

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**Розрахунок електроприводу механізму  
швидкісного ліфту**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТ-41

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Гончук Р.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний М.С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л. Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В. П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Дідич І. С.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В. П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«    »

20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Гончуку Руслану Михайловичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розрахунок електроприводу механізму швидкісного ліфту

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, кандидат технічних наук, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1162

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Характеристики швидкісного ліфта

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Розрахунково-дослідницький розділ

3 Проектно-конструкторський розділ

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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



## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ-41 - Т.: ТНТУ, 2026.

Стор. 66; рис. 22; табл.2; джерел 12; додатків 0.

Робота присвячено розробці та дослідженню частотно-регульованого асинхронного електроприводу швидкісного пасажирського ліфта для 30-поверхової будівлі.

У роботі проведено аналіз кінематичної схеми установки з канатоведучим шківом та виконано розрахунок потужності силового обладнання в повторно-короткочасному режимі S5. Здійснено вибір електродвигуна AIP160S6, комутаційно-захисної апаратури, живильних кабелів та абсолютного багатообертового енкодера для прецизійного зворотного зв'язку. На основі T-подібної схеми заміщення розраховано статичні характеристики двигуна.

У програмному пакеті Matlab Simulink створено та апробовано імітаційну модель системи автоматичного керування з векторним методом у двох зонах регулювання. Результати моделювання підтвердили хорошу точність відпрацювання S-подібних тахограм руху, обмеження пускових струмів (до 18 А) та дотримання нормативного прискорення (до 2 м/с<sup>2</sup>), що забезпечує енергоефективність і комфорт пасажироперевезень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** АСИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОДВИГУН, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, ШВИДКІСНИЙ ЛІФТ, MATLAB SIMULINK, ЕНКОДЕР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1. Аналіз сфери застосування швидкісних ліфтів .....	8
1.2. Експлуатаційні вимоги до електроприводів швидкісних ліфтів .....	10
1.3. Аналіз кінематичної схеми системи ліфта .....	12
1.4. Використання керованих асинхронних електроприводів та систем автоматизації в ліфтових установках.....	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1. Вихідні дані та експлуатаційні характеристики для розрахунку електромеханічної системи ліфта.....	19
2.2. Розрахунок потужності електроприводу швидкісного ліфта.....	21
2.3. Обґрунтування та вибір приводного електродвигуна.....	26
2.4. Розрахунок та вибір перетворювача частоти .....	33
2.5. Вибір апаратури керування та захисту .....	34
2.6. Обґрунтування та вибір магістральних кабельних ліній і силових провідників .....	40
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ .....	43
3.1. Розрахунок природних електромеханічних та механічних характеристик регульованого електроприводу швидкісного ліфта .....	43
3.2. Розрахунок робочих та регульовальних характеристик електроприводу .....	49
3.3. Дослідження системи автоматичного керування регульованого електропривода швидкісного ліфта .....	53
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....	59
4.1 Аналіз заходів безпеки при експлуатації ліфта .....	59
4.1 Заходи електробезпеки при роботі з електрообладнанням .....	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	65

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку міської інфраструктури характеризується стрімким збільшенням поверховості житлових та адміністративних споруд, що висуває підвищені вимоги до ефективності, надійності та безпеки засобів вертикального транспорту. Пасажирські ліфтові установки висотних будівель функціонують в умовах інтенсивних та нерівномірних пасажиропотоків, що обумовлює специфічний повторно-короткочасний режим роботи силового обладнання з високою частотою комутацій. Традиційні системи приводу на базі двошвидкісних асинхронних двигунів із прямим пуском від мережі характеризуються значними пусковими струмами, ударними електромагнітними моментами та низькою енергоефективністю через потребу використання масивних інерційних маховиків. Окрім цього, релейне перемикання обмоток не дозволяє повноцінно обмежити динамічний ривок, що негативно впливає на механічні вузли лебідки та знижує рівень фізіологічного комфорту пасажирів.

У зв'язку з цим виникає потреба в переході від громіздких механічних способів регулювання до інтелектуальних систем автоматизованого керування. Найбільш перспективним інженерним рішенням є впровадження частотно-регульованих асинхронних електроприводів із замкненими контурами векторного керування. Застосування сучасних напівпровідникових перетворювачів частоти в поєднанні з прецизійними цифровими датчиками зворотного зв'язку дозволяє формувати оптимальні S-подібні тахограми руху, мінімізувати теплові втрати та забезпечити безкомпромісну точність зупинки кабіни. Таким чином, дослідження, оптимізація та імітаційне моделювання таких електромеханічних комплексів є актуальним завданням для сучасної електротехніки.

**Мета дослідження.** Метою даного дипломного проекту є розробка, обґрунтування та дослідження високоефективної системи автоматичного керування частотно-регульованим асинхронним електроприводом

швидкісного пасажирського ліфта яка забезпечує мінімізацію енергоспоживання, точне відпрацювання та дотримання нормативних вимог комфорту пасажироперевезень.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено та вирішено такі завдання:

- виконати аналіз кінематичної схеми ліфта з канатоведучим шківом та обчислити статичні й динамічні зусилля в тяговому органі для повторно-короткочасного режиму S5;

- здійснити розрахунок максимальної споживаної потужності та провести вибір приводного асинхронного двигуна, силового кабелю та супутньої комутаційно-захисної апаратури;

- синтезувати структуру безперервної САК із векторним керуванням у двох зонах регулювання швидкості з урахуванням періодів дискретизації датчиків;

- розробити імітаційну модель електромеханічної системи в програмному пакеті Matlab Simulink та виконати перевірку її працездатності в режимах підйому й опускання кабіни.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1. Аналіз сфери застосування швидкісних ліфтів

Ліфти є підйомними установками періодичної дії, призначеними для вертикального транспортування пасажирів та вантажу в кабінах, які переміщуються вздовж жорстко закріплених напрямних. Під ліфтом розуміють стаціонарну підйомну машину, що забезпечує підйом і спуск людей чи вантажних грузів в кабіні, яка рухається по прямолінійних напрямних, нахил яких до вертикалі не перевищує  $15^\circ$ .

Ліфти та підйомники є важливою складовою інженерного оснащення сучасних багатоповерхових будівель та споруд. Широке використання ліфтів зумовлене активним розвитком міської інфраструктури, збільшенням поверховості житлових будинків, торговельних центрів, офісних комплексів та інших об'єктів.

Пасажирські й вантажні ліфти забезпечують комфортне та швидке переміщення людей і вантажів між поверхами будівель. Зростання кількості автомобільного транспорту сприяло появі багаторівневих паркінгів, у яких застосовуються спеціальні автомобільні ліфти. Розвиток сфери торгівлі та збільшення масштабів гіпермаркетів і торгових центрів також викликали потребу у використанні різноманітних підйомників і ліфтів різних типів та призначення.

Крім будівельної галузі, ліфти та підйомні механізми використовують у транспортній сфері, зокрема в мореплавстві та авіації, де вони застосовуються у вантажних транспортних а також пасажирських літаках. В будівництві вантажні ліфти використовують для подачі матеріалів і обладнання на верхні поверхи поряд із баштовими кранами.

Транспортування людей різного віку, а також осіб з обмеженими фізичними можливостями, висуває підвищені вимоги до безпеки, надійності та доступності ліфтів і підйомників. Залежно від призначення ліфти поділяють на такі основні види:

Пасажи́рські лі́фти – призначені для вертикального переміщення людей у житлових, адміністративних, громадських та інших будівлях. Основними вимогами до таких ліфтів є комфортність, плавність руху та безпечність експлуатації.

Вантажопасажи́рські лі́фти – використовуються як для перевезення людей, так і для транспортування вантажів. Для них важливими характеристиками є підвищена вантажопідйомність і точність зупинки кабіни. Порівняно з пасажирськими ліфтами вони мають нижчі вимоги до швидкості та плавності руху.

Ліка́рняні лі́фти – застосовуються у лікарнях, поліклініках, шпиталях та інших медичних закладах. Вони повинні забезпечувати особливо плавний рух для комфортного транспортування пацієнтів, медичного персоналу та спеціального обладнання.

Малі вантажні підйомники – призначені для переміщення невеликих вантажів. Такі підйомники широко використовуються у закладах громадського харчування, готелях, на складах, а також у транспортній галузі, наприклад для подачі їжі та напоїв у літаках.

Вантажні лі́фти – служать для підйому та переміщення великогабаритних і важких вантажів на промислових підприємствах, складах, у торговельних центрах та будівельній сфері.

Спеціальні (нестандартні) лі́фти – розробляються для роботи в особливих умовах або для виконання специфічних завдань. Їх конструкція та технічні характеристики визначаються індивідуальними технічними вимогами.

За типом приводу підйомного механізму лі́фти та підйомники поділяють на:

а) Лі́фти з електричним приводом – у таких системах рух кабіни забезпечується електродвигуном змінного або постійного струму.

Електропривод є найбільш поширеним завдяки високій надійності, ефективності та можливості плавного регулювання швидкості.

б) Гідравлічні ліфти – працюють за допомогою гідравлічного приводу, де переміщення кабіни здійснюється гідропідйомним циліндром або лебідкою обертального типу з гідродвигуном. Такі ліфти переважно використовуються у будівлях невеликої поверховості.

За конструкцією механізму передачі руху кабіні розрізняють:

а) Канатні ліфти – переміщення кабіни відбувається за допомогою тягових канатів, з'єднаних із лебідкою. Цей тип є найбільш поширеним у сучасних пасажирських та вантажних ліфтах.

б) Ланцюгові, рейкові та гвинтові ліфти – рух кабіни здійснюється відповідно за допомогою тягових ланцюгів, механізму «гвинт–гайка» або передачі типу «приводна шестерня – зубчаста рейка».

За швидкістю переміщення кабіни ліфти поділяються на:

а) Тихохідні ліфти – зі швидкістю руху до 1 м/с;

б) Швидкохідні ліфти – зі швидкістю від 1,4 до 2 м/с;

в) Швидкісні ліфти – зі швидкістю руху 2 м/с і більше.

## **1.2. Експлуатаційні вимоги до електроприводів швидкісних ліфтів**

Окрім базових енергетичних та кінематичних показників, до систем автоматизованого електроприводу швидкісних пасажирських ліфтів висувається низка специфічних вимог, спрямованих на забезпечення безпеки, комфорту та надійності експлуатації:

- висока точність позиціонування кабіни відносно рівня посадкового майданчика;
- формування оптимальних тахограм руху, що передбачає плавне протікання перехідних процесів (розгону, усталеного руху та гальмування) із суворим обмеженням значень прискорення та ривка;

- відповідність жорстким критеріям комфортабельності пасажироперевезень, що включає мінімізацію вібраційного та механічного впливу на пасажирів;
- високий рівень ергономічності людино-машинного інтерфейсу системи керування, що гарантує загальнодоступність користування ліфтом;
- мінімізація рівня віброакустичного забруднення від роботи тягових електродвигунів, механічних передач та комутаційної апаратури;
- дотримання стандартів електромагнітної сумісності (ЕМС), що гарантує допустимий рівень електромагнітної емісії та запобігає виникненню завад, здатних вплинути на роботу телекомунікаційних мереж, систем радіозв'язку, телебачення та суміжного мікропроцесорного обладнання.

У процесі переміщення шахтою система автоматичного керування електроприводом повинна забезпечувати безпомилкове відпрацювання заданої траєкторії руху з подальшою зупинкою кабіни строго у визначеній координаті. Згідно з експлуатаційними нормативами, статична похибка позиціонування - тобто різниця між відміткою поверхового майданчика та рівнем підлоги кабіни ліфта - не повинна перевищувати  $\pm 50$  мм. Дотримання цього допуску є критично важливим критерієм точної зупинки пасажирського ліфта, що усуває дискомфорт для пасажирів під час входу/виходу та гарантує безпечне проведення вантажно-розвантажувальних робіт.

Критерій загальнодоступності передбачає, що алгоритми функціонування ліфтової установки мають бути максимально адаптованими для широкого кола користувачів. Система керування повинна бути інтуїтивно зрозумілою та працювати в повністю автоматизованому режимі відпрацювання викликів, не вимагаючи від пасажирів жодних спеціальних навичок керування складними електромеханічними комплексами.

### 1.3. Аналіз кінематичної схеми системи ліфта

Ліфтові підйомні установки є вертикальними комплексами переривчастої дії, які призначені для транспортування пасажирів і вантажів у кабіні (рис. 1.1). Переміщення кабіни 2 здійснюється вздовж жорстко зафіксованих вертикальних напрямних 1, які встановлюються у шахті ліфта і запобігають поперечним коливанням та зміщенням конструкції.

Тягова лебідка 3, що містить канатоведучий шків (КВШ) 4, розміщується над шахтою у спеціалізованому машинному приміщенні. Для суттєвого зниження статичного навантаження на приводний електродвигун та оптимізації енергетичних показників системи у кінематичну схему введено противагу 5. Кабіна і противага кінематично пов'язані між собою за допомогою системи сталевих тягових канатів. Підвішування компонентів здійснюється на кількох паралельних канатах із використанням балансувальних пристроїв, що забезпечує рівномірний розподіл механічного зусилля між ними.

За принципом передачі тягового зусилля ліфтові лебідки поділяються на барабанні та лебідки з канатоведучими шківками. У сучасних швидкісних ліфтових установках перевага віддається системам із КВШ завдяки їхнім суттєвим перевагам:

- менші масогабаритні показники порівняно з барабанними аналогами;
- підвищена надійність та безпека експлуатації, оскільки тягове зусилля створюється за рахунок сил тертя між канатом і струмками шківа;
- виключення ризику надмірного натягу або обриву канатів при заклинюванні кабіни, оскільки в такому випадку відбувається контрольоване проковзування канатів у струмках шківа.

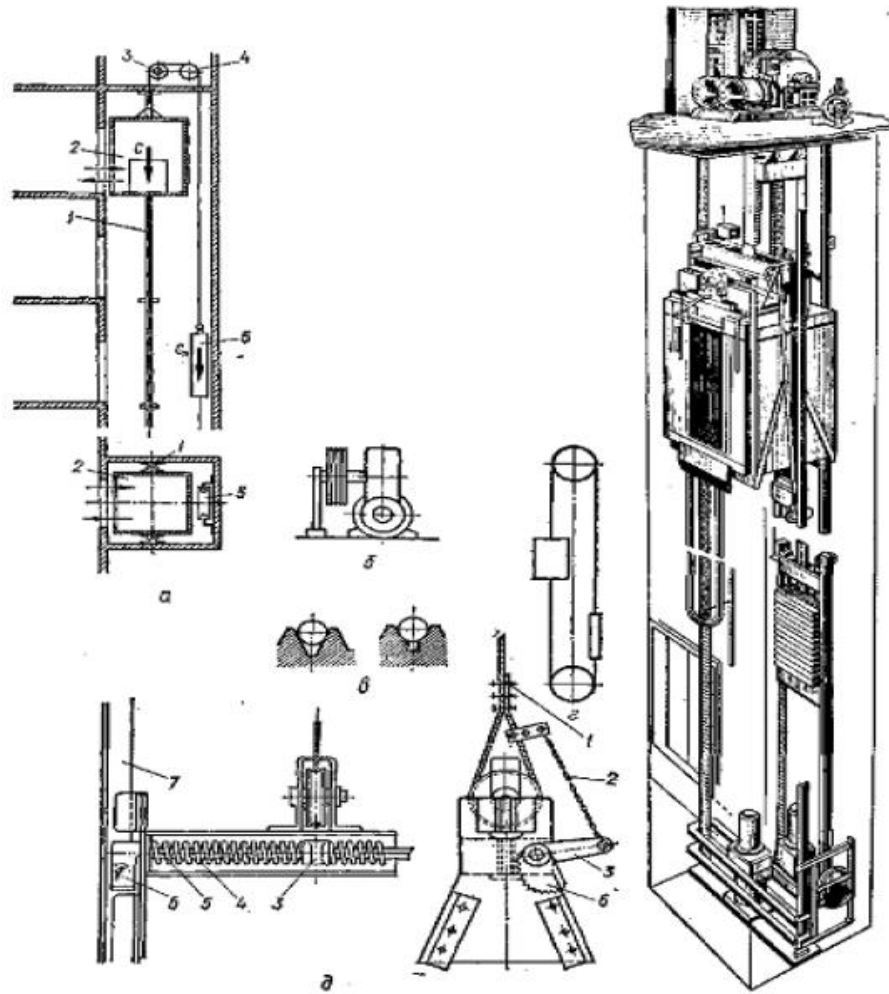


Рисунок 1.1 — Ліфт пасажирський

Пасажирські ліфти масового сегмента зазвичай мають номінальну вантажопідйомність від 0,25 до 1,25 т і забезпечують лінійну швидкість руху кабіни до  $v = 4$  м/с. За конструкцією механічної частини приводи поділяють на редукторні та безредукторні.

Безредукторні електроприводи характеризуються високим ККД, меншим рівнем шуму та компактністю, через що вони є домінуючим рішенням під час проектування швидкісних і високошвидкісних пасажирських ліфтів  $v > 2$  м/с). У редукторних приводах історично застосовували черв'ячні передачі (рис. 1.1, б), проте в сучасних розробках усе частіше впроваджують високоефективні хвильові або планетарні редуктори, які мають вищу навантажувальну здатність та плавність ходу.

Надійність зчеплення канатів із КВШ визначається геометрією профілю його канавок (струмків). Найбільшу стабільність коефіцієнта зчеплення демонструє струмок із прямолінійним підрізом (рис. 1.1, в), оскільки його фрикційні властивості найменше залежать від природного механічного зношування робочих поверхонь.

Під час проектування електромеханічних комплексів для висотних споруд виникає проблема значної маси підвішених тягових канатів, вага яких динамічно перерозподіляється в процесі руху кабіни. Для компенсації цього дисбалансу застосовують врівноважуючі (компенсуючі) канати або ланцюги, які з'єднують нижні частини кабіни та противаги через напрямний блок на дні шахти (рис. 1.1, г). Для гарантування безпеки пасажирів усі ліфтові установки обов'язково оснащуються механічними аварійними гальмами — уловлювачами. Вони призначені для автоматичної фіксації кабіни на напрямних у разі обриву, надмірного розтягу тягових канатів або перевищення номінальної швидкості руху вниз. За характером дії уловлювачі поділяються на клинові, роликові та ексцентрикові (рис. 1.1, д).

Принцип функціонування ексцентрикового уловлювача полягає в наступному: при аварійному послабленні або обриві каната 1 гнучка тяга 2, що механічно з'єднана з важільною системою 3, звільняється. Під дією зусилля попередньо стиснутої пружини 4 відбувається повертання валика 5. Це змушує ексцентрикові колодки 6 повернутися та затиснути вертикальні напрямні 7, надійно блокуючи кабіну ліфта за рахунок сил тертя спокою.

Кінематична схема проектованої ліфтової установки приведена на рисунку 1.2. Вона включає кабіну 1 та противагу 2, підвішені в шахті на системі багатоканатного підвісу 3. Кількість канатів вибирається з розрахунку багатократного запасу міцності, що дозволяє кожному окремому канату витримати повну вагу системи. Для оптимізації просторового розташування обладнання в кінематичну схему введено відповідний блок 4. Тягове зусилля створюється лебідкою з КВШ 5, яка приводиться в дію електродвигуном 6. Розміщення приводного комплексу передбачене у верхній частині будівлі

(машинному приміщенні). В усталених станах зупинки, а також при аварійному знеструмленні фіксація вала здійснюється електромагнітним колодковим чи дисковим гальмом. Загальна координація та керування режимами роботи електроприводу реалізується за допомогою мікропроцесорної станції (блока) керування 7.

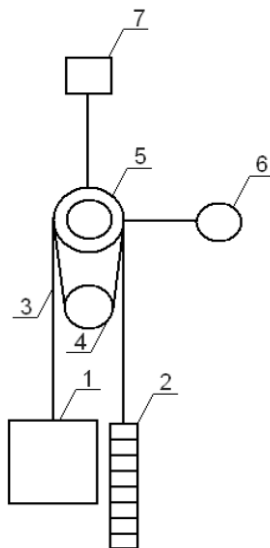


Рисунок. 1.2. — Кінематична схема ліфта

#### **1.4. Використання керованих асинхронних електроприводів та систем автоматизації в ліфтових установках**

Сучасний автоматизований електропривід (АП) є головною енергосиловою підсистемою будь-якого промислового та комунального обладнання. Саме за його допомогою здійснюється електромеханічне перетворення енергії та її дозована передача до виконавчого (робочого) органу механізму. Енергоємність технологічного процесу безпосередньо залежить від кінематичних особливостей механізму, методів керування потоком електроенергії, а також від необхідних тахограм роботи (циклічності, наявності ділянок прискорення, усталеного руху та гальмування).

Оптимізація сучасних технологічних процесів вимагає точного керування координатами системи. Енергоефективне протікання процесу можливе лише за умови, коли система керування здатна безпосередньо впливати на продуктивність та якісні показники перехідних режимів.

Традиційно потужність приводного електродвигуна розраховується на забезпечення максимальної продуктивності. За необхідності регулювання швидкості переміщення або інших технологічних параметрів застосовують два принципово різні підходи:

Механічне керування (при нерегульованому електроприводі): зміна параметрів здійснюється шляхом введення додаткового механічного опору (використання гальмівних пристроїв, редукторів, дроселювання, засувки).

Електричне керування (при регульованому електроприводі): керування здійснюється за рахунок зміни електромагнітних параметрів самого двигуна за допомогою силових перетворювачів, що дозволяє формувати оптимальні статичні характеристики та раціонально керувати пуско-гальмівними процесами.

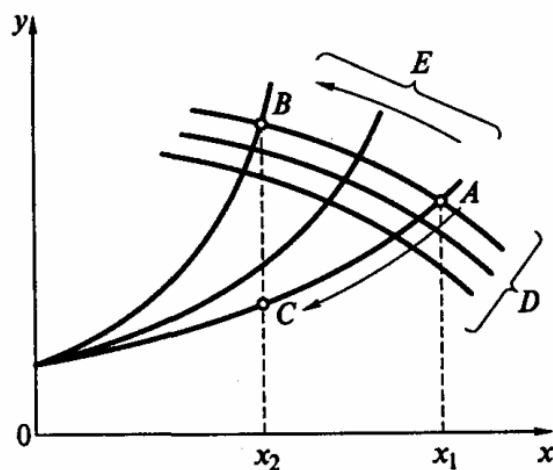


Рисунок 1.3 — Взаємодія приводу та привідної системи

Взаємодію приводної машини (приводу) та привідної системи можна зобразити за допомогою характеристик, наведених на рисунку 1.3, на якому літерою  $D$  позначено сімейство характеристик електроприводу при різних швидкостях обертання, а також характеристики навантаження приводної системи. По осі  $x$  наносяться кінетична енергія, швидкість, витрата. Інтервал характеризує продуктивність, яку можна забезпечити. По осі  $y$  відкладають значення потенційної енергії, протидіючого моменту, висоту напору тощо,

тобто зазвичай це значення протидіючого навантаження, яке приводу необхідно подолати. Точки перетину приводної характеристики (з сімейства характеристик D) та характеристики навантаження (з сімейства характеристик E) — це робочі точки. Продуктивність приводу можна змінювати або шляхом регулювання навантаження, тобто за рахунок механічної частини, коли при зменшенні продуктивності з  $x_1$  до  $x_2$  приводна система переходить з точки А в точку В, що призводить до зростання протидіючого моменту  $i$ , отже, до збільшення споживаної потужності та енергії, або шляхом регулювання швидкості електроприводу, тобто застосуванням регульованого електроприводу, коли при зменшенні навантаження з  $x_1$  до  $x_2$  система переходить з точки А у точку С, що знижує протидіючий момент  $i$ , отже, зменшує споживану потужність та енергію

Використання регульованого електроприводу разом із системами технологічної автоматики забезпечує більш гнучке, плавне та енергоефективне керування виробничими процесами. Сьогодні спостерігається тенденція переходу від механічного керування до автоматизованих систем електроприводу, що дозволяє підвищити якість процесів і суттєво знизити енергоспоживання та витрати ресурсів.

Механізми переміщення переважної більшості пасажирських ліфтів, номінальна швидкість яких становить 0,7...1 м/с, оснащуються двошвидкісними короткозамкненими асинхронними двигунами. На початку переміщення (підйому або опускання) високошвидкісна обмотка асинхронного двигуна підключається контакторами до номінальної напруги мережі 380 В, що призводить до виникнення значних знакозмінних ударних моментів через електромагнітні перехідні процеси в асинхронній машині. Щоб певною мірою забезпечити вимоги щодо обмеження прискорень у період розгону, збільшують у 8–10 разів момент інерції електроприводу порівняно з власним моментом інерції двигуна, приєднуючи для цього до лебідки високоінерційний шків, тобто технологічно завдання вирішується за рахунок механічної частини електроприводу. Втрати енергії в перехідних процесах

(при прямому пуску та гальмуванні) лінійно залежать від сумарного моменту інерції  $i$ , отже, зростають при його збільшенні.

Завдання обмеження похідної прискорення, або «ривка», на початковому етапі перехідного процесу не вирішується. Під час наближення до місця зупинки асинхронний двигун при незатухаючому полі перемикається на низькошвидкісну обмотку, щоб забезпечити режим зниженої швидкості. Таке перемикання супроводжується значними ударними перехідними моментами двигуна, що негативно впливає на механічну частину електроприводу ліфта, знижуючи її надійність і термін служби. Таким чином, існуюча система керування ліфтом не задовольняє сучасним технологічним вимогам, а робота його електроприводу пов'язана з підвищеним споживанням електроенергії

При використанні для пасажирських ліфтів системи «напівпровідниковий перетворювач частоти — одношвидкісний асинхронний короткозамкнений двигун» необхідні технологічні вимоги забезпечуються системою керування електроприводом. У цьому випадку відбувається плавний пуск електроприводу з обмеженням прискорень і ривків, ліквідуються ударні моменти двигуна, виключається використання додаткового інерційного шківів, знижується момент інерції електроприводу, оскільки його значення в одношвидкісного двигуна істотно менше, ніж у двошвидкісного.

Крім того, при використанні частотно-регульованого електроприводу вдається різко знизити енергоспоживання за рахунок використання так званого частотного пуску та зменшення сумарного моменту інерції системи.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1. Вихідні дані та експлуатаційні характеристики для розрахунку електромеханічної системи ліфта

Вибір елементів силової частини та розробка системи автоматичного керування електроприводом ліфта базується на специфічних умовах його експлуатації. Основними факторами, що визначають вимоги до розрахунку електрообладнання, є циклічність роботи механізму, жорсткі обмеження динамічних навантажень та параметри мережі живлення.

Тяговий електродвигун ліфта функціонує в повторно-короткочасному режимі з електричним гальмуванням, що класифікується за стандартами як режим S5. Відносна тривалість включення для пасажирських ліфтів даного типу становить 40–50%. Специфіка цього режиму полягає у високій інтенсивності перехідних процесів: номінальна частота включень становить від 100 до 240 пусків на годину.

Під час розрахунків кінематики слід обов'язково враховувати особливості роботи приводу на коротких дистанціях (наприклад, при поверховому роз'їзді на сусідній рівень). У таких випадках тахограма руху набуває трикутної або дзвоноподібної форми, оскільки етап руху з постійною (усталеною) швидкістю відсутній — електропривід одразу переходить від стадії розгону до стадії цільового гальмування.

Для забезпечення нормативного рівня комфорту перевезень, а також для мінімізації динамічних зусиль, що діють на тягові канати та механічні вузли лебідки, максимальне лінійне прискорення та уповільнення кабіни в нормальних експлуатаційних режимах жорстко обмежується на рівні  $2 \text{ м/с}^2$ . Гарантоване дотримання цієї вимоги безпосередньо залежить від обраної структури електроприводу. Вирішення цього завдання потребує впровадження замкненої системи керування, здатної формувати оптимальні S-подібні криві інтенсивності з обмеженням як прискорення, так і його похідної (ривка).

Електропостачання обладнання машинного приміщення ліфта здійснюється від промислової трифазної мережі змінного струму. Максимально допустима лінійна напруга силової розподільчої мережі обмежена значенням 660 В (найчастіше використовуються мережі 380 В або 400 В). Це обмеження унеможливує використання високовольтних електричних машин і зумовлює вибір стандартних низьковольтних асинхронних електродвигунів у комплексі з відповідними низьковольтними напівпровідниковими перетворювачами частоти.

Базові технічні та кінематичні характеристики проектного швидкісного ліфта, що є вихідними даними для подальшого розрахунку електрообладнання, наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Характеристики швидкісного ліфта

Параметри	Величини
Вантажопідйомність	0,8 т
Маса кабіни ліфта	0,5 т
Висота поверху	2,5 м
Кількість поверхів	30
Допустиме прискорення кабіни	2 м/с <sup>2</sup>
Максимально допустимий ривок кабіни	0,4 м/с <sup>3</sup>
Максимальна швидкість руху кабіни, що встановилася	2,5 м/с

Алгоритм функціонування механічного гальма ліфтової установки базується на принципах забезпечення безумовної безпеки та синхронізації координат електромеханічної системи. Подача напруги живлення на обмотки приводного електродвигуна та на котушку електромагніту розгальмування повинна здійснюватися узгоджено та одночасно. У режимі роботи активація

статорних обмоток двигуна супроводжується подачею напруги на гальмівний електромагніт, який, долаючи зусилля пружин, утримує гальмівні колодки у розімкнутому стані, забезпечуючи вільне обертання вала лебідки.

У разі штатної зупинки електроприводу, а також при аварійному зникненні напруги живлення в силовій мережі або спрацьовуванні кіл захисту, система керування повинна забезпечити миттєве знеструмлення як електродвигуна, так і котушки гальмівного електромагніту. При цьому механічна гальмівна система під дією енергії попередньо стиснутих робочих пружин повинна з мінімальним (квазімиттєвим) часом затримки забезпечити надійне замикання колодок. Фіксація гальмівного барабана (або півмуфти) призводить до жорсткого блокування обертання канатоведучого шків лебідки, що повністю виключає ризик самовільного або неконтрольованого переміщення кабіни ліфта в шахті під дією гравітаційних сил чи дисбалансу мас кінематичної схеми.

## **2.2. Розрахунок потужності електроприводу швидкісного ліфта**

Проектування сучасних вертикальних транспортних систем вимагає пошуку оптимального балансу: забезпечення максимальної пропускної здатності підйомника при одночасній мінімізації споживання електроенергії та капітальних витрат на обладнання. Вирішення цього завдання безпосередньо залежить від конфігурації силового електроприводу. На сучасному етапі розвитку підйомної техніки домінують три базові архітектури електроприводів:

- комплекси на базі частотних перетворювачів у поєднанні з асинхронними машинами з короткозамкненим ротором;
- приводи постійного струму, що живляться від керованих тиристорних випрямлячів;
- системи, що використовують реостатний метод регулювання швидкості.

У межах даної роботи найбільш раціональним вибрано впровадження системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД), розрахованої на стандартну мережеву напругу 0,4 кВ. Таке технічне рішення аргументується низкою вагомих експлуатаційних переваг:

1. Економічна доцільність: високий рівень уніфікації таких систем на ринку суттєво знижує початкові фінансові інвестиції.

2. Мінімізація втрат: відсутність щітково-колекторного вузла значно зменшує кількість тертьових компонентів, що призводить до падіння механічних втрат у системі.

3. Висока надійність: асинхронні машини відзначаються підвищеною зносостійкістю та невибагливістю в обслуговуванні.

Крім того, інтеграція мікропроцесорних систем керування силовою електронікою кардинально покращує динамічні характеристики електроприводу. Зокрема, це дає змогу генерувати підвищений пусковий момент, ефективно обмежувати пускові струми в мережі живлення та забезпечувати глибоке і плавне регулювання швидкості руху кабіни.

Експлуатація пасажирських ліфтів у сучасних багатоповерхових будівлях супроводжується жорсткими вимогами до кінематичних параметрів. Ключовою проблемою є яскраво виражена нерівномірність пасажиропотоку протягом доби.

Розробка вертикального транспорту вимагає диференційованого підходу, який базується на статистичному аналізі завантаження будівлі. Для адміністративних комплексів та висотних споруд необхідним є застосування підйомників із розширеними швидкісними характеристиками та збільшеною вантажопідйомністю. Саме такі параметри здатні нівелювати пікові навантаження та гарантувати високу пропускну здатність системи в години «пік». Для архітектурних об'єктів заввишки 50 метрів розрахункову кількість зупинок кабіни (за умови рівномірного розподілу пасажирів по поверхах) доцільно визначати за допомогою спеціалізованих номограм (рисунок 2.1).

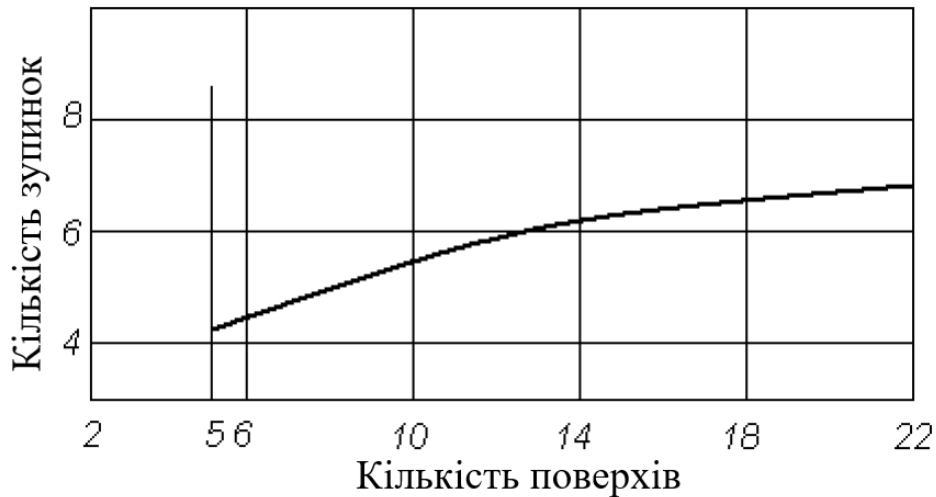


Рисунок 2.1 — Номограма для визначення ймовірної кількості зупинок ліфта.

Практична частина даного проекту фокусується на розробці швидкісного ліфтового комплексу, призначеного для обслуговування 30-поверхової будівлі. Електрообладнання розраховане на експлуатацію в повторно-короткочасному режимі з електричним гальмуванням (режим S5) за умов стовідсоткового завантаження кабіни. Проектна місткість становить 9 пасажирів, що еквівалентно номінальній вантажопідйомності у 800 кг.

Для забезпечення енергоефективності механічної системи розраховується маса противаги. Її величина визначається з умови статичного зрівноваження сили тяжіння порожньої кабіни та регламентованої частки корисного навантаження. Математична модель для розрахунку має такий вигляд:

$$G = G_0 + aG_1 + 0.5G_2 \quad (2.1)$$

де,  $G_0$  – сила тяжіння порожньої ліфтової кабіни;

$a$  - розрахунковий коефіцієнт врівноваження (відповідно до стандартів приймається на рівні  $a = 0,4$ );;

$G_1$  - сила тяжіння маси пасажирів;

$G_2$  - сила тяжіння компенсуючих (врівноважуючих) канатів.

У малоповерхових спорудах вага тягових канатів є невеликою і суттєво не впливає на статику приводу. Проте при висоті підйому понад 50 м їхня маса досягає кількох сотень кілограмів, спричиняючи значний дисбаланс під час руху кабіни. Для компенсації цього ефекту застосовують врівноважуючі канати, які з'єднують кабіну та противагу знизу. Лінійну масу цих канатів приймають рівною масі несучих.

$$G_0 = m_0 g = 500 \cdot 9.8 \approx 5000 \text{ Н};$$

$$G_1 = m_1 g = 800 \cdot 9.8 \approx 8000 \text{ Н};$$

$$G_2 = m_2 g = 200 \cdot 9.8 \approx 2000 \text{ Н};$$

$$G = 5000 + 0.4 \cdot 8000 + 0.5 \cdot 2000 = 9200 \text{ Н}.$$

Статична потужність електродвигуна при підйомі номінального вантажу визначається за формулою:

$$P_c = \frac{(G_0 + G_1 - G)v}{\eta} \quad (2.2)$$

де,  $v$  - номінальна швидкість підйом,  $v = 2,5$  м/с;

$\eta$  - ККД підйомного механізму,  $\eta = 0,85$ ;

$$P_c = \frac{(5000 + 8000 - 9200) \cdot 2.5}{0.85} = 11.18 \text{ кВт}$$

Час усталеного переміщення кабіни на розрахункову висоту  $l$  (м) зі швидкістю  $v$ :

$$t = \frac{l}{v} = \frac{75}{2.5} = 30 \text{ с} \quad (2.3)$$

Відносна тривалість увімкнення  $T_{on}$  електроприводу визначається зі співвідношення:

$$T_{on} = \frac{2 \cdot t}{2 \cdot t + 9 \cdot t_{01} + 9 \cdot t_{02} + 9 \cdot t_{03}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

де,  $t_{01} = 1$  с — час технологічної затримки на завантаження пасажирів;;

$t_{02} = 3,0$  с — сумарний час роботи приводу дверей та комутаційної апаратури;;

$t_{03} = 2,8$  с — тривалість етапів прискорення і уповільнення кабіни ліфта;

$$T_{on} = \frac{2 \cdot 30}{2 \cdot 30 + 9 \cdot 1 + 9 \cdot 3 + 9 \cdot 2.8} \cdot 100\% = 49\%$$

Розрахункове значення становить  $T_{on} = 49\%$ , що повністю відповідає нормативному діапазону.

Залежність ККД механічної частини від рівня завантаження при русі порожньої кабіни визначимо з графіка залежності ККД механізмів від навантаження при

$$\frac{G_0}{G_H + G_0} = \frac{5000}{8000 + 5000} = 0.38. \quad (2.5)$$

Для цього режиму ККД становить  $\eta = 0,75$ .

Оскільки в каталогах для режиму S5 параметри двигунів наводяться для дискретних значень, отриману потужність перераховують до найближчого стандартного значення  $T_{on} = 49\%$ :

$$P_{H1} \approx k \cdot P_c = 1.49 \cdot 11.18 = 16.76 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

Так як при  $T_{on} = 49\%$  номінальна потужність електродвигуна не вказується, то проведем перерахунок потужність  $P_{H1}$  на найближче значення  $T_{on} = 50\%$ :

$$P_H = P_{H1} \sqrt{\frac{T_{on}}{T_{nom}}} = 16.76 \sqrt{\frac{50}{100}} = 11.73 \text{ кВт} \quad (2.7)$$

Необхідна кутова швидкість обертання вала двигуна визначається за лінійною швидкістю кабіни::

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} \cdot i \quad (2.8)$$

де  $D = 0,45 \text{ м}$ — діаметр канатоведучого шківа;

$$n = \frac{60 \cdot 2.5}{3.14 \cdot 0.45} \cdot 9 = 955 \text{ об/хв.}$$

### 2.3. Обґрунтування та вибір приводного електродвигуна

На підставі проведеного попереднього розрахунку потужності, для інтеграції в проектувану систему частотно-регульованого електроприводу за каталогом вибрано трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором серії AIP160S6. Дана серія електричних машин характеризується високою перевантажувальною здатністю та оптимізованими пусковими параметрами, що є важливим для повторно-короткочасного режиму роботи S5 з високою частотою комутацій. Базові номінальні електромагнітні та кінематичні параметри вибраного електродвигуна AIP160S6 зведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Технічні характеристики асинхронного двигуна AIP160S6

Параметр	Значення
Номінальна потужність	11 кВт
Номінальна напруга	380 В
Ковзання	3 %
Кратність пускового моменту	1,8
Кратність максимального моменту	2,7
Момент інерції	0,043 кг·м
Номінальна швидкість обертання,	970 об/хв
Номінальний струм	23,5 А
Пусковий струм	164,5 А
Коефіцієнт корисної дії	0,85
$\cos \varphi$	0.9

Трифазні малошумні асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії AIP160S6 спеціально розроблені для інтеграції в

електромеханічні комплекси лебідок пасажирських, вантажних і вантажопасажирських ліфтів висотних адміністративних та житлових споруд.

Паспортний діапазон номінальних режимів роботи машини охоплює класи S1–S8, проте в межах цього проекту двигун експлуатується в повторно-короткочасному режимі S5, який характеризується високою частотою комутацій, наявністю динамічного гальмування та сумісною роботою з електромагнітним гальмом.

Конструктивне виконання двигуна відповідає класу захисту IP54 (забезпечує надійний захист від пилу та бризок води), а система ізоляції обмоток за термостійкістю належить до класу F. Параметри електроживлення відповідають стандартній промисловій трифазній мережі змінного струму 380 В / 50 Гц.

Особливістю даної модифікації є жорстке регламентування віброакустичних показників: середньоквадратичне значення віброшвидкості не перевищує 2,8 м/с. Рівень акустичного шуму жорстко контролюється як в усталених станах, так і під час динамічних перехідних процесів (при частотному пуску, реверсі або зміні кутової швидкості).

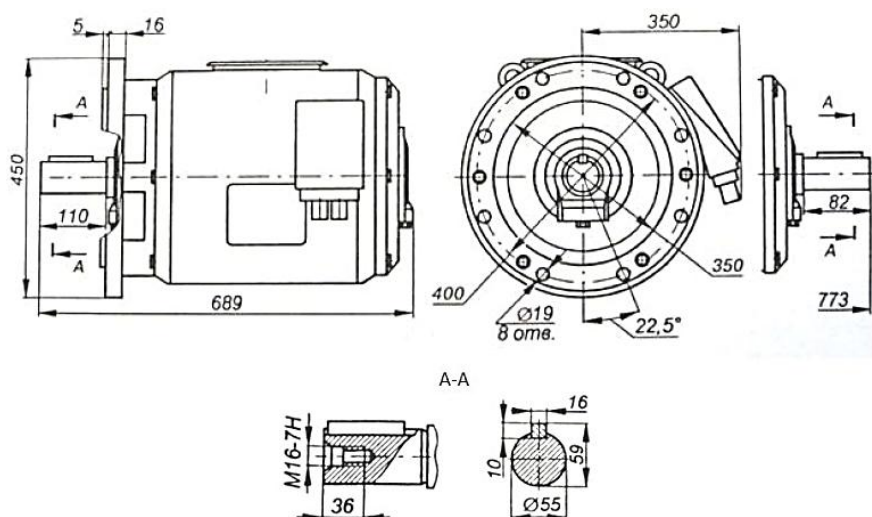


Рисунок 2.2 — Загальний вигляд, габаритні та приєднувальні розміри електродвигуна AIP160S6

Для забезпечення необхідних пускових і перевантажувальних характеристик у ліфтових режимах, монолітна короткозамкнена обмотка ротора відлита зі спеціального алюмінієвого сплаву з підвищеним питомим електричним опором. Просторове розташування та спосіб монтажу електродвигуна АІР160S6 на станині ліфтової лебідки приведені на рисунку 2.2.

Проведемо розрахунок номінального та критичного моменту двигуна згідно формул:

$$M_n = \frac{9550 \cdot P_H}{n_H} = \frac{9550 \cdot 11}{970} = 108 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.9)$$

$$M_k = 2.7 \cdot M_n = 2.7 \cdot 105 = 291.6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.10)$$

Тоді, швидкість холостого ходу становить:

$$n_0 = \frac{n_n}{1 - s_n} = \frac{970}{1 - 0.03} = 1000 \text{ об/хв} \quad (2.11)$$

Сумарний момент інерції електромеханічної системи, приведений до вала електродвигуна, розраховується як:

$$J_{np} = J_\delta + 1.1 \cdot J_M \left( \frac{\omega_M}{\omega_C} \right)^2; \quad (2.12)$$

де,  $J_\delta$  - момент інерції вибраного двигуна,  $J_\delta = 0,043 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$J_M$  - момент інерції механізму ліфтової установки,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Визначимо  $\omega_M$  за формулою:

$$\omega_M = \frac{v}{R_{шк}} = \frac{2.5}{0.225} = 11.1 \text{ рад/с} \quad (2.13)$$

Де  $R_{шк}$  - радіус канатного шківa, м

$v$  - лінійна швидкість руху кабіни ліфта, м/с

Оскільки маса відгалужень тягових канатів повністю врівноважена компенсуючими канатами, у режимі рівномірного руху статичний момент залишається незмінним. З огляду на поступальний характер переміщення

кабіни та противаги, приведений момент інерції механічної частини описується виразом:

$$J_M = m_{\Sigma} \left( \frac{v}{\omega_M} \right)^2; \quad (2.14)$$

де,  $m_{\Sigma}$  - сумарна маса елементів установки, що рухаються поступально, кг.

Загальна маса рухомих частин визначається з виразу:

$$m_{\Sigma} = \frac{G_0 + G_1 + G_{np}}{g}; \quad (2.15)$$

де  $G_{np}$  - сила тяжіння противаг,  $G_{np} = 9200$  Н;

$$m_{\Sigma} = \frac{5000 + 9200 + 8000}{9.81} = 2265$$

$$J_M = 2265 \left( \frac{2.5}{11.1} \right)^2 = 114 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Тоді повний приведений момент інерції системи для повністю завантаженого ліфта дорівнює:

$$J_{np} = 0.043 + 1.1 \cdot 114 \cdot \left( \frac{11.1}{104.7} \right)^2 = 1.46 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Для оцінки динамічних показників при пуску розраховується статичний момент навантаження при повному завантаженні кабіни:

$$M_c = \frac{P_H}{\omega_c} = \frac{11000}{104.7} = 105 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

Мінімальний крутний момент, що розвивається електроприводом на початковому етапі пуску, визначається за формулою::

$$M_{\min} = 1.8 \cdot M_n = 1.8 \cdot 108 = 194 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.17)$$

Середній пусковий момент електродвигуна впродовж усього перехідного процесу розгону становить:

$$M_{cp} = \frac{M_k - M_{\min}}{2} = \frac{291.6 + 194.4}{2} = 243 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.18)$$

Таким чином, пусковий момент електродвигуна залишається інваріантним до умов завантаження кабіни, оскільки його величина визначається параметрами частотної програми керування напівпровідникового перетворювача.

Тривалість розгону електромеханічної системи під час роботи ліфта з номінальним корисним навантаженням (час пуску) визначається за формулою:

$$t_n = \frac{J_{np} \cdot \omega}{M_{\max} + M_c} = \frac{1.46 \cdot 104.7}{291.6 + 105} = 0.82 \text{ с} \quad (2.19)$$

Оскільки тривалість динамічних пускових режимів є незначною порівняно з часом руху установки на усталеній швидкості, при інженерних розрахунках припустимо обмежитися їхнім наближеним аналітичним визначенням.

Аналогічно, з використанням наближених методів, обчислюється просторове переміщення кабіни в перехідних процесах. Тривалість механічного гальмування завантаженого та порожнього ліфта під дією електромагнітного гальмівного пристрою з регламентованим гальмівним моментом  $M_m = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}$  визначається як:

$$t_m = \frac{J_{np} \cdot \omega}{M_c + M_m} = \frac{1.46 \cdot 104.7}{105 + 100} = 0.75 \text{ с} \quad (2.20)$$

Шлях, який долає кабіна ліфта на етапі пуску, розраховується за виразом:

$$l_n = \frac{v_H}{2} t_n = \frac{\pi \cdot D \cdot n_H}{2 \cdot 60 \cdot i} t_n = \frac{3.01 \cdot 0.75 \cdot 970}{2 \cdot 60 \cdot 9} 0.82 = 1.27 \text{ м} \quad (2.21)$$

Лінійне переміщення кабіни ліфта в процесі механічного гальмування визначається за формулою:

$$l_m = \frac{v_H}{2} t_m = \frac{\pi \cdot D \cdot n_H}{2 \cdot 60 \cdot i} t_m = \frac{3.01 \cdot 0.75 \cdot 970}{2 \cdot 60 \cdot 9} 0.75 = 0.95 \text{ м} \quad (2.22)$$

Розрахунковий шлях, що проходить кабіна на усталеній швидкості за умов реалізації циклу із сімома проміжними зупинками, становить:

$$l_1 = l - 6 \cdot l_n - 6 \cdot l_m = 75 - 6 \cdot 1.27 - 6 \cdot 0.95 = 61.68 \text{ м} \quad (2.23)$$

Розрахункове ковзання ротора та кутова швидкість обертання вала електродвигуна при дії статичного моменту навантаження  $M_c = 105 \text{ Н}\cdot\text{м}$  визначаються з виразів:

$$s = s_H \frac{M_c}{M_n} = 0.03 \frac{105}{108} = 0.029 = 2.9\% \quad (2.24)$$

$$n = n(1 - s) = 1000(1 - 0.029) = 971 \text{ об/хв} \quad (2.25)$$

Сумарний час руху ліфтової установки з постійною лінійною швидкістю в межах циклу із сімома зупинками дорівнює:

$$t = \frac{l_1}{7v} = \frac{61.68}{7 \cdot 2.5} = 3.52 \text{ с} \quad (2.26)$$

З міркувань безпеки та забезпечення фізіологічного комфорту пасажирів, величини лінійного прискорення та динамічного ривка підлягають суворому обмеженню. Водночас для максимізації пропускної здатності вертикального транспорту та мінімізації часових втрат користувачів, ці параметри мають підтримуватися на верхній межі допустимого діапазону.

На рисунку 2.3 наведено криву розгону приводного електродвигуна ліфта. На основі виконаного комплексу електромеханічних розрахунків було синтезовано розрахункову тахограму руху та побудовано діаграму навантаження асинхронного двигуна AIP160S6 (рис. 2.4).

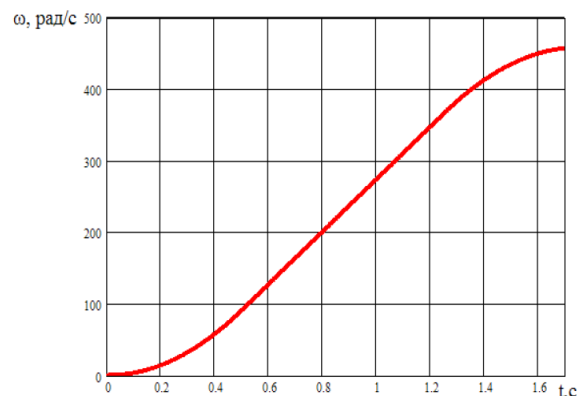


Рисунок 2.3 — Графік переходного процесу розгону електродвигуна за умов обмеження динамічного ривка та лінійного прискорення

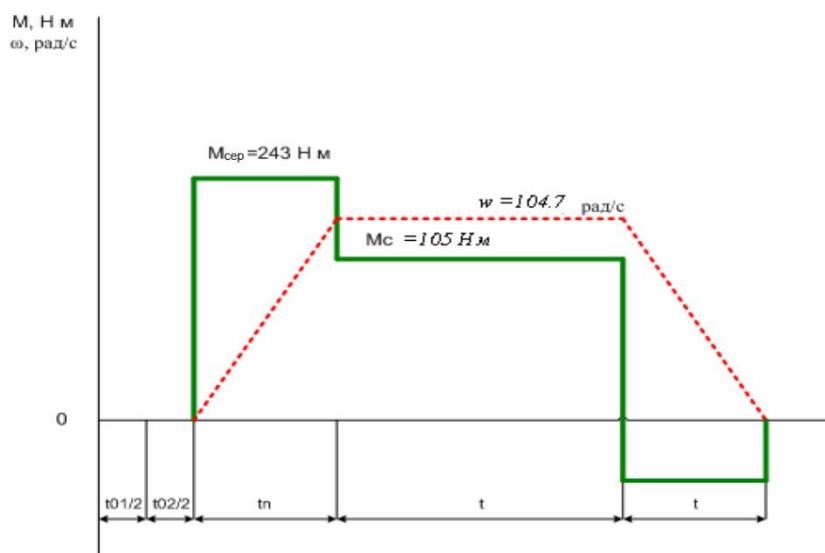


Рисунок 2.4 — Розрахункова тахограма руху електромеханічної системи та навантажувальна діаграма асинхронного двигуна AIP160S6.

При  $\beta = 0,5$  і  $T_{on} = 49\%$

$$M_{E1} = \sqrt{\frac{7(M_{cp}^2 \cdot t_n) + 7(M_c^2 \cdot t_n)}{7 \cdot \beta \cdot t_n + 7 \cdot t}} = \quad (2.27)$$

$$= \sqrt{\frac{7(243^2 \cdot 0.82) + 7(105^2 \cdot 0.82)}{7 \cdot 0.5 \cdot 0.82 + 7 \cdot 0.82}} = 103.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Після приведення (перерахунку) теплових втрат до тривалого режиму роботи з відносною тривалістю увімкнення  $T_{on} = 100\%$  отримано наступне еквівалентне значення:

$$M_E = M_{E1} \sqrt{\frac{T_E}{T_{on}}} = 103.3 \sqrt{\frac{49}{100}} = 72.3 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.28)$$

$$M_E < M_H$$

На основі виконаних аналітичних розрахунків попередньо вибраний асинхронний електродвигун проходить перевірку на відповідність критеріям теплового стану та умов нагрівання.

## 2.4. Розрахунок та вибір перетворювача частоти

З врахування потужності вибраного електродвигуна проводимо вибір перетворювача частоти (ПЧ). Попередньо вибрано ПЧ VLT серій фірми «Danfoss», загальний вигляд та основні параметри показано на рисунку 2.5.



Параметр	Значення
Вхідна напруга	380–480 В (трифазна)
Вихідний струм	24.0 А
Перевантажувальна здатність	160% протягом 60 секунд
Діапазон частот	0–132 Гц (VVC+) / 0–1000 Гц (U/f)
Цифрові входи	5 програмованих
Габарити (ВхШхГ)	505 x 200 x 244 мм

Рисунок 2.5 — Загальний вигляд та основні параметри перетворювача «Danfoss» VLT 2880

Даний ПЧ є надійним перетворювач частоти, який протягом багатьох років залишався одним із ключових рішень у лінійці серії VLT 2800. Цей пристрій спроектований для керування трифазними асинхронними двигунами потужністю 11 кВт у промислових мережах з напругою від 380 до 480 вольт. Його головна особливість полягає в універсальності: попри компактний корпус, він поєднує в собі функції точного регулювання швидкості, захисту обладнання та можливості інтеграції в автоматизовані системи керування.

Конструктивно пристрій виконано за стандартом захисту IP20, що передбачає його розміщення всередині захисних електричних шаф. Силова частина перетворювача спроектована з урахуванням високих пускових навантажень, що є характерними для промислових механізмів. Пристрій володіє високою перевантажувальною здатністю і здатний витримувати короточасні струмові перевантаження до 160% від номінального значення струму. Цей експлуатаційний резерв є критично важливим для забезпечення

стабільного пуску системи, швидкого реагування на збурення та подолання підвищеного моменту інерції під час роботи з важко навантаженими механізмами без переходу в режим аварійного відключення. Через наявність потужних конденсаторів у колі постійного струму, після повного знеструмлення пристрою необхідно зачекати щонайменше чотири хвилини, перш ніж розпочинати будь-які сервісні роботи. Також він потребує надійного заземлення, оскільки має природно високий струм витоку.

## **2.5. Вибір апаратури керування та захисту**

Для забезпечення надійної експлуатації електроприводу, захисту силового частотного перетворювача та статорних обмоток електродвигуна від струмів короткого замикання, асиметрії фаз, витоків на землю та тривалих теплових навантажень здійснюється вибір комутаційно-захисної апаратури.

Згідно з розрахунковими струмами системи, обрано триполюсний автоматичний вимикач серії Nager MB325A (тип захисної характеристики — C) з номінальним тривалим струмом магістралі 20 А, який має такі експлуатаційні параметри:

гранична комутаційна здатність (тривалість відключення) — 6 кА відповідно до стандарту EN 60898;

клас обмеження енергії — 3;

номінальна робоча напруга лінійного захисту — 230/400 В;

ступінь захисту оболонки — IP20 (з кришкою типу IP30).

У реальних умовах функціонування ліфтових установок виникають експлуатаційні навантаження — тривалі струмові перевантаження та стрибки напруги, що призводять до деградації ізоляції, теплового перегріву або аварійного виходу з ладу силового електрообладнання.

Для надійного індивідуального захисту двигуна від теплових перевантажень у схему інтегровано триполюсне теплове реле серії TeSys D зі змінними плавкими запобіжниками. Обрано модель LRD22 із діапазоном

уставки та номінальним струмом теплових елементів 16 А. Загальний вигляд реле LRD22 наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 — Загальний вигляд теплового реле перевантаження серії TeSys LRD22

У сучасних автоматизованих системах ліфтових комплексів для реєстрації поверхових команд та викликів застосовуються спеціалізовані кнопки з електромагнітною фіксацією. Конструкція цих вузлів містить утримуючий індуктивний електромагніт, який фіксує кнопку в активованому стані до моменту виконання команди та знеструмлення котушки мікропроцесорною станцією.

Дверні контакти безпеки блокують пуск приводу та унеможливають рух кабіни за умови відкритих дверей шахти або кабіни. Конструктивно вони виконані у вигляді малогабаритних кінцевих вимикачів із нормально відкритими (НО) контактами, які замикаються під час механічного притвору дверей, формуючи дозвільний сигнал для кола керування.

Для безкомпромісного обмеження просторового переміщення підйомника та запобігання перебігу за крайні робочі положення (над шахтою чи в пряминок) застосовуються кінцеві вимикачі безпеки. На основі розрахунку

комутаційної здатності кола викликів обрано кінцевий вимикач із такими технічними параметрами:

марка/модифікація — Sigma GAA177-122;

номінальна напруга комутації — 380 В;

номінальний комутований струм — 1,5 А;

механічний експлуатаційний ресурс —  $10 \cdot 10^6$  циклів;

комутаційна (електрична) зносостійкість —  $2.5 \cdot 10^6$  циклів.

Підлогові контакти кабіни ліфта реагують на вагове завантаження під час входу пасажирів. Механізм рухомої підлоги діє на мікроперемикачі замикаючого типу, аналогічні дверним контактам. Інформація від підлогових датчиків використовується для реалізації таких автоматичних алгоритмів:

автоматичне повернення порожньої кабіни на базовий (перший) поверх після виходу пасажирів;

динамічне керування внутрішнім освітленням кабіни для заощадження ресурсів;

блокування зовнішніх поверхових викликів кабіни під час транспортування пасажирів, що оптимізує логіку роботи тахограми руху.

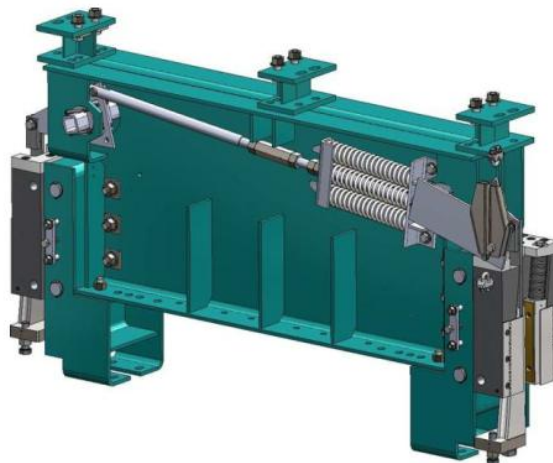


Рисунок 2.7 — Загальний вигляд та конструктивні елементи аварійного механічного уловлювача ліфта

**Уловлювачем** (рисунок 2.7) є спеціалізований механічний пристрій аварійного захисту, призначений для динамічного гальмування, примусової фіксації та тривалого утримання на вертикальних напрямних кабіни (або противаги) ліфта у разі її руху вниз із перевищенням номінальної швидкості вище допустимого критерію.

З метою забезпечення безумовної безпеки пасажирів, аварійні уловлювачі в обов'язковому порядку монтуються на кабінах ліфтових установок усіх типів. Встановлення аналогічних уловлювачів на противагу є регламентованим у випадках, коли траєкторія її руху проходить над службовими чи житловими приміщеннями, де можливе перебування людей, або над транспортними переходами, перекриття яких не розраховані на динамічний удар від падіння маси противаги.

За фізичним принципом функціонування уловлювачі класифікуються як специфічний різновид лінійного колодкового гальма. Конструктивна відмінність даного механізму полягає в тому, що нормальне затискне зусилля на гальмівну колодку створюється автономним самозатискним пристроєм безпосередньо в момент первинного фрикційного контакту робочої поверхні колодки з вертикальною напрямною.

Активація та спрацьовування контуру уловлювачів здійснюється в автоматичному режимі. Керуючий імпульс на впровадження колодок формується механічним обмежувачем швидкості при перевищенні встановленої уставки або безпосередньо системою контролю натягу канатів у разі критичного послаблення чи повного обриву елементів тягової підвіски.

**Енкодер** являє собою вимірювальний електромеханічний перетворювач, який трансформує кутове переміщення (обертання) вала в дискретний електричний сигнал. Ця інформація використовується мікропроцесорними контролерами або частотними перетворювачами для прецизійного визначення просторового положення та кутової швидкості обертів елементів установки.

Основні сфери практичного застосування датчиків кутового положення:

- вимірювання лінійної довжини протяжних матеріалів під час розмотування та змотування котушок (поліграфічні комплекси, кабельне та текстильне виробництво);
- моніторинг швидкості та позиціонування виконавчих органів (пакувальні автомати, конвеєрні лінії, ліфтові лебідки та шахтні підйомні установки);
- координатний контроль за осями X-Y (цифрова друкарська техніка, системи числового програмного керування (ЧПУ) та промислова робототехніка);
- зворотний зв'язок у замкнених системах електроприводу для регулювання координат асинхронних та синхронних (зокрема з постійними магнітами) електричних машин.

Для гарантування високої точності позиціонування та безумовної безпеки пасажирських ліфтових комплексів оптимальним інженерним рішенням є інтеграція абсолютного багатообертового енкодера. Впровадження цього типу датчика дозволяє безперервно ідентифікувати абсолютну координату кабіни в шахті та сформувати для кожного поверхового майданчика унікальний цифровий код.

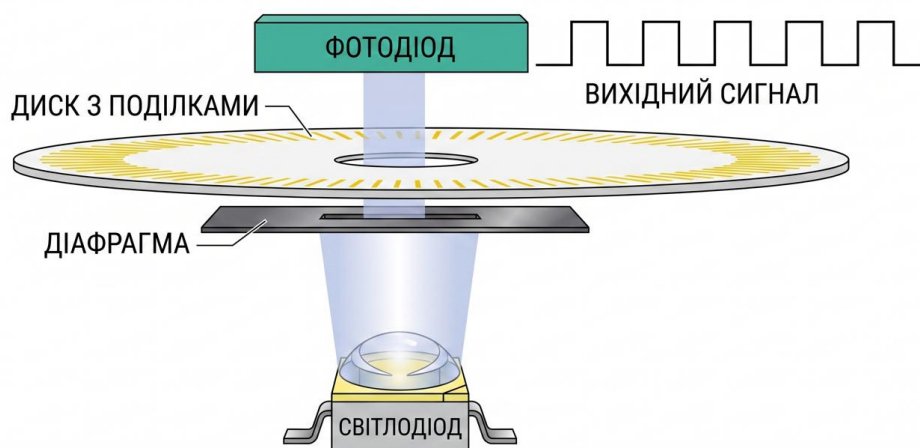


Рисунок 2.8 — Фізичний принцип функціонування оптичної системи енкодера

За своєю структурою даний апарат поєднує в собі абсолютний однообертний датчик та інтегрований електронний чи механічний лічильник кількості повних обертів. Поточне положення вала в межах одного оберту з роздільною здатністю до 18 біт визначається за допомогою кодованого оптичного диска або високоточної фотодіодної матриці (рис. 2.8). Вихідні кутові координати транслюються у вигляді завадостійкого коду Грея або двійково-десятькового коду.

Важливою перевагою абсолютного багатообертового енкодера є його інваріантність до аварійних зникнень напруги живлення. Кількість зафіксованих обертів надійно реєструється в енергонезалежній пам'яті. Завдяки інтегрованому автономному джерелу живлення (літієвій батареї) пристрій продовжує підрахунок кінематичних циклів навіть за повного знеструмлення об'єкта. Це виключає втрату інформації про істинне положення кабіни при її механічному переміщенні без електроенергії, усуваючи потребу в тривалій процедурі калібрування (пошуку базової нульової мітки) після відновлення живлення.

Сучасні абсолютні енкодери характеризуються високою довговічністю завдяки безконтактному зчитуванню інформації та відсутності схильних до механічного зношування елементів чи традиційних ламп розжарювання. Застосування елементної бази з низьким рівнем енергоспоживання мінімізує струм споживання та запобігає самонагріванню електронних плат. Конструкція пристрою розрахована на роботу в суворих експлуатаційних умовах і витримує механічні удари та вібрації інтенсивністю до 200 g впродовж 6 мс. Новітні літієві елементи живлення мають робочий температурний діапазон до +125°C, а їхній розрахунковий термін служби при номінальних 45°C становить понад 10 років без необхідності сервісного обслуговування.

Під час проектування інтерфейсів зв'язку слід враховувати топологію вихідних сигналів. Паралельний інтерфейс («один провід — один біт») забезпечує максимальну швидкодію та просте декодування даних

контролером. Проте така архітектура обмежує можливість підключення кількох пристроїв до одного порту, а за високої бітової роздільності суттєво збільшує габарити, вартість та складність монтажу кабельних трас.

З урахуванням висунутих вимог, для розробки системи зворотного зв'язку обрано абсолютний багатообертовий енкодер виробництва компанії Sensor Intelligence — модель SICK AFM60 SSI із виступаючим приводним валом. Загальний вигляд пристрою та його базові технічні параметри представлені на рисунку 2.9.



Роздільна здатність	18 біт
Габаритні розміри	Ø 60 мм
Інтерфейс/драйвери	SSI
Напруга живлення	4,5...32 В постійного струму
Максимальна робоча швидкість	6000 хв <sup>-1</sup>

Рисунок 2.9 — Конструктивне виконання та технічні характеристики енкодера SICK AFM60 SSI

## 2.6. Вибір магістральних кабельних ліній і силових провідників

Для організації надійної експлуатації електромеханічного комплексу ліфтової установки за номінальної змінної або постійної напруги до 380 В застосовуються спеціалізовані гнучкі підвісні ліфтові кабелі багатожильної структури, оснащені інтегрованим сталевим вантажонесучим осердям (тросом). Вони виготовляються з гнучкими мідними жилами підвищеного класу деформаційної стійкості, мають поліетиленову ізоляцію та захищені зовнішньою оболонкою з морозостійкої гуми або полівінілхлоридного (ПВХ) пластикату.

Залежно від умов заводозахисності ліфтові провідники випускаються в екранованому або неекранованому конструктивних варіантах із

номенклатурною кількістю жил від 6 до 24. Основними базовими марками кабелів цього класу є КПВЛ, КПВЛЕ, КПВЛМ та КПВЛЕМ.

Для підключення статорних обмоток приводного асинхронного двигуна до вихідних клем напівпровідникового перетворювача частоти обрано силовий мідний кабель марки ВВГнг. Цей провідник спеціально розроблений для фіксованого транспортування електричної енергії в стаціонарних установках змінного струму частотою 50 Гц при напрузі до 660 В і характеризується зниженою горючістю ізоляційних шарів при груповому прокладанні. Елементи ізоляції та зовнішньої захисної матриці кабелю виконані з полівінілхлоридного пластикату низької пожежної небезпеки. Струмopровідні жили перерізом 2,0 мм<sup>2</sup> виготовлені з м'якого електротехнічного мідного дроту. Трьохжильна конфігурація кабелю розрахована на тривале протікання робочого струму силового навантаження величиною до 19 А. Для підведення магістрального електроживлення від головного розподільчого щита до вхідних кіл частотного перетворювача (параметри мережі:  $U = 380 \text{ В}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$ ) використано провідник марки ВВГнг. Даний кабель містить алюмінієві струмопровідні жили, гумову фазну ізоляцію та пласку роздільну основу. Цей тип провідника орієнтований на відкрите прокладання по конструкційних і тримальних поверхнях промислових чи житлових споруд. За умови номінального перерізу жил 2,5 мм<sup>2</sup> провідник забезпечує тривале та безпечне проходження струму силового вводу величиною до 23 А.

### **Висновки до розділу**

Обґрунтовано систему регульованого електроприводу «перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором» (ПЧ-АД) на напругу 0,4 кВ на базі малошумного двигуна АІР160S6, що дозволило повністю відмовитися від енергоємних механічних способів регулювання та масивних маховиків.

Виконано розрахунок статичних і динамічних зусиль у тяговому органі швидкісного ліфта для 30-поверхової будівлі  $T_{on}=50\%$ , вантажопідйомність 800 кг, за результатами якого проведено успішну перевірку вибраного електродвигуна на відповідність умовам нагрівання та еквівалентного моменту 92 Нм.

Здійснено вибір завадостійкої апаратури захисту та автоматизації, включаючи автоматичний вимикач Hager, теплове реле TeSys LRD22, а також абсолютний багатообертовий енкодер SICK AFM60 SSI, який забезпечує високоточну ідентифікацію координат кабіни в шахті без потреби у калібруванні системи після зникнення напруги.

### 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1. Розрахунок природних електромеханічних та механічних характеристик регульованого електроприводу швидкісного ліфта

Аналітичний розрахунок та математичне моделювання статичних характеристик асинхронного двигуна (АД) базуються на використанні його класичної схеми заміщення. Для забезпечення високої точності обчислень та зручності алгоритмізації в рамках даного проекту застосовано Т-подібну схему заміщення асинхронної машини (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — Т-подібна схема заміщення фази асинхронного двигуна

Струм холостого ходу становитиме:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}} = \sqrt{\frac{19.25^2 - [0.75 \cdot 23(1 - 0.03) / (1 - 0.75 \cdot 0.03)]^2}{1 - [0.75 \cdot 23(1 - 0.03) / (1 - 0.75 \cdot 0.03)]^2}} = 12.34, \text{ А} \quad (3.1)$$

де,  $s_H = 1 - \frac{n_H}{n_0} = 1 - \frac{970}{1000} = 0.03$  - номінальне ковзання;

$$I_{11} = \frac{p_- \cdot P}{3 \cdot \cos \varphi_{p_-} \cdot U_{1H} \cdot \eta_{p_-}} = \frac{0.75 \cdot 11 \cdot 10^3}{3 \cdot 0.764 \cdot 220 \cdot 0.85} = 19.25 \quad - \text{ струм статора}$$

двигуна при частковому навантаженні.

Коефіцієнт потужності асинхронної машини в режимі часткового навантаження визначається як:

$$\cos \varphi_{p^*} = 0.98 \cdot \cos \varphi_H = 0.98 \cdot 0.78 = 0.764 \quad (3.2)$$

При цьому поточний коефіцієнт завантаження двигуна становить:

$$p_* = \frac{P}{P_H} = 0.75 \quad (3.3)$$

Визначаємо коефіцієнт магнітного зв'язку:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{12.34}{2 \cdot 6 \cdot 23} = 1.045 \quad (3.4)$$

Визначаємо значення допоміжного коефіцієнта:

$$A_1 = mU_{1\phi}^2 (1 - s_H) / (2C_1 k_{\max} P_H) = \quad (3.5)$$

$$3 \cdot 220^2 (1 - 0.03) / (2 \cdot 1.045 \cdot 11 \cdot 11 \cdot 10^3) = 1.945$$

Приведений активний опір обмотки ротора визначається зі співвідношення:

$$R'_2 = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_k)C_1} = \frac{1.945}{(1 + 1/0.184)1.044} = 0.342 \text{ Ом} \quad (3.6)$$

де,  $\beta = R_1 / (C_1 \cdot R'_2)$

При визначенні параметрів статора приймається наближена рівність конструктивних коефіцієнтів  $\beta = 1$ , (із загального інженерного діапазону 0,6 ... 2,5). Тоді активний опір статорної обмотки дорівнює:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1.044 \cdot 0.342 \cdot 1 = 0.352 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

Для знаходження реактивної складової контуру визначимо  $\gamma$ .

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0.184^2}\right) - 1^2} = 5.34 \quad (3.8)$$

Величина сумарного індуктивного опору короткого замикання становить:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2 = 5.34 \cdot 1.044 \cdot 0.342 = 1.9 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

Індуктивний опір роторної обмотки, приведений до статорної:

$$X'_{2H} = 0.58 \cdot X_{KH} / C_1 = 0.58 \cdot 1.9 / 1.044 = 1.05 \text{ Ом} \quad (3.10)$$

Індуктивний опір розсіювання роторної обмотки, приведений до статорної:

$$X'_{2\sigma} = X'_{2H} \frac{I_{1\phi_n}}{U_{1\phi_n}} = 1,05 \frac{23}{220} = 0,11 \text{ Ом} \quad (3.11)$$

Індуктивність роторної обмотки, зумовлена потоком розсіювання,

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,11}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.12)$$

Індуктивний опір статорної обмотки визначається за виразом:

$$X_{1H} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 1,9 = 0,798 \text{ Ом} \quad (3.13)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_{1H} \frac{I_{1\phi_n}}{U_{1\phi_n}} = 0,798 \frac{23}{220} = 0,083 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

Індуктивність статорної обмотки, зумовлена потоком розсіювання,

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,083}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,66 \cdot 10^{-4} \text{ Гн} \quad (3.15)$$

ЕРС вітки намагнічування  $E_1$ , наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора для номінального режиму, визначається з векторної діаграми:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1j} \cdot \cos \varphi_{1H} - R_1 I_{1H})^2 + (U_{1j} \cdot \sin \varphi_{1H} - X_{1H} I_{1H})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,78 - 0,358 \cdot 23)^2 + (220 \cdot 0,628 - 0,798 \cdot 23)^2} = 223,99 \text{ В} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Тоді, величина індуктивного опору намагнічування становить:

$$X_{\mu H} = E_1 / I_0 = 223,99 / 12,34 = 18,15 \text{ Ом} \quad (3.17)$$

Головний індуктивний опір намагнічувального контуру:

$$X_{\mu} = X_{\mu H} \frac{I_{1\phi_n}}{U_{1\phi_n}} = 18,15 \frac{23}{220} = 1,897 \text{ Ом} \quad (3.18)$$

Результуюча індуктивність, зумовлена магнітним потоком у повітряному зазорі, який створюється сумарною дією струмів статора (індуктивність контуру намагнічування), становить:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{1.897}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.06 \text{ Гн} \quad (3.19)$$

Після визначення параметрів схеми заміщення проводиться розрахунок механічних та електромеханічних характеристик асинхронного двигуна. Для режиму частотного керування електромеханічна характеристика описується залежністю приведенного роторного струму від величини ковзання:

$$I'_2 = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R_2}{s X_{\mu H} f_{1*}}\right)^2}} \quad (3.20)$$

де  $U_{1j}$  - фазна напруга обмоток статора АД;

$f_{1*} = f_{1j} / f_{1H}$  - величина відносного значення частоти напруги живлення.

Задаючи різні значення ковзання, можна обчислити відповідні значення струму, а за допомогою співвідношення для кутової швидкості  $\omega = \omega_0(1 - s)$ , — визначити швидкість обертання двигуна.

Якщо вважати, що струм намагнічування має виключно реактивний характер, тоді електромеханічна характеристика асинхронного двигуна, яка встановлює залежність струму статора від ковзання, описується таким виразом:

$$I_{1j}(s) = \sqrt{I_0^2 + I_{2j}^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_{2j}(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} \quad (3.21)$$

де струм  $I_0$  намагнічування змінюється відповідно до закону частотного керування:

$$I_{0j} = \frac{U_{1j}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1H} + X_{\mu H})^2}} \quad (3.22)$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2}} \quad (3.23)$$

Розраховані за наведеними залежностями для природного режиму при  $s = (0 \div 1)$  та враховуючи, що для природної характеристики  $f_{1*} = 1$ , електромеханічні характеристики АД представлені на рисунок 3.2.



Рисунок 3.2 - Природні електромеханічні характеристики АД

Механічна характеристика асинхронної машини, що описує залежність електромагнітного моменту від ковзання при варіації амплітуди та частоти напруги, розраховується за уточненою формулою:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R_2'}{\omega_{0j} \cdot s_j \left( X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R_2'}{s_j} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'}{s_j \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right)} \quad (3.24)$$

Координати критичних точок механічної характеристики для рухового (+) та генераторного (-) режимів визначаються за виразами:

$$\begin{aligned} M_k &= \frac{3 \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2})} = \\ &= \frac{3 \cdot 220}{2 \cdot 104.72 \cdot 1.044 (0.358 + \sqrt{0.358^2 + 1.9^2})} = 289.8 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{2\pi f}{3} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{3} = 104.72 \text{ об/хв} - \text{ синхронна кутова швидкість}$$

магнітного поля;

$U_{1\phi}$  - фазна напруга на обмотках статора двигуна.

$X_k = X_{1H} + X'_{2H} = 0.798 + 1.05 = 1.85 \text{ Ом}$  — індуктивний опір при короткому замиканні.

$$s_{kj} = \pm R'_2 \sqrt{\frac{1 + (R_1 / X_{\mu H} \cdot f_{1*})^2}{R_1^2 + X_{\mu H}^2 \cdot f_{1*}^2}} \quad (3.26)$$

$$M(s) = \frac{2M_k(1 + a \cdot s_k)}{s_k / s + 2a \cdot s_k + s / s_k} \quad (3.27)$$

де,  $a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0.358}{0.342} = 1.05$  - значення відношення активного опору статора до

активного приведенного опору ротора;

Графік природної механічної характеристики асинхронного двигуна АІР160S6 наведено на рисунку 3.3.

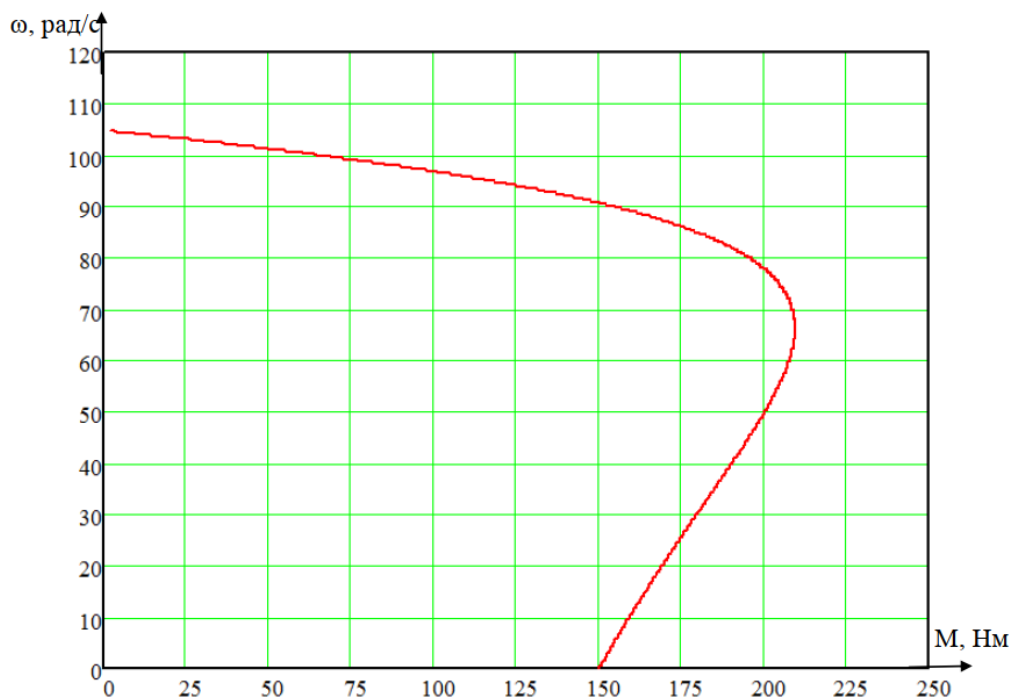


Рисунок. 3.3 - Природна механічна характеристика АД АІР160S6

### 3.2. Розрахунок робочих та регулювальних характеристик електроприводу

Моделювання регулювальних характеристик здійснюється для дискретного ряду частот напруги статора перетворювача:  $f_{11} = 50$  Гц,  $f_{11} = 35$  Гц,  $f_{11} = 25$  Гц,  $f_{11} = 10$  Гц. Частотне регулювання кутової швидкості асинхронної машини базується на зміні частоти живильної напруги, оскільки швидкість обертання магнітного поля статора є прямо пропорційною частоті:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{P_H} \quad (3.28)$$

Амплітудне значення струму статоратакож є функцією частоти мережі:

$$I_1 = \frac{E_1}{kf_1} \approx \frac{U_1}{kf_1} \quad (3.29)$$

При варіації частоти живильного сигналу виникає безпосередня потреба в одночасному регулюванні амплітуди напруги. Необхідність зниження напруги при зменшенні частоти нижче номінальної зумовлена тим, що індуктивний опір обмоток падає пропорційно частоті. Без відповідного зниження напруги струм намагнічування різко зростає, викликаючи глибоке магнітне насичення магнітопроводу та критичний перегрів сталі й обмоток АД. В області малих ковзань закон зміни напруги визначає стабільність магнітного потоку.

У режимах частотного керування на величину відносного ковзання  $s_j$  впливає не лише абсолютною різницею швидкостей поля та ротора  $s_a = \omega_0 - \omega$  а й відносним значенням частоти:

$$\frac{f_{1j}}{f_{1H}} = f_1 \quad (3.30)$$

$$s_j = \frac{\omega_{0j} - \omega}{\omega_{0H}} \quad (3.31)$$

де  $f_{1j}$ ,  $\omega_{0j}$ ,  $s_j$  — поточні керовані параметри, частота напруги статора, швидкість поля та відносне ковзання;  $f_{1H}$  і  $\omega_{0H}$  паспортні номінальні параметри електричної машини.

З урахуванням наведених співвідношень отримаємо:

$$s_j = 1 - \frac{\omega}{\omega_{0H}} \quad (3.32)$$

Для коректного аналізу характеристик у режимах частотного регулювання, на відміну від розрахунку природних режимів, необхідно враховувати частотну залежність усіх реактивних опорів схеми заміщення двигуна:

$$X_{1j} = X_{1H} \cdot f_{1*}; X_{\mu j} = X_{\mu H} \cdot f_{1*} \quad (3.33)$$

$$X'_2 = X'_{2H} \cdot f_{1*}; X_k = X_{kH} \cdot f_{1*} \quad (3.34)$$

Слід зауважити, що за номінальної частоти 50 Гц значення індуктивного опору намагнічування  $X_{\mu H}$  на один-два порядки більша активного опору статора  $R_1$  і тому в стаціонарних режимах опором  $R_1$  нехтують. Проте в процесі глибокого регулювання швидкості вниз (при низьких значеннях  $\gamma$ ) реактивні опори суттєво зменшуються, і активний опір  $R_1$  буде співвимірним із ними, що вимагає його обов'язкового врахування для запобігання перекиданню двигуна.

Потужність ковзання, яка індукується в колах ротора і розсіюється у вигляді теплоти в його обмотках, визначається через електромагнітну потужність  $P_s = M \omega_{0j} S_j = 3I_2'^2 R_2'$ , звідки:

$$M = \frac{3I_2'^2 R_2'}{\omega_{0j} S_j} \quad (3.35)$$

Аналізуючи Т-подібну схему заміщення та нехтуючи відносно малими величинами розсіювання контуру намагнічування, струм ротора  $I_2'$  приводиться до виду:

$$I'_2 = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2 + \left(\frac{R_1 R'_2}{s X_{\mu H} f_{1*}}\right)^2}} \quad (3.36)$$

Підстановка отриманого струму у вираз електромагнітного моменту дає загальну формулу штучних механічних характеристик при частотному регулюванні:

$$M = \frac{3 \cdot U_{1j}^2 \cdot R'_2}{\omega_{0j} \cdot s_j \left( X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s_j} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'}{s_j \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}} \right)^2 \right)} \quad (3.37)$$

Опісля диференціювання цього виразу за ковзанням визначаються координати критичних точок для довільної частоти:

$$M_k = \pm R'_2 \sqrt{\frac{1 + \left( R_1 / X_{\mu H} f_{1*} \right)^2}{R_1^2 + X_{KH}^2 f_{1*}^2}} \quad (3.38)$$

При знакові (+) – отримаємо режим руху швидкісного ліфта, а знак (-) — режим рекуперативного гальмування в режимі спуску важкої кабіни.

З аналізу виразу випливає: якщо знехтувати падінням напруги на  $R_1$ , то для підтримання постійної перевантажувальної здатності двигуна  $M_k$  амплітуду напруги необхідно змінювати строго пропорційно частоті. Для ліфтового приводу обирається класичний закон частотного регулювання:

$$\frac{U_{1*}}{f_{1*}} = const$$

На рисунку 3.4 представлено сімейство розрахованих штучних механічних характеристик АД для заданого закону керування, а на рисунку 3.5 — відповідні штучні електромеханічні характеристики.

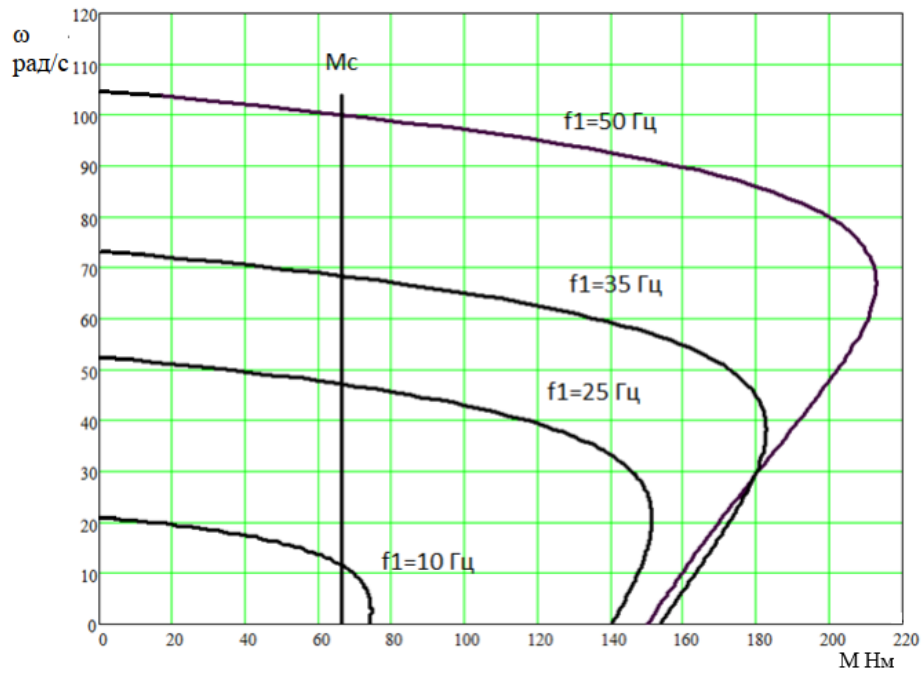


Рисунок 3.4 — Механічні характеристики електроприводу ліфта при базовому законі частотного регулювання

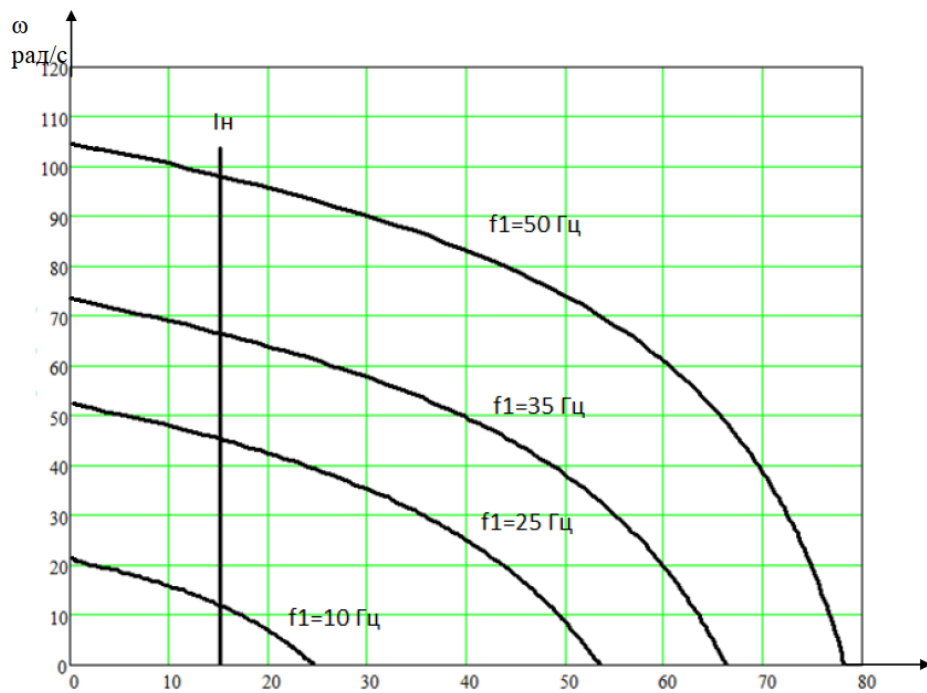


Рисунок 3.5 — Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна ліфта

### 3.3 Дослідження системи автоматичного керування регульованого електропривода швидкісного ліфта

Показана на рисунку 3.6 структурна схема відображає лінеаризовану безперервну систему автоматичного керування (САК) для частотно-регульованого асинхронного електроприводу з векторним методом керування, що функціонує у двох зонах регулювання швидкості. Базою для побудови цієї моделі є структурна схема силового каналу «перетворювач частоти – асинхронний двигун». При цьому внутрішні перехресні зв'язки у двофазній моделі асинхронної машини (d-q координатна система) або повністю компенсовані за рахунок алгоритмів керування, або вважаються несуттєвими для даного класу динамічних задач.

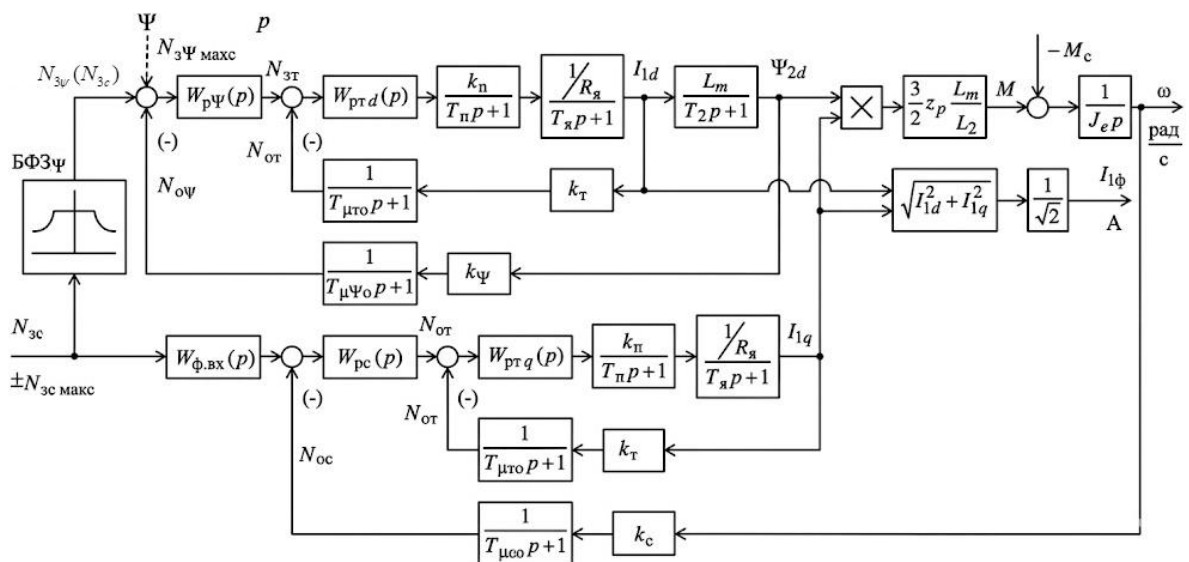


Рисунок 3.6 — Структурна схема системи автоматичного керування частотно-регульованим електроприводом ліфта

Архітектура системи базується на принципі незалежного (роздільного) регулювання координат магнітного потокозчеплення ротора та електромагнітного моменту. Для однозонного режиму роботи сигнал завдання на вході відповідного контуру підтримується постійним  $N_{3\psi} = N_{3\psi \max} = const$ , що на схемі відображено пунктирною лінією. У двозонному приводі при

переході у другу зону (робота вище номінальної швидкості) виникає потреба у послабленні головного магнітного поля двигуна обернено пропорційно зростанню кутової швидкості.

Для технічної реалізації цього алгоритму в структуру інтегрується блок формування завдання потокозчеплення ( $БФЗ\psi$ ). Його вихідний сигнал генерується як функція від потрібної швидкості  $N_{3\psi}$  ( $N_{3c}$ ) або від її фактичного значення  $N_{3\psi}(\omega)$ . Варто зауважити, що корекція потоку за заданою швидкістю  $N_{3c}$  є коректною лише за умови використання задатчика інтенсивності. Проте для забезпечення високої точності та динамічної стійкості у загальному випадку доцільніше формувати завдання потокозчеплення ротора залежно від реальної швидкості обертання вала двигуна  $\omega$ .

Величина сталої часу в колі зворотного зв'язку залежить від періоду оновлення даних: часу, що витрачається на обробку результатів вимірювань або на обчислення поточного значення координати електропривода.

Часовий проміжок, необхідний для дискретизації та обробки сигналу з датчика струму (період оновлення даних у цифровій системі):

$$T_{\mu Io} = T_{33.T} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Період оновлення розрахункових значень потокозчеплення в системі керування.

$$T_{\mu \psi o} = T_{33.\psi} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Період дискретизації сигналу швидкості, що визначається часом опитування енкодера.

$$T_{33.T} = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

Визначимо теоретичну верхню межу смуги пропускання контуру регулювання швидкості електропривода

$$f_{\max} = \frac{0.76 \cdot f_{\text{ШИМ}}}{2 \cdot \pi (n_{oc.c} + 2 \cdot n_{oc.t} + 2)} = \frac{0.36 \cdot 10 \cdot 10^3}{2 \cdot 3.14 \cdot (15 + 2 \cdot 2 + 2)} = 47 \text{ Гц}$$

Відповідно до представленої схеми формуємо розрахункову модель системи в пакеті Matlab Simulink (рисунок 3. 7).

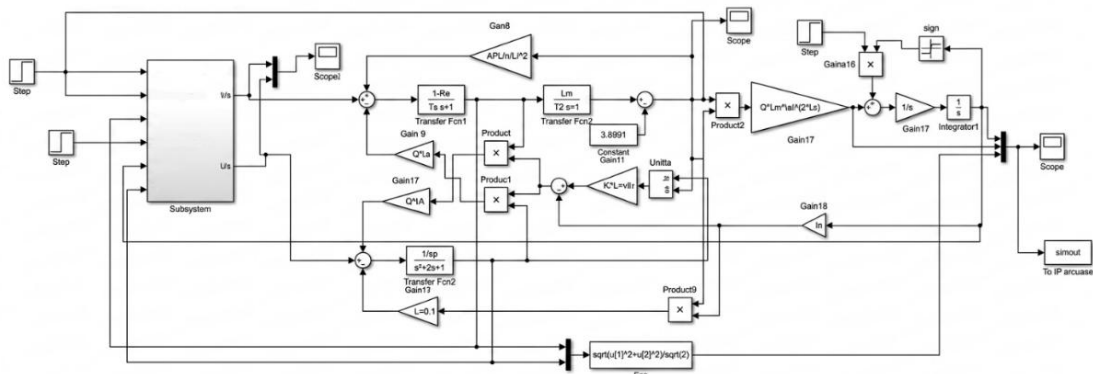


Рисунок 3.7 — Імітаційна модель системи автоматичного керування електроприводом ліфта в пакеті Matlab Simulink

Проведемо перевірку роботи імітаційної моделі швидкісного ліфта, для цього здійснено моделювання швидкості та прискорення кабіни для етапів: підйом кабіни, рух, зупинка кабіни. Результат моделювання приведено на рисунку 3.8.

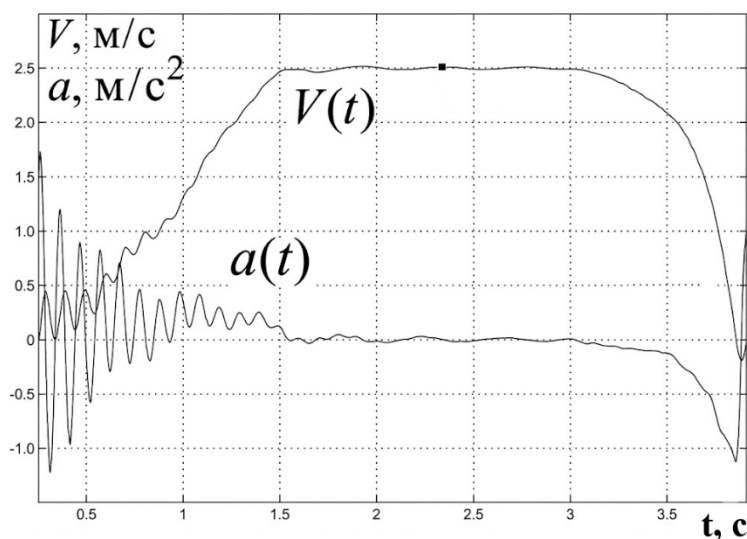


Рисунок 3.8 – Графік зміни швидкості і прискорення кабіни ліфта.

Аналіз отриманих часових діаграм свідчить, що вихід швидкості на задане усталене значення відбувається приблизно за 1,5 с. При цьому максимальне лінійне прискорення кабіни строго обмежене і не перевищує допустимого нормативного рівня  $2 \text{ м/с}^2$ , що повністю задовольняє вимогам фізіологічного комфорту пасажирів та безпеки експлуатації. Максимальна лінійна швидкість кабіни становить  $2,5 \text{ м/с}^2$  що точно відповідає технічному завданню проекту.

Після перевірки роботоzдатності моделі електроприводу з векторним керування на базі АД в номінальному режимі, проведемо моделювання роботи електроприводу ліфта в для двох режимів роботи; підйом кабіни та її спуск.

*Підйом кабіни ліфта.* Цикл роботи; розгін з 0 до необхідної швидкості 100 рад/с, робота на потрібній швидкості, гальмування з необхідною швидкістю до 30 рад/с, робота на понижений швидкості, гальмування з зниженням швидкості до 0 (рисунок 3.9).

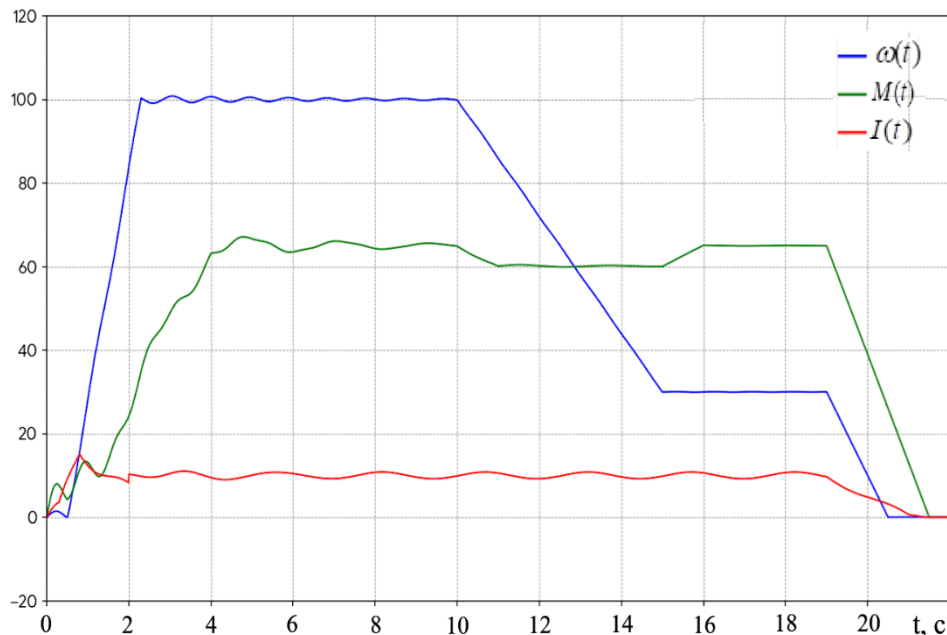


Рисунок 3.9 — Графіки переходних процесів кутової швидкості, струму статора та електромагнітного моменту при підйомі кабіни

Як видно з отриманих графіка швидкість при підйомі ліфта відпрацьовує завдання на швидкість з мінімальною похибкою. З графіка перехідного процесу струму видно, в установленому режимі, значення струму практично відповідає номінальному  $I_H = 15$  А, а в перехідних режимах максимальне значення струму на перевищує 18 А. Механічний момент становить 65 Н·м.

Опускання кабіни ліфта. Цикл роботи; розгін з 0 до необхідної швидкості -100 рад/с, робота на потрібній швидкості, гальмування з необхідною швидкістю до -30 рад/с, робота на пониженій швидкості, гальмування з зниженням швидкості до 0 (рисунок 3.10).

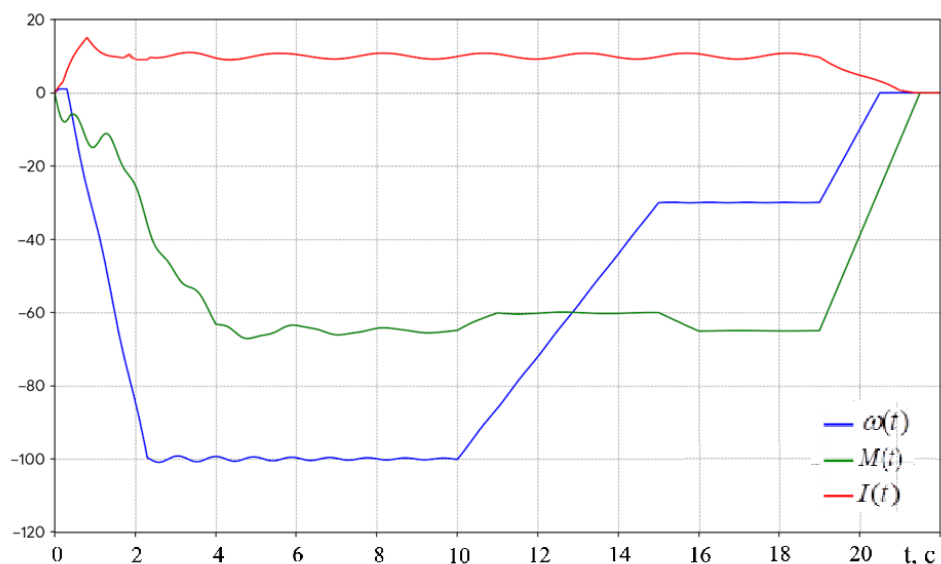


Рисунок 3.10 — Графіки перехідних процесів кутової швидкості, струму статора та електромагнітного моменту при опусканні кабіни

Перехідні процеси швидкості демонструють точне відпрацювання траєкторії руху із цільовим значенням -100 рад/с. Аналіз струмової діаграми підтверджує, що в усталеному стані струм статора знаходиться в межах номінальних параметрів, а в моменти інтенсивної зміни швидкості його пікові значення жорстко обмежені на рівні 18 А. Електромагнітний момент системи в цьому режимі є від'ємним і становить близько -65 Нм, що свідчить про

перехід асинхронної машини в генераторний (рекуперативний) режим гальмування через дію дисбалансу мас кабіни та противаги.

### **Висновки до розділу.**

Запропоновано математичну модель асинхронного двигуна на основі Т-подібної схеми заміщення, що дозволило розрахувати точні значення активних і індуктивних опорів контурів та побудувати сімейства природних і штучних механічних та електромеханічних характеристик при частотному законі

$$\text{керування } \frac{U_1}{f_1} = \text{const}$$

Розроблено в пакеті Matlab Simulink імітаційну модель системи автоматичного керування електроприводом ліфта з алгоритмами векторного керування у двох зонах, де враховано реальні періоди дискретизації датчиків струму.

Аналіз результатів моделювання підтвердив високу динамічну точність відпрацювання заданих тахограм руху в режимах підйому та спуску (кутова швидкість  $\pm 100$  рад/с, лінійна швидкість 2,5 м/с: час виходу на усталений режим становить 1,5 с, пускові струми обмежені на безпечному рівні 18 А, а максимальне прискорення кабіни не перевищує нормативні 2 м/с<sup>2</sup>).

## **4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **4.1 Аналіз заходів безпеки при експлуатації ліфта**

Безпечна експлуатація ліфтів є досить важливою, оскільки нормальна робота цього обладнання пов'язана з низкою ризиків, серед яких: заземлення, здавлювання, падіння, несанкціонована зупинка кабіни між поверхами, пожежа, ураження електричним струмом, а також механічні ушкодження чи корозія матеріалів.

Для гарантування безпеки кожен нововстановлений ліфт підлягає реєстрації та системним технічним оглядам: первинному (перед введенням в експлуатацію), періодичному (не рідше одного разу на 24 місяці) та позачерговому після ремонтів чи аварій. Експлуатація ліфта категорично заборонена, якщо відсутній паспорт, закінчився встановлений термін роботи, знос канатів перевищує допустимі норми, виявлені тріщини чи деформації в металоконструкціях, або ж несправні прилади безпеки.

Організація належної роботи покладається на суб'єкта господарювання. Він зобов'язаний призначити відповідальних осіб за технічне обслуговування, ремонт та справний стан ліфтів. Обслуговуючий персонал (електромеханіки, ліфтери, оператори) повинен бути старшим за 18 років, пройти медичний огляд, спеціальне навчання та мати відповідну групу з електробезпеки.

Під час користування ліфтом суворо забороняється перевищувати вантажопідйомність кабіни та одночасно перевозити пасажирів і небезпечні вантажі. У житлових будинках не допускається проїзд дітей дошкільного віку без супроводу дорослих. Для інформування пасажирів на основному поверсі та в кабіні обов'язково вивішуються правила користування, а також таблички із зазначенням вантажопідйомності (та кількості пасажирів) і номером телефону зв'язку з аварійною службою

Під час користування ліфтами діють такі основні заборони:

- Перевищення вантажопідйомності: Не дозволяється перевезення в кабіні ліфта пасажирів або вантажів, загальна маса яких перевищує допустиму вантажопідйомність ліфта.
- Проїзд дітей: У житлових будинках діє заборона на проїзд у ліфті дітей дошкільного віку без супроводу дорослих.
- Перевезення небезпечних речовин: Одночасне перевезення пасажирів і вибухонебезпечних, пожежонебезпечних (легкозаймистих), хімічно активних та радіоактивних вантажів суворо забороняється.
- Використання вантажних ліфтів: У вантажних ліфтах із внутрішнім керуванням або самостійного користування заборонено одночасне перевезення пасажирів і вантажу. У ліфтах із зовнішнім керуванням транспортування людей взагалі не дозволяється.
- Неправильний пуск: Для пасажирських ліфтів забороняється пуск кабіни з поверхової площадки.
- Куріння: У ліфтах забороняється куріння тютюнових виробів.
- Перевезення вантажів у багатокабінних підйомниках: В електричних багатокабінних пасажирських підйомниках безперервної дії підймання і опускання (транспортування) вантажів не дозволяється.

Крім того, робота (експлуатація) ліфта категорично не дозволяється, якщо існують загрози безпеці: відсутній паспорт, не проведено технічний огляд чи експертне обстеження, закінчився строк роботи, відсутній атестований персонал, а також якщо виявлено знос канатів, тріщини і деформації в металоконструкціях або несправні прилади та пристрої безпеки.

#### **4.1 Заходи електробезпеки при роботі з електрообладнанням**

Струмopрoвідні елементи електроустановок мають бути надійно ізолювані від випадкового доторкання. Водночас відкриті та сторонні провідні деталі, доступні для контакту, не повинні перебувати під

небезпечною напругою ані в штатному режимі експлуатації, ані в разі пошкодження ізоляційного шару.

З метою уникнення ураження струмом унаслідок прямого контакту необхідно використовувати, як окремо, так і в комплексі, такі базові методи: нанесення основної ізоляції на струмоведучі частини, встановлення захисних оболонок, огорож чи бар'єрів, розташування небезпечних елементів поза зоною досяжності людини, а також використання наднизької (малої) напруги. Як додатковий захід безпеки в мережах до 1 кВ дозволяється встановлення пристроїв захисного відключення (ПЗВ).

Захист від прямого дотику можна не передбачати, якщо номінальна напруга залишається в безпечних межах. Для систем безпечної або захисної наднизької напруги цей поріг становить 25 В змінного чи 60 В постійного струму (за умови експлуатації в сухих приміщеннях із діючою системою зрівнювання потенціалів та низькою ймовірністю контакту людини зі струмопровідними частинами). У решті випадків безпечним вважається рівень до 6 В змінного або 15 В постійного струму.

Щоб запобігти ураженню струмом у разі непрямого дотику, слід впроваджувати такі захисні заходи: облаштування захисного заземлення, налаштування автоматичного відключення живлення, забезпечення зрівнювання та вирівнювання потенціалів. Також ефективними є подвійна чи посилена ізоляція, захисне розділення електричних кіл, створення ізолюючих (непровідних) зон чи площадок та використання наднизької напруги.

Організація захисту від непрямого контакту є обов'язковою, коли напруга в системі перевищує 50 В для змінного та 120 В для постійного струму. Для зовнішніх установок, а також приміщень із підвищеною або особливою небезпекою, ці показники можуть бути знижені до 25 В (змінного) і 60 В (постійного) або навіть 12 В і 30 В відповідно, залежно від специфічних вимог до конкретного обладнання. Усі перелічені заходи безпеки реалізуються на етапах виробництва або монтажу, причому одночасне використання кількох методів не повинно погіршувати загальну ефективність захисту.

Для організації захисного заземлення дозволяється застосовувати як штучні, так і природні заземлювачі, причому перевагу слід віддавати саме природним. Якщо їхній опір відповідає нормативним вимогам, додаткове облаштування штучних контурів у мережах до 1 кВ не є обов'язковим. Головна умова — протікання струмів короткого замикання не повинно руйнувати природні заземлювачі чи порушувати роботу підключених до них систем.

Для територіально близьких електроустановок із різним призначенням та напругою, як правило, створюють єдиний спільний контур заземлення. Такий заземлювальний пристрій має комплексно виконувати всі поставлені завдання протягом усього періоду експлуатації: гарантувати безпеку людей при пробоях ізоляції, забезпечувати належний режим роботи мережі, захищати обладнання від перенапруг та підтримувати електромагнітну сумісність комп'ютерної техніки, систем РЗА й АСУ ТП. Пріоритетними при цьому завжди залишаються вимоги щодо захисту людей.

Якщо для чутливого інформаційного обладнання створюється окремий незалежний заземлювач (функціональне заземлення), необхідно передбачити заходи, що унеможливають одночасний дотик людини до деталей, які при пошкодженні ізоляції можуть опинитися під небезпечною різницею потенціалів. Об'єднання різних контурів у спільну заземлювальну систему здійснюється за допомогою мінімум двох провідників (природних чи штучних).

Нормативні параметри напруги дотику та опору заземлення під час стікання струмів замикання чи витoku мають зберігатися на безпечному рівні за будь-яких, навіть найгірших, сезонних умов. Під час розрахунків опору враховують найнесприятливіші показники питомого опору ґрунту, а також параметри штучних і природних заземлювачів. Крім того, заземлювальні контури мусять бути стійкими до корозії, механічно міцними та витримувати термічні й динамічні навантаження від струмів замикання.

Мережі напругою до 1 кВ у житлових, громадських і промислових будівлях, а також у приміщеннях для тварин і зовнішніх установках зазвичай

повинні живитися від джерел із глухозаземленою нейтраллю за системою заземлення TN. Критерії вибору конкретної конфігурації регламентуються відповідними розділами ПУЕ.

У системі TN-S нульовий робочий та нульовий захисний провідники функціонують окремо на всій протяжності лінії. Варіант TN-C-S передбачає суміщення їхніх функцій у єдиному провіднику лише на певній ділянці мережі, тоді як у системі TN-C таке об'єднання діє по всій системі. Альтернативою є система IT, де мережа живлення не має прямого зв'язку з землею, проте відкриті провідні елементи установки надійно заземлені. Згідно з прийнятим маркуванням, літерою L позначають фазний провідник, N — нульовий робочий, PE — нульовий захисний, а PEN — об'єднаний нульовий робочий і захисний провідник.

В електроустановках типу TN базовим методом захисту від непрямого дотику є автоматичне вимикання живлення. Додатково на повітряних лініях такої конфігурації обов'язково облаштовують повторне заземлення PEN-провідника. Схоже повторне заземлення провідника PEN або PE рекомендовано робити й на вводах у будівлі. У великих та багатоповерхових спорудах цю роль успішно виконує система зрівнювання потенціалів, яка реалізується шляхом підключення нульового захисного провідника до головної заземлювальної шини.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано систему регульованого електроприводу «перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором» (ПЧ-АД) на напругу 0,4 кВ на базі малошумного двигуна AIP160S6, що дозволило відмовитися від енергоємних механічних способів регулювання та масивних маховиків.

2. Виконано розрахунок статичних і динамічних зусиль у тяговій системі швидкісного ліфта для 30-поверхової будівлі з  $T_{on}=50\%$ , вантажопідйомність 800 кг, за результатами якого проведено перевірку вибраного електродвигуна на відповідність умовам нагрівання та еквівалентного моменту.

3. Здійснено вибір завадостійкої апаратури захисту та автоматизації, включаючи автоматичний вимикач Hager, теплове реле TeSys LRD22, а також абсолютний багатообертовий енкодер SICK AFM60 SSI, який забезпечує високоточну ідентифікацію координат кабіни в шахті без потреби у калібруванні системи після зникнення напруги.

4. Запропоновано математичну модель асинхронного двигуна на основі T-подібної схеми заміщення, що дозволило розрахувати точні значення активних і індуктивних опорів контурів та побудувати сімейства природних і штучних механічних та електромеханічних характеристик при частотному законі керування

5. Розроблено та перевірено в програмному комплексі Matlab Simulink імітаційну модель системи автоматичного керування з векторним методом у двох зонах регулювання. Результати моделювання перехідних процесів у режимах підйому та спуску підтвердили ідеальне відпрацювання S-подібних тахограм руху: час виходу на усталену швидкість 2,5 м/с становить 1,5 с, а максимальне лінійне прискорення не перевищує нормативні 2 м/с<sup>2</sup>, що повністю задовольняє критеріям безпеки та фізіологічного комфорту пасажирів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Норми безпеки до конструкції та експлуатації ліфтів ліфти для перевезення пасажирів та вантажів Ліфти пасажирські та вантажопасажирські (EN 81-20:2014, IDT) ДСТУ EN 81-20:2015
2. ДСТУ EN 81-20:2015 Норми безпеки до конструкції та експлуатації ліфтів. Ліфти для перевезення пасажирів та вантажів. Частина 20. Ліфти пасажирські та вантажопасажирські (EN 81-20:2014, IDT)
3. Ліфти : навч. посібник / О. В. Григоров [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – 172 с.
4. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.–К.: Аграрна освіта, 2013. –449 с
5. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
6. Шевченко І.С. , Морозов Д.І. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: Навч. посібник / Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с.
7. Pyrhönen J., Hrabovcová V., Scott R.S. Design of Rotating Electrical Machines: Second Edition/ J. Pyrhönen, V. Hrabovcová, R.S. Scott – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. – 612 p.
8. Пересада С.М., Ковбаса С.М., Димко С.С. Системи векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами: Монографія/ С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, С.С. Димко – Київ: Техніка, 2020. – 215 с.
9. Lorenz R.D., Novotny D.W. Controlled Speed AC Drive Systems: University Course Notes/ R.D. Lorenz, D.W. Novotny – Madison: University of Wisconsin, 2017. – 280 p.
10. Математичні методи та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О.П.Чорний, О.І. Толочко, В.К. Титюк. – Кременчук: ПП Щербатих О.В., 2016. – 300 с.

11. Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

12. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.