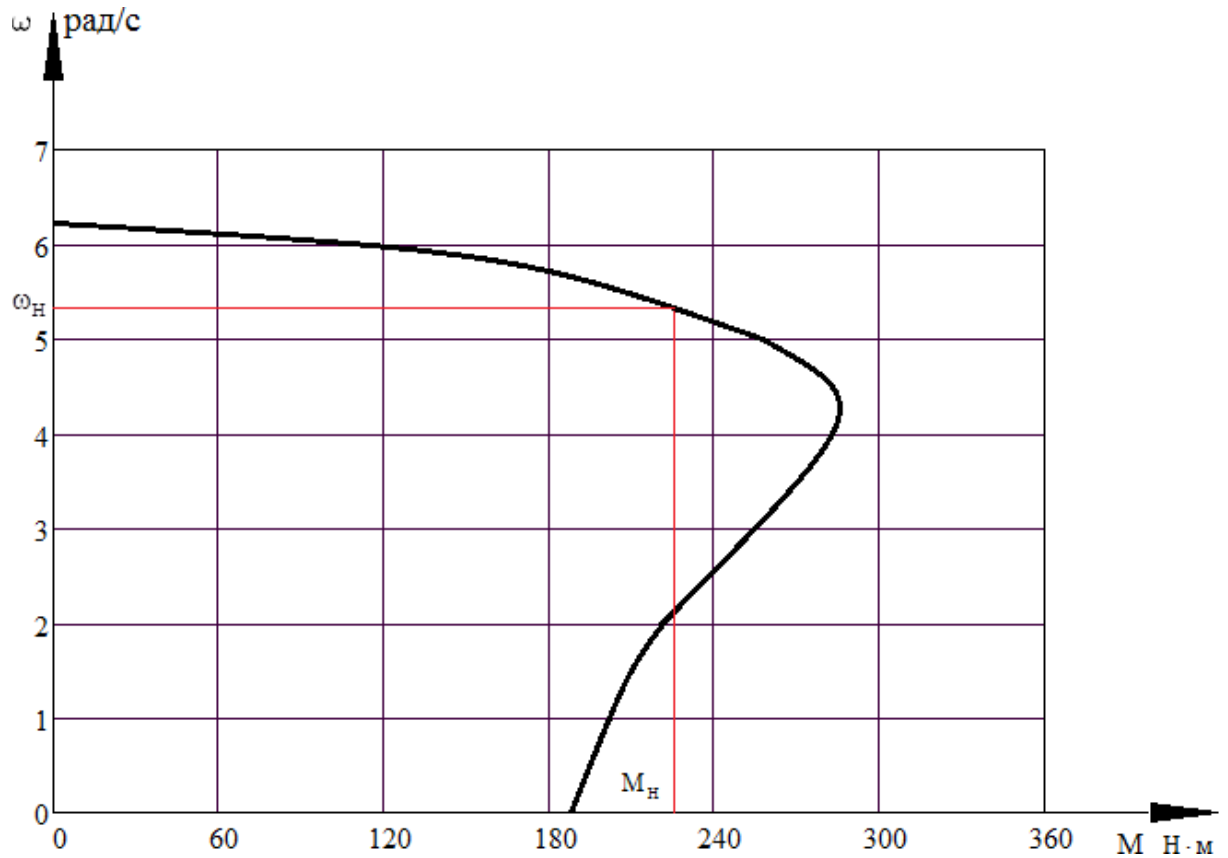


Рисунок 13 - Механічна характеристика ГАД при номінальному режимі роботи

Електромеханічну характеристику розрахуємо за такою формулою:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_m^2 + I_r'^2 + 2 \cdot I_m \cdot I_r' \cdot \sin[\varphi_2]}, \quad (3.3)$$

де  $I_m$  – струм намагнічування;  $I_r'$  – струм ротора приведений до статора;  $\varphi_2$  – кут між ЕРС ротора та струмом ротора.



Рисунок 14 - Електромеханічна характеристика ТАД у номінальному режимі роботи

### 3.2 Вибір перетворювача частоти

Нині в ліфтобудуванні не часто застосовують технологію з тихохідним асинхронним двигуном для без редукторних лебідок. Тому спеціалізовані перетворювачі частоти для таких двигунів поки що не випускаються серійно. Щоб правильно вибрати перетворювач частоти для керування без редукторним електроприводом ліфтової лебідки, важливо врахувати вимоги, зазначені в розділі 1.9. Вибрано перетворювач частоти українського виробника компанії (Рисунок 15), і його основні характеристики представлені в таблиці 6. Серія перетворювачів частоти відмінно підходить для головного приводу вантажопасажирських ліфтів в житлових та адміністративних будівлях і призначена для управління швидкістю обертання та обертовим моментом.

### 3.2.1 Технічні характеристики

Таблиця 6 – Технічні характеристики вибраного частотника

<b>Параметри</b>	<b>Характеристики</b>
Функції керування	Діапазон
Скалярний у розімкнутій системі	Регулювання швидкості 1:10
Скалярний зі зворотним зв'язком по швидкості	Регулювання швидкості 1:40
Вектор у розімкнутій системі	Регулювання швидкості 1:20
Векторний зворотний зв'язок швидкості	Регулювання швидкості 1:1000
Діапазон зміни частоти вихідної напруги, Гц	0 ... 320 (крок 0,1 Гц)
Стабілізація моменту електродвигуна, %	±5
Пусковий момент, % від номінального значення, не менше	200
Струм спрацьовування захисту при короткому замиканні, % від номінального значення	200
<b>Електричні параметри</b>	
Потужність керованого електродвигуна, кВт	До 3,7 кВт
Перевантажувальна здатність: При струмі 150-200 % від номінального значення, з	60
При струмі 120-150 % від номінального значення, з	180
Напруга мережі живлення, В	380
Частота мережі живлення, Гц	50 ± 2
Вбудоване джерело живлення дискретного інтерфейсу зовнішніх пристроїв:	
• напруга живлення,	24
• струм навантаження, мА	300

Таблиця 7 - Параметри сигналів введення-виводу

Багатоцільові дискретні вхідні канали управління. Напруга, В Кількість каналів, прим.	Налаштована логіка Р або N  24 8
Багатоцільові вихідні дискретні канали керування, тип «Відкритий колектор»: • напругою постійного струму, В • постійним струмом, мА Кількість каналів, прим.	  24 150 2
Релейний вихід: • змінна напруга, В, не більше • змінним струмом, А, не більше • постійна напруга, В, більше • постійний струм, А, не більше	 250 2 30 4
Діапазон виміру опору датчика, ком.	0,1...4
Диференціальний імпульсний вхід: • Напруга, • Струм, ма • Частота, кГц	підключення датчика швидкості 5 100 0-300
Інтерфейси зв'язку	USB для зв'язку із ПК; RS-485 (Modbus RTU, ProfiBus DP)
Максимальна швидкість обміну	115 Кбіт/с

Таблиця 8 - Умови експлуатації

Ступінь захисту	IP20
Діапазон робочих температур, °С	-10 ... +50
Відносна вологість при температурі 35 °С, %, не більше	95
Атмосферний тиск, кПа	84 ... 106,7

Таблиця 9 – Параметри надійності

Термін служби, років 10
Захисні функції: ведення журналу подій; захист від обриву фаз вхідних навантажень захист від зниження/перевищення напруги; захист від перегріву перетворювача частоти; захист від перегріву електродвигуна (за датчиком температури); захист від перегріву гальмівного резистора; захист від перегріву гальмівного резистора; захист від кз м/у фазами/на землю; контроль перекидання двигуна; контроль втрати завдання швидкості / зв'язку з послід. інтерфейсу; контроль роботи вентилятора / датчика температури



Рисунок 15 – Перетворювач частоти

### 3.2.2 Особливості

Можливості перетворювача частоти для керування асинхронним двигуном, включаючи векторне керування, збільшення пускового моменту до 200%, індикацію режимів роботи, дистанційне керування та опційно інтерфейс RS-485. Також згадуються функції оптимізації енергоспоживання, спеціальне програмне забезпечення для управління ліфтом, плавна траєкторія розгону та зупинки, пропуск резонансних частот, режими прискореного налаштування та навчання, вбудований гальмівний ключ, інтерфейс інкрементного датчика швидкості та USB для підключення до ПК. Однак перетворювач не спеціалізований для тихохідних асинхронних двигунів, що збільшує його вартість через високі ціни на напівпровідникові елементи. Тихохідні двигуни мають низьку частоту напруги (4-10 Гц), що дозволяє суттєво заощадити на елементах перетворювача та знизити ціну спеціалізованих рішень.

### 3.3 Вибір без редукторної ліфтової лебідки

При виборі безредукторної лебідки важливо враховувати вимоги, описані у розділі 1,7. Хоча ідея безредукторної ліфтової лебідки не нова, традиційно використовувалися синхронні багатополосні двигуни з постійними магнітами, які мають недоліки: висока вартість, низький ресурс, несумісність із вітчизняними станціями управління, погана ремонтпридатність та проблеми з утилізацією. У зв'язку з цим системи з урахуванням технології ПЧ-ТАД стають актуальними. Переваги без редукторного електроприводу з ТАД включають нижчу вартість, сумісність із традиційними установками, відповідність вітчизняним системам управління, високу екологічність, кращу ремонтпридатність та сертифікацію.

Вибираємо лебідку (Рисунок 16), її параметри занесені до таблиці 10.

Таблиця 10. Технічні параметри лебідки

$V_{НОМ}$ , м/с	Вантажопідйомність, кг	$I_{НОМ}$ , А	$n_{НОМ}$ , об/хв	$M_{НОМ}$ , Н·м	$M_{max}$ , Н·м	$P_{ЕД}$ , кВт	$I_{max}$ , А
1	400	7,2	61	240	300	2,6	19



Рисунок 16 – Без редукторна лебідка

### 3.4 Моделювання без редукторного елекпривода ліфта на основі тихохідного асинхронного двигуна

#### 3.4.1 Моделювання ТАД у нерухомій системі координат.

З метою продовження дослідження без редукторного електроприводу необхідно впевнитись у адекватності імітаційної моделі тихохідного асинхронного двигуна. У зв'язку з цим була розроблена імітаційна модель даного двигуна в нерухомій системі координат [12]. Для формування моделі потрібно модифікувати раніше отриману математичну модель асинхронного тихохідного двигуна з урахуванням системи відносних одиниць.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{1}{l_3(i_m)} \cdot (u_{s\alpha} - r_3(i_m) \cdot i_{s\alpha} + k_r(i_m) \cdot a_r(i_m) \cdot \psi_{r\alpha} - k_r(i_m) \cdot \omega_r \cdot \psi_{r\beta}) \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{1}{l_3(i_m)} \cdot (u_{s\beta} - r_3(i_m) \cdot i_{s\beta} + k_r(i_m) \cdot a_r(i_m) \cdot \psi_{r\beta} - k_r(i_m) \cdot \omega_r \cdot \psi_{r\alpha}) \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= r_r \cdot k_r(i_m) \cdot i_{s\alpha} - a_r(i_m) \cdot \psi_{r\alpha} - \omega_r \cdot \psi_{r\beta} \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= r_r \cdot k_r(i_m) \cdot i_{s\beta} - a_r(i_m) \cdot \psi_{r\beta} - \omega_r \cdot \psi_{r\alpha} \\ M &= k_m (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} \cdot (M - M_{нарп}) \end{aligned} \right.$$

Де змінні з індексами а і b є компонентами просторового вектора в інерційній системі координат. На підставі зазначених рівнянь було розроблено структурну схему ТАД, яка ілюструється на малюнку 17.

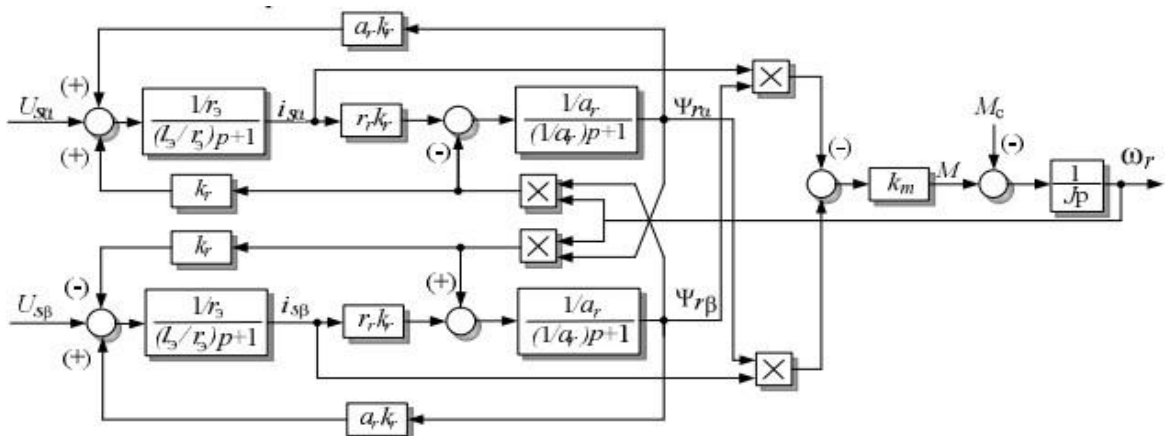


Рисунок 17 - Структурна схема асинхронного тихохідного двигуна в нерухомій системі координат

У цій роботі реалізується структурна схема у прикладній програмі Simulink Matlab 2014b (П1). Здійснюється прямий пуск асинхронного тихохідного двигуна в умовах некерованого режиму роботи. Пуск проводиться без навантаження, після досягнення номінальної швидкості здійснюється подача навантаження, що дорівнює номінальному моменту. Результати дослідження імітаційної моделі ТАД у нерухомій системі координат представлені на Рисунок 18.

Аналіз графіків показує, що пуск двигуна супроводжується різкою зміною швидкості та моменту. Після завершення перехідного процесу швидкість встановлюється на рівні номінальної, тоді як момент дорівнює 0, що відповідає режиму холостого ходу. У момент часу 0,2, після додавання навантаження, спостерігається тимчасове просідання швидкості та різка зміна моменту. Після завершення перехідного процесу швидкість повертається до номінального значення 1,7 о.е., а момент становить 1, що відповідає номінальному моменту 220 Н.

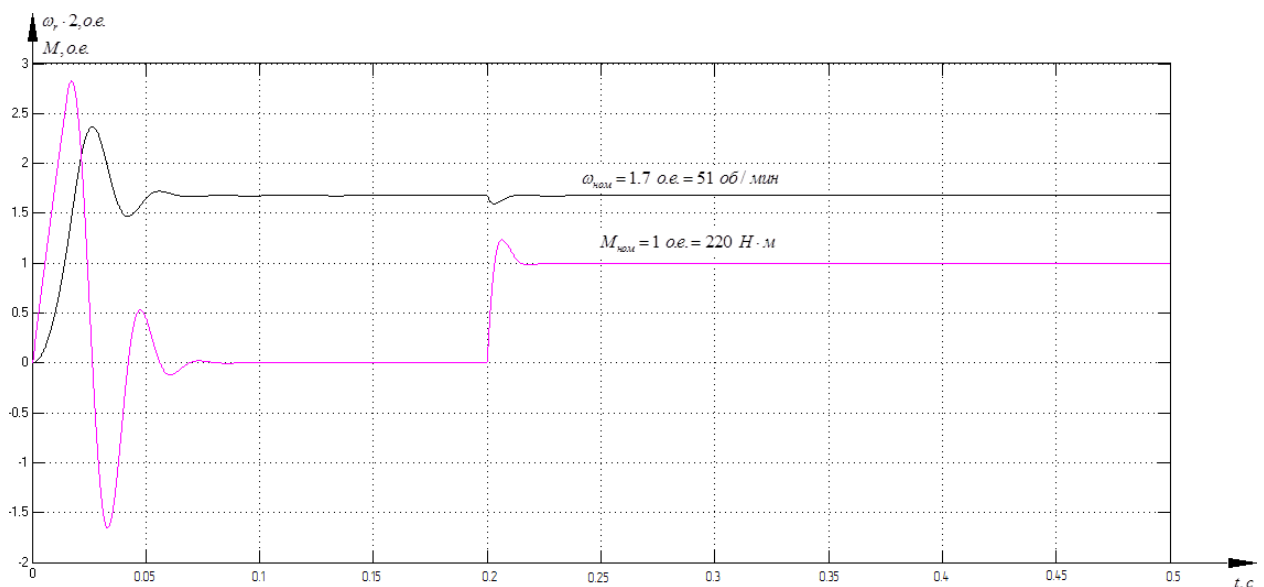


Рисунок 18 – Графіки перехідних процесів моменту та швидкості при прямому пуску ТАД з подальшим накиданням навантаження

Грунтуючись на вищевикладеному, можна зробити висновок, що імітаційна модель тихохідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором демонструє значну відмінність у своїй поведінці в порівнянні з

моделями загальнопромислових асинхронних двигунів. Таким чином, можна стверджувати, що ця модель є адекватною для досліджень.

### **3.5 Створення системи управління ТАД**

Відповідно до встановлених вимог до ліфтових установок, необхідно розробити систему керування для тихохідного асинхронного двигуна. У процесі проектування систем керування для безредукторних ліфтових лебідок, що базуються на тихохідних асинхронних двигунах, застосовується виключно класична система векторного керування. Система управління включає чотири контури: два для керування компонентами вектора струму статора, контур керування потокозчепленням ротора і контур швидкості зі зворотним зв'язком, що використовує датчик швидкості (енкодер). Орієнтація системи координат, що обертається здійснюється по вектору потокозчеплення ротора, в той час як зв'язок між системою координат системи управління, що обертається, і стаціонарною системою координат моделі двигуна забезпечується за допомогою прямих і зворотних координатних перетворювачів Парку-Горьова. Функціональна схема асинхронного двигуна з векторним керуванням, що використовує датчик швидкості, представлена на Рисунок 19.

Згідно з цією функціональною схемою, нам потрібно провести структурний та параметричний синтез регуляторів для системи управління.

При створенні регуляторів, які керуватимуть складовими вектора струму статора і потоком зчеплення ротора, ми використовували метод, який допомагає визначити бажану передатну функцію, налаштовуючи модульний оптимум.

Щодо контурів керування частотою обертання та положенням, ми вибрали налаштування на симетричний оптимум, щоб мінімізувати помилки, що виникають через обурення.

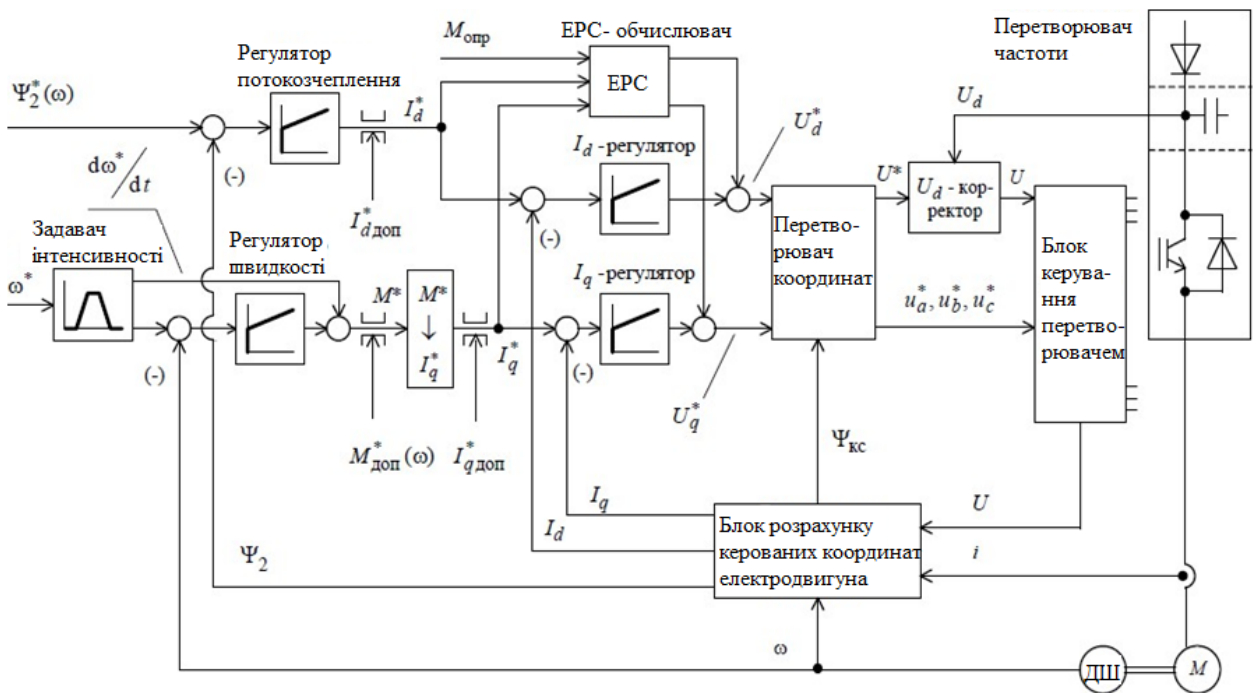


Рисунок 19 - Функціональна схема асинхронного двигуна з векторним керуванням з датчиком швидкості

### 3.6 Структурна схема нелінійної системи керування ТАД з векторним керуванням з датчиком швидкості

Після проведення розрахунку необхідних регуляторів та вибору задавача інтенсивності буде сформована структурна схема управління електроприводом (Рисунок 20). В якості моделі двигуна використовується структурна модель асинхронного тиххідного двигуна в нерухомій системі координат.

Імітаційна модель, розроблена в середовищі MATLAB Simulink версії 2014b, представлена в додатку В. Результати моделювання векторної системи керування тиххідного асинхронного двигуна з урахуванням нелінійностей, а також з регуляторами струму, швидкості та потокозчеплення, та із задавачем інтенсивності швидкості, представлені на Рисунок 21 та Рисунок 22.

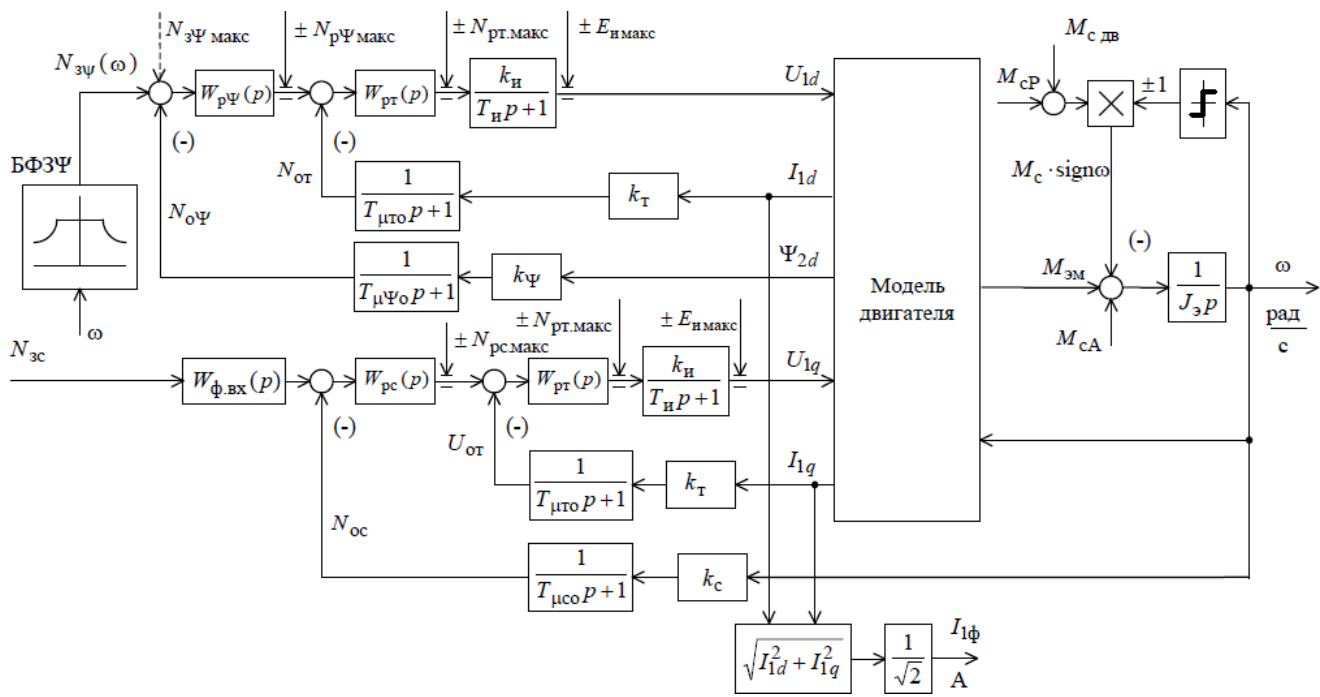


Рисунок 20 – Структурна схема нелінійної системи автоматичного керування асинхронного електроприводу з векторним керуванням

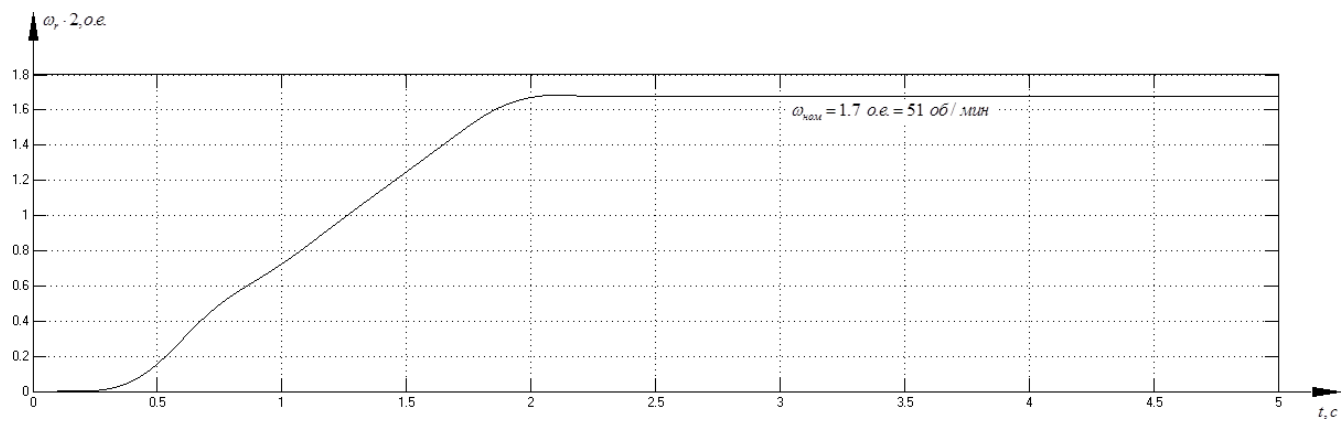


Рисунок 21 – Графік перехідного процесу швидкості обертання ТАД

Аналіз графіка демонструє, що при застосуванні S-подібного задавача інтенсивності швидкості в процесі запуску двигуна з номінальним навантаженням спостерігається плавне збільшення швидкості на валу двигуна, яке досягає номінального значення через 2 секунди після початку роботи. Плавне наростання швидкості є необхідною умовою для забезпечення комфортного старту та завершення руху.

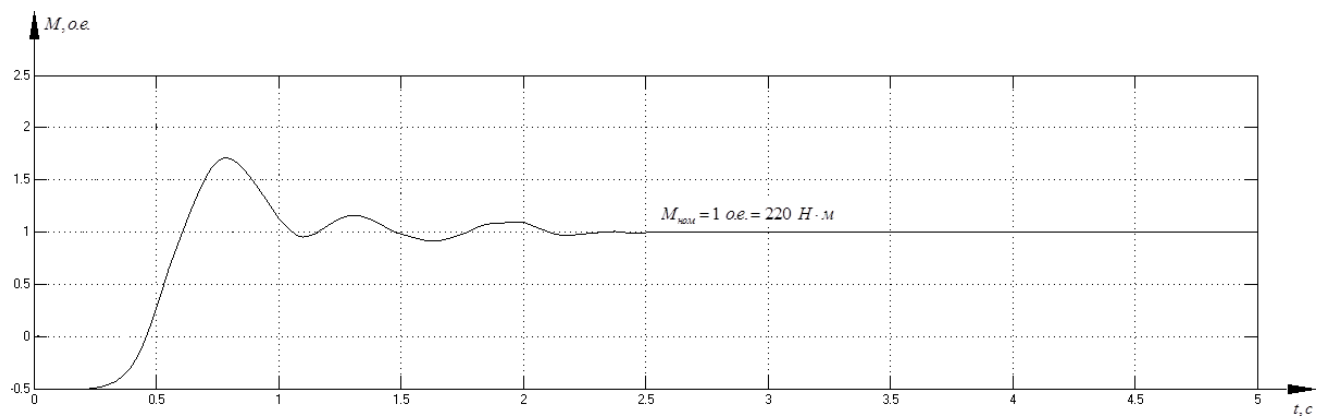
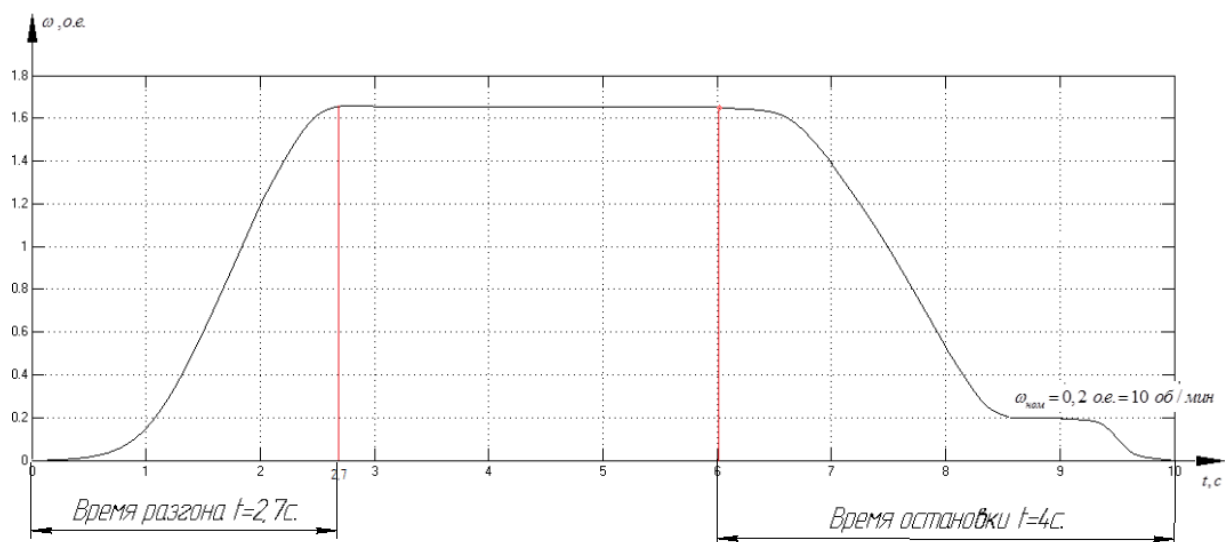


Рисунок 22 – Графік переходного процесу моменту ТВД при плавному пуску

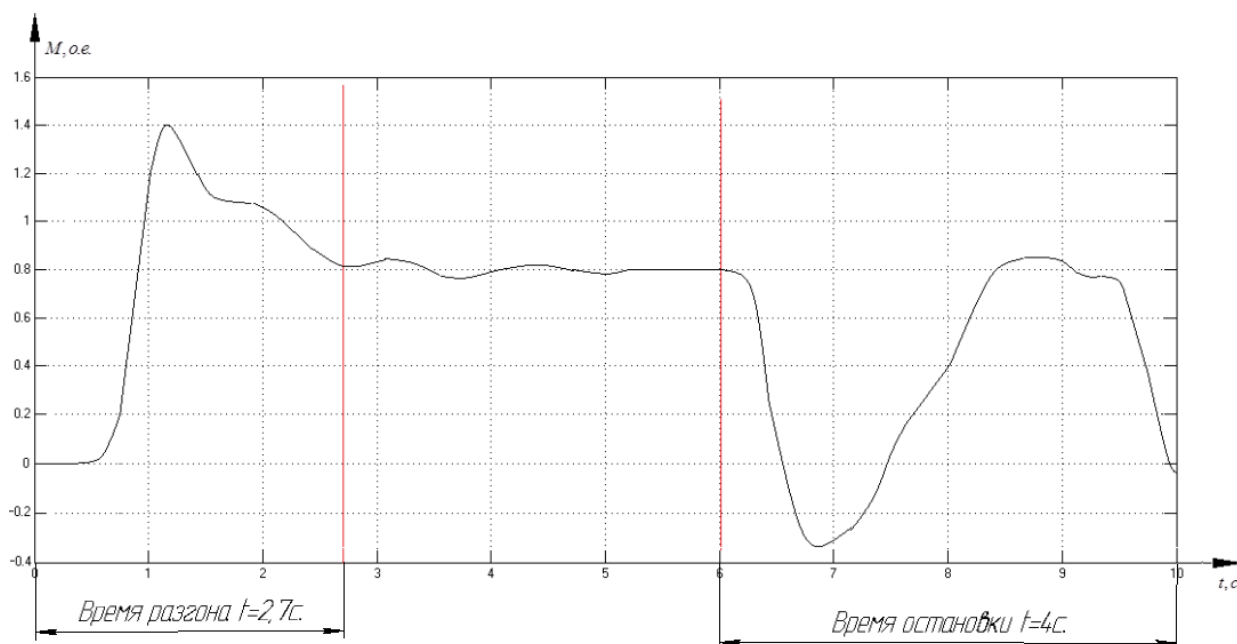
Як видно з графіка, при плавному пуску ТВД із розробленою системою управління коливання моменту зменшилися майже в 2 рази.

### **3.7 Моделювання тиххідного електроприводу з безредукторною ліфтовою лебідкою.**

У даному розділі буде розглянуто навантаження, яке стосується вищеописаної моделі безредукторної ліфтової лебідки. Таким чином, отримана модель буде включати в себе: імітаційну модель тиххідного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в нерухомій системі координат, імітаційну модель безредукторної ліфтової лебідки, представлену у вигляді тьохмасової механічної системи, а також систему автоматичного керування двигуном, яка буде представлена у форматі вектора потокозчеплення. Пристрій плавного пуску буде реалізовано через S-подібний задатчик інтенсивності. Імітаційна модель представлена у додатку Г. Перехідні процеси швидкості на валу двигуна та моменту проілюстровані Рисунок 23 а,б.



а)



б)

Рисунок 23 – Перехідні процеси розробленого електроприводу. а) швидкості; б) моменту

На підставі результатів моделювання можна зробити висновок, що використання S-подібного задатчика інтенсивності сприяє плавному розгоню двигуна, при цьому час розгону до досягнення номінальної швидкості становить 2,7 секунди. Далі, за допомогою задатчика інтенсивності було

змодельовано режим зупинки кабіни: кабіна, що рухається з номінальною швидкістю, наближається до поверху зупинки, де датчики фіксують її наближення та подають сигнал зниження швидкості; при безпосередній близькості до поверху зупинки кабіна переходить на знижену швидкість, що дозволяє зробити точну зупинку на рівні поверху.

Аналіз перехідного процесу моменту двигуна показує, що навантаження у вигляді безредукторної лебідки, реалізованої в тримасовій системі, відрізняється від одномасової подачі навантаження. У процесі пуску спостерігається стрибок моменту, а також є певні нелінійності навіть після досягнення номінальної швидкості. При досягненні датчиками точної зупинки спрацьовує гальмо, що призводить до зниження швидкості двигуна, що, у свою чергу, викликає просідання моменту, після чого момент повертається до номінального значення (рух на зниженій швидкості). Додаткова просадка моменту фіксується при кінцевій зупинці двигуна.

Також слід зазначити, що навантаження у вигляді безредукторної лебідки виявилось дещо нижчим за номінальний момент двигуна. Це не є критичним, оскільки ліфт рідко функціонує з повним завантаженням кабіни. Найчастіше кабіна завантажена на 30-60%. Таким чином, дана недоробка не вплине на ресурс двигуна і загальне енергоспоживання.

## ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Вступ

Цей розділ охоплює питання створення необхідних умов праці, включаючи санітарно-гігієнічні аспекти, захист від негативних виробничих факторів та забезпечення пожежної безпеки відповідно до чинних нормативних актів. Також розглядаються питання екологічної безпеки та заходи щодо забезпечення безпеки у надзвичайних ситуаціях. У рамках цієї випускної кваліфікаційної роботи розроблено регульований безредукторний електропривод ліфта на базі тихохідного асинхронного двигуна. Дослідження проводиться у закритому приміщенні з природною вентиляцією, обладнанням як штучним, так і природним освітленням. Основне робоче устаткування – персональні електронні обчислювальні машини (ПЕОМ). Обговорення цих питань відповідає вимогам міжнародного стандарту ICCSR-26000:2011 щодо діяльності організацій у сфері соціальної відповідальності.

### 4.2 Опис та аналіз небезпечних та шкідливих факторів

При експлуатації ліфтового електроприводу необхідно враховувати наявність та можливість впливу наступних шкідливих виробничих факторів:

Порушення навколишнього середовища в приміщенні - дуже низька або висока температура, висока вологість, вітер, протяги;

- Підвищений рівень шуму та вібрацій;
- Недостатня освітленість робочої зони;
- Неприпустима забрудненість повітря пилом, газами або парами.

#### 4.2.1. Мікроклімат у приміщенні

Поняття «клімат» включає температуру, вологість, рівень випромінювань і швидкість руху повітря. Для нормальної життєдіяльності людини необхідно підтримувати постійну температуру тіла близько 37 °С, а тепловий баланс має вирівнюватись у певні проміжки часу. На теплообмін

впливає клімат, який вважається сприятливим, якщо для підтримки теплового балансу не потрібні спеціальні регулюючі пристрої. Теплові випромінювання походять від усіх нагрітих тіл, включаючи розплавлені метали, електродвигуни, що працюють, і освітлювальні лампи. Відносна вологість, що визначається як відношення вмісту водяної пари до їх максимально можливого вмісту, характеризує вологість повітря за певної температури. При значному перегріві організму може виникнути небезпечне захворювання, зване тепловим ударом, що у важких випадках може призвести до смерті. Для підтримки нормального мікроклімату застосовують вентиляцію або кондиціонування повітря.

#### 4.2.2. Шум та вібрація

Шум є одним із найпоширеніших несприятливих факторів виробничого середовища. Основні процеси, що супроводжуються шумом, включають роботу вентилятора головного провітрювання. Шум надає як місцеве, і загальний вплив на організм, викликаючи почастищення пульсу, дихання, підвищення артеріального тиску та зміна функцій шлунка. Для захисту від шуму та вібрації передбачені:

- Забезпечення персоналу індивідуальними засобами захисту;
- Звукоізолюючі кожухи та екрани;
- Віброізолюючі матеріали під обладнання.

Зниження шуму від обертових частин машин досягається створенням більш гладких поверхонь, високою точністю балансування та використанням якісних підшипників. Правильний догляд за обладнанням та належне мастило також мають велике значення. Для індивідуального захисту робітників від шуму застосовуються вкладки з вати або пробки, а також спеціальні навушники.

#### 4.2.3. Недостатня освітленість

Недостатнє освітлення негативно впливає на функціонування зорового апарату і психіку людини, викликаючи втому центральної нервової системи. Світло, крім забезпечення зорового сприйняття, впливає на нервову систему і регулює обмін речовин. Порівняльна оцінка природного та штучного освітлення показує перевагу природного світла. Важливо враховувати як рівень освітленості, а й якість освітлення запобігання нещасним випадкам. Неправильне освітлення може створити проблеми адаптації та знизити видимість, що призводить до втоми очей та зниження працездатності. Для оптимізації умов праці необхідно забезпечити рівномірне та стійке освітлення робочих місць.

Обстеження умов освітлення включає виміри і візуальну оцінку різних показників, таких як коефіцієнт природної освітленості і освітленість робочої поверхні. Дотримання санітарних норм до факторів світлового середовища є важливим для створення комфортних умов органу зору. Коефіцієнт пульсації освітленості може бути трохи більше 5% робочих місць з ПЕОМ. Місцеве освітлення має створювати відблисків на екрані і збільшувати освітленість екрану ПЕОМ більше 300 лк.

Неправильне освітлення може призвести до підвищеної втоми очей та розвитку короткозорості. Рекомендації щодо забезпечення норм освітленості відомі та включають встановлення додаткових світильників та зміну орієнтації робочих столів. Однак на значну невідповідність нормам у багатьох організаціях не звертають уваги, що негативно впливає на здоров'я працівників.

### **4.3 Аналіз небезпечних факторів**

Утворення пожежонебезпечних сумішей газів, небезпека загоряння;  
Небезпека електроураження працюючого в електричному ланцюзі.

#### 4.2.4. Загоряння (пожежа)

Пожежі є неконтрольованим процесом горіння, який може призвести до значних матеріальних втрат і людських жертв. Забезпечення пожежної безпеки починається із визначення класу вибухонебезпечної зони. До первинних засобів пожежогасіння належать переносні вогнегасники, обладнання пожежних щитів та ящики з порошковими складами. Ці засоби повинні бути розміщені у легкодоступних місцях та не заважати евакуації персоналу.

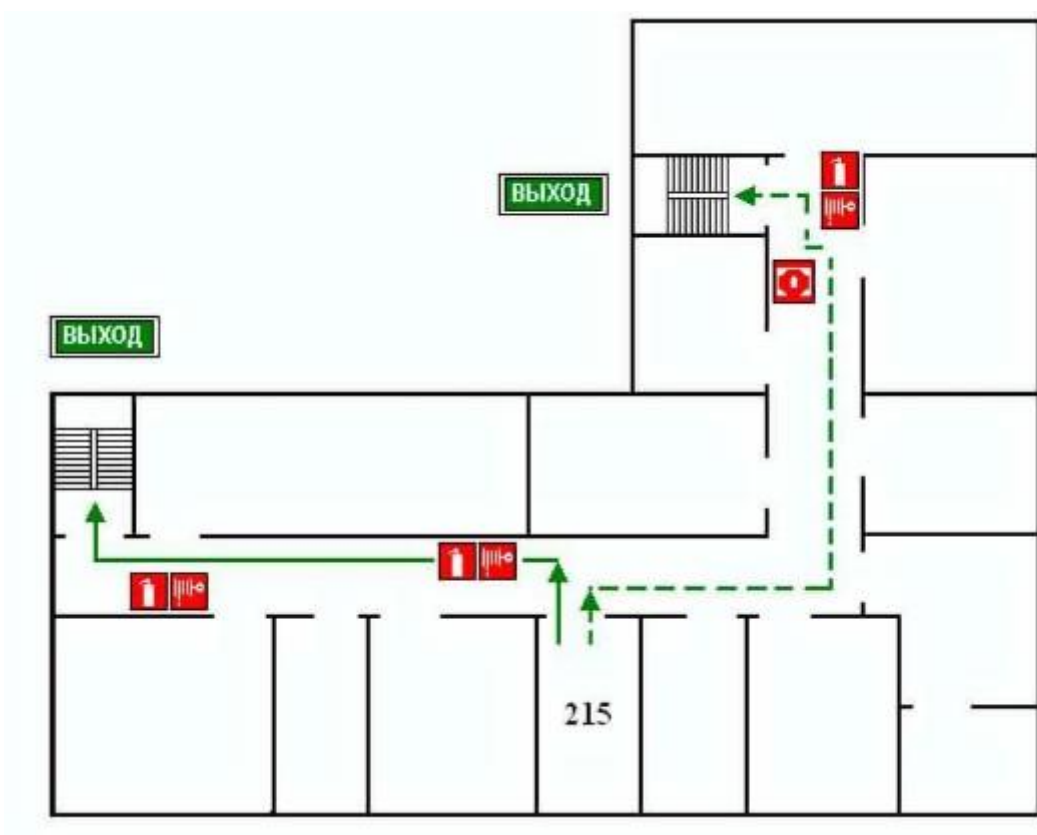


Рисунок 24 План евакуації

#### 4.2.5. Електроураження

Електроураження є небезпечним для життя і відбувається при зіткненні з електричною мережею. При розробці засобів захисту від електроураження необхідно враховувати категорію приміщення, вимоги до електроустаткування та заходи щодо усунення невідповідностей. У

лабораторії необхідно застосовувати колективні засоби захисту, такі як ізоляція проводів та захисне заземлення.

#### 4.2.6. Розробка прийняття рішень щодо утилізації відходів

Комп'ютери містять токсичні речовини, що становлять загрозу для людини та навколишнього середовища. До таких речовин відносяться свинець, ртуть, нікель та луги. Утилізація комп'ютерів вимагає спеціальних методів, включаючи відділення металевих частин від неметалевих та переробку. Перед покупкою нового комп'ютера необхідно заздалегідь продумати способи утилізації старої техніки та дізнатися про відповідність нової техніки сучасним екологічним стандартам.

### 4.4 Запобігання НС та усунення наслідків

Найбільш ймовірні надзвичайні ситуації в лабораторії включають пожежу та електроураження. Основні причини пожежі можуть бути пов'язані з перевантаженням проводів та коротким замиканням. Пожежна профілактика включає систему запобігання пожежі та організаційно-технічні заходи. При виявленні загоряння необхідно негайно повідомити пожежну охорону та організувати евакуацію.

Сучасна система електробезпеки забезпечує захист від ураження при прямому і непрямому дотику до струмоведучих частин. Для захисту від прямого дотику використовуються ізоляція та огороження, а для захисту від непрямиго дотику – захисне заземлення. У разі електроураження постраждалий повинен бути звільнений від дії електричного струму та оглянутий лікарем.

### 4.5 Правові та організаційні питання забезпечення безпеки

При розміщенні робочих місць з ЕОМ відстань між робочими столами має становити не менше 2,0 м, а між бічними поверхнями відеомоніторів – не менше 1,2 м. Робочі місця повинні розміщуватись у ізольованих кабінах з організованим повітрообміном. Екран відеомонітора повинен знаходитись на відстані 600 - 700 мм від очей користувача.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було вирішено всі поставлені завдання.

- Було проведено літературний огляд існуючого ліфтового обладнання. Вивчено принцип роботи досліджуваного механізму. Розглянуто вимоги до проектування ліфтового обладнання, згідно з якими проводитиметься подальше дослідження.

- Проведено математичний опис тихохідного асинхронного двигуна та механічної частини. Виявлено, що опис тихохідних асинхронних машин має аналогічний метод складання диференціальних рівнянь, як і асинхронних машин загальнопромислового призначення.

- Встановлено, що тримасова система є оптимальною для моделювання процесів безредукторної ліфтової лебідки, оскільки збільшення кількості мас призвело б до надмірного ускладнення математичного опису.

- Вибрано основне обладнання для практичної реалізації безредукторного електроприводу ліфта на основі асинхронного тихохідного двигуна з параметрами відповідно до завдання. Було обрано тихохідний асинхронний двигун 5AF225M8, перетворювач частоти ESD-TCL і безредукторну лебідку.

- Проведено імітаційне моделювання у прикладному пакеті програм Simulink MATLAB 2014b. Досліджено модель тихохідного асинхронного двигуна у нерухомій системі координат при прямому пуску. Внаслідок чого було зроблено висновок, що створена модель є адекватною та придатною для подальших досліджень.

- Розглянуто питання щодо розділу охорони праці. Встановлено небезпечні та шкідливі фактори при роботі обладнання. Запропоновані заходи що до безпеки.

швидкості, що включає чотири контури регулювання: 2 контури по струму, за швидкістю і по потокозчепленню.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пилипенко І. О. Основні організаційні заходи відтворення основних засобів підприємств ліфтового господарства//Комунальне господарство міст. Серія : Економічні науки. 2019. Вип. 2. С. 47-52.
2. Ліфти : навч. посібник / О. В. Григоров [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – 172 с.
3. . Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч1.
4. . Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та інш. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посіб. за напрямом «Електромеханіка» / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та інш. – К.: Либідь, 2005. – 680 с. Ч2.
5. Теорія електропривода: Підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін.; За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища шк., 1993 – 494 с.
6. Казачковський М. М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: навч. посіб. [Електронний ресурс] / М. М. Казачковський ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – 2-ге вид., випр. та допов. – Дніпро.: НГУ, 2017. – 324 с. Патент № 2278812. Віттур Хорст, Кюнчер Дітмар. "Безредукторний ліфт з тросовим приводом".
7. Моделювання електромеханічних систем : підручник / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й., Сисук Г.Ю., Садовой О.В]. – Кременчук, 2001. – 410 с.
8. Правила будови та безпечної експлуатації ліфтів: НПАОП '0.00-1.02-08: Затв. .09.2008 № 190 / Державний комітет `України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду — Х.: Вид-во «Індустр», «Основа», 2008. — 192 с. ISBN 978-966-2160-26-0 ISBN 978-966-699-416-8
9. Я. О. Серіков. Основи охорони праці: Навчальний посібник для

студентів вищих закладів освіти. – Харків, ХНАМГ, 2007. - 227с.

10. Купчик М.П., Гандзюк М.П., Степанець І Ф, Вендичанський В.Н., Литвиненко А.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. - К.: Основа, 2000. - 416 с.

## ДОДАТОК А

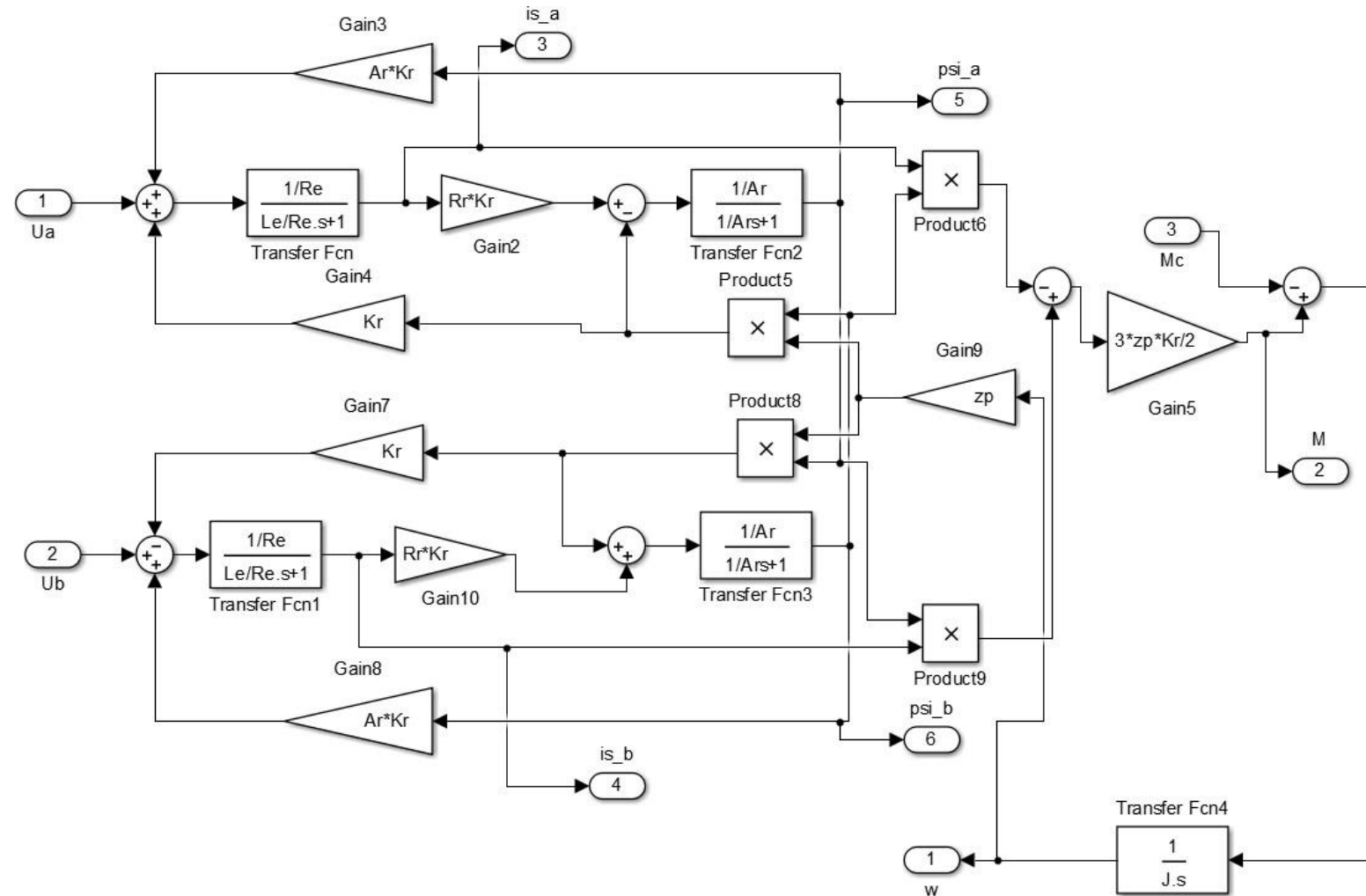


Рисунок А.1. Імітаційна модель у середовищі Simulink-MATLAB для дослідження перехідних процесів прямого пуску моделі тиххідного асинхронного двигуна у нерухомій системі координат

## ДОДАТОК Б

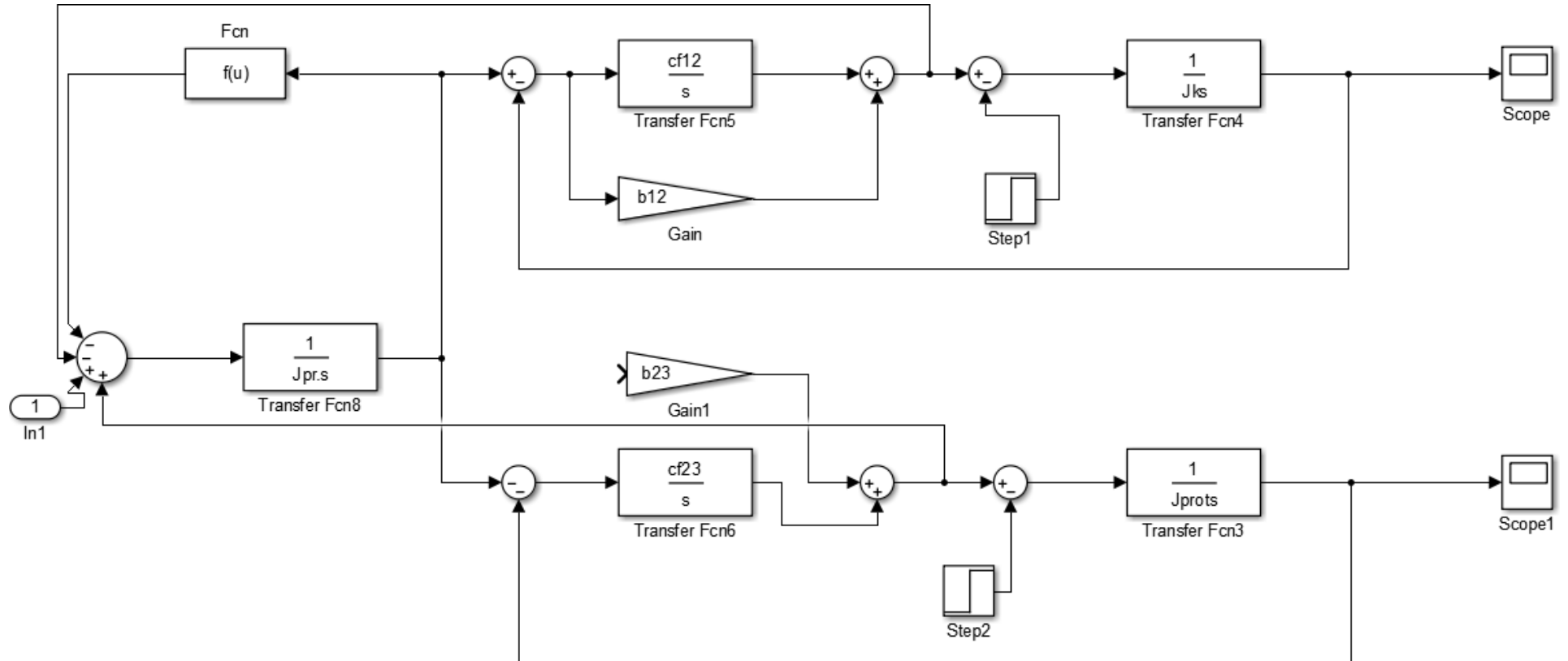


Рисунок Б.1. Імітаційна модель механічної частини безредукторної ліфтової лебідки у середовищі Simulink-MATLAB

## ДОДАТОК В

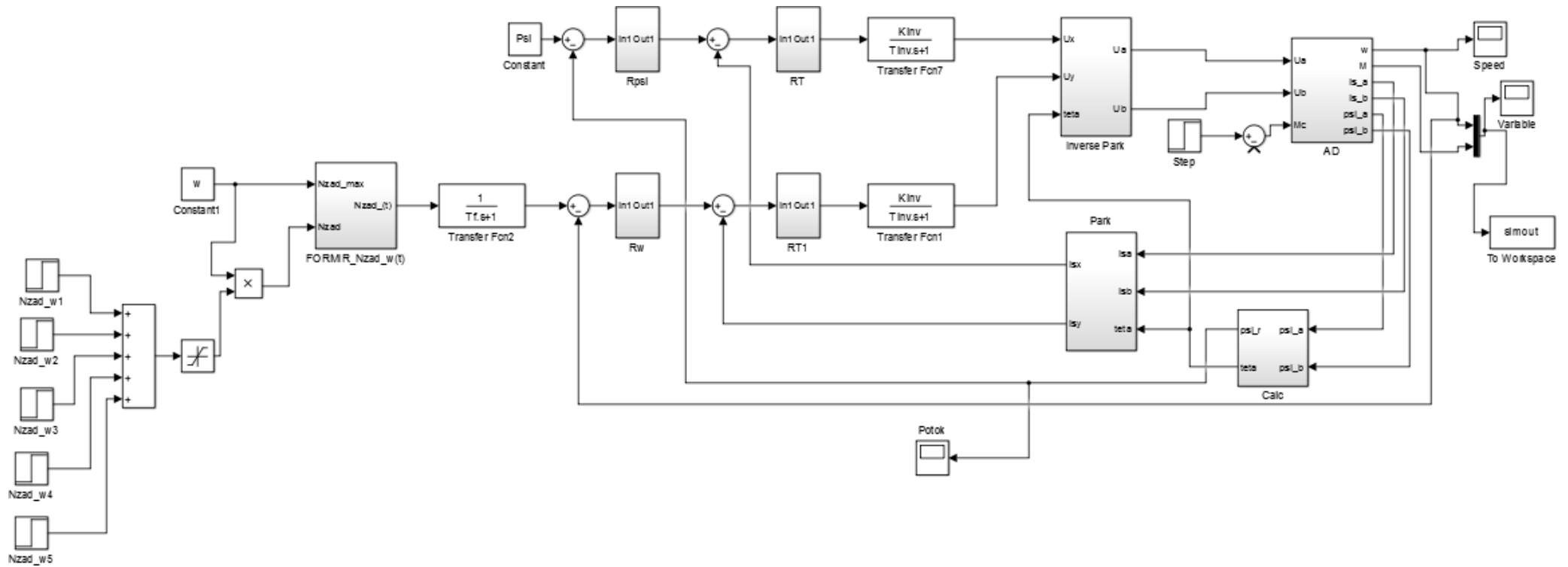


Рисунок В.1 - Імітаційна модель у середовищі Simulink-MATLAB для дослідження перехідних процесів в асинхронному безредукторному електроприводі з векторним керуванням із датчиком швидкості

## ДОДАТОК Г

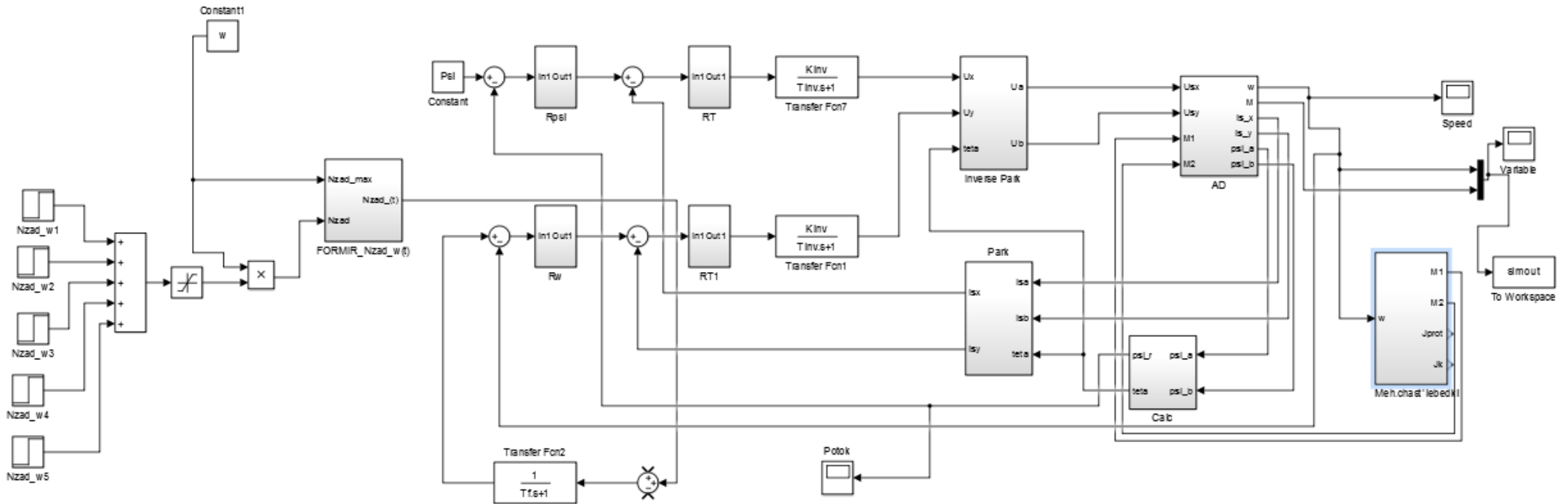


Рисунок Г.1. Імітаційна модель у середовищі Simulink-MATLAB регульованого електроприводу на основі тихохідного асинхронного двигуна з векторним керуванням та врахуванням навантаження у вигляді імітаційної моделі безредукторної ліфтової лебідки