

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**  
**Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій**  
**Кафедра електричної інженерії**

**«До захисту допущено»**

Завідувач кафедри

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">(підпис)</div><div style="width: 40%; text-align: right;"><b>О. КОЛЛАРОВ</b><br/>(ініціали, прізвище)</div></div> |  | <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">«__»</div><div style="width: 40%; text-align: right;">2023 р.</div></div> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
МАГІСТРА**

на тему Моделювання автоматизованої електромеханічної системи ліфта із векторним керуванням

Виконав студент 2 курсу, групи ГЕМм-22  
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та та електромеханіка»  
(шифр і назва спеціальності підготовки)

|                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">Микита ПЄВНЄВ<br/>(ім'я та прізвище)</div><div style="width: 40%; text-align: right;">(підпис)</div></div> |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">Керівник <u>доц. каф. ЕлІн, к. т. н. Л. В. Сергієнко</u><br/>(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)</div><div style="width: 40%; text-align: right;">(підпис)</div></div> |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">Рецензент<br/>(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)</div><div style="width: 40%; text-align: right;">(підпис)</div></div> |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|

Нормоконтроль:

|                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">(підпис)</div><div style="width: 40%; text-align: right;"><b>Е. НЄМЦЕВ</b></div></div> |  | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.</div><div style="width: 40%; text-align: right;">Студент</div></div> <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-top: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;"></div><div style="width: 40%; text-align: right;">(підпис)</div></div> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;">(дата)</div><div style="width: 40%;"></div></div> |  | <hr style="border: none; border-top: 1px solid black; margin-bottom: 5px;"/> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"><div style="width: 40%;"></div><div style="width: 40%; text-align: right;">(дата)</div></div> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

ЛУЦЬК – 2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД**  
**«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

**Кафедра електричної інженерії**

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (О. КОЛЛАРОВ)

«    » \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Микиті ПЄВНЄВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Моделювання автоматизованої електромеханічної системи ліфта із векторним керуванням

керівник роботи \_\_\_\_\_ Ліана СЕРГІЄНКО, канд. техн. наук

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи 15 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Пасажирський ліфт вантажопідйомністю 630 кг, швидкість руху кабіни 2 м/с, висота поверху 3,2 м, число поверхів 15, будівля – офісний центр, асинхронний з короткозамкненим ротором, система керування – векторна на основі перетворювача частоти, напруга мережі 380 В

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

1. Аналіз галузі ліфтових підйомних установок

2. Розрахунок елементів електроприводу ліфта

3. Розробка векторної системи керування ліфта

4. Дослідження системи електроприводу на ЕОМ

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

Тринадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Ініціали, прізвище та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|               |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділи 1 – 4 | Л. СЕРГІЄНКО, доц. каф.                   |                |                  |
|               |                                           |                |                  |
|               |                                           |                |                  |
|               |                                           |                |                  |
| Нормоконтроль | Е. НЄМЦЕВ, ст. викл. каф.                 |                |                  |

7. Дата видачі завдання 02 жовтня 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів дипломної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1.    | Розділ 1                      | 02.10.23 – 15.10.23           |          |
| 2.    | Розділ 2                      | 16.10.23 – 29.10.23           |          |
| 3.    | Розділ 3                      | 30.10.23 – 25.11.23           |          |
| 4.    | Розділ 4                      | 26.11.23 – 15.12.23           |          |
| 5.    |                               |                               |          |
| 6.    |                               |                               |          |
| 7.    |                               |                               |          |
| 8.    |                               |                               |          |
| 9.    |                               |                               |          |

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Микита ПЄВНЄВ  
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ліана СЕРГІЄНКО  
(ім'я та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Микита ПЄВНЄВ. Моделювання автоматизованої електромеханічної системи ліфта із векторним керуванням / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Луцьк, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, переліку джерел посилання та додатку.

У першому розділі проведено аналіз ліфтової галузі, визначено загальні характеристики ліфтових установок, їх класифікацію, різновиди кінематичних схем, технічні особливості та структуру вузлів ліфтового механізму.

У другому розділі виконано розрахунок різних елементів електроприводу ліфта, таких як тягові канати, вага кабіни та противаги, редуктор і канатоведучий шків, сили опору руху, сили натягу канатів та вибір приводного двигуна та перетворювача частоти.

У третьому розділі розглянута розробка векторної системи керування ліфтом, включаючи аналіз різних систем керування, вивчення замкнутих систем частотного керування та систем частотно-струмового управління, вивчений принцип векторного керування, проведений синтез регуляторів струму, потоку та швидкості.

У четвертому розділі проведено дослідження системи електроприводу ліфта за допомогою імітаційного моделювання в середовищі Simulink.

Ключові слова: ліфт, електропривод, векторна система керування, асинхронний двигун, моделювання, вантажопідйомність, регулятор, перетворювач частоти, потокозчеплення

## ANNOTATION

M. PIEVNIEV, Modeling of an automated electromechanical elevator system with vector control / Graduation qualification work for obtaining the master's degree in specialty 141 " Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics ". SHEI DonNTU, Lutsk, 2023.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of reference sources and an appendix.

In the first chapter, an analysis of the elevator industry was carried out, the general characteristics of elevator installations, their classification, types of kinematic schemes, technical features and the structure of elevator mechanism nodes were determined.

In the second section, the calculation of various elements of the elevator electric drive, such as traction ropes, cabin weight and counterweights, reducer and rope guide pulley, movement resistance forces, rope tension forces, and the choice of drive motor and frequency converter is performed.

In the third chapter, the development of the vector control system of the elevator is considered, including the analysis of various control systems, the study of closed frequency control systems and frequency-current control systems, the principle of vector control is studied, and the synthesis of current, flow and speed regulators is carried out.

In the fourth chapter, the study of the elevator electric drive system was carried out using simulation modeling in the Simulink environment.

Key words: elevator, electric drive, vector control system, asynchronous motor, modeling, load capacity, regulator, frequency converter, flow coupling

## ЗМІСТ

|                                                                                     | стор. |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ВСТУП                                                                               | 8     |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІФТОВОЇ ГАЛУЗІ                                                    | 10    |
| 1.1 Загальні дані про ліфтові установки                                             | 10    |
| 1.2 Класифікація ліфтів                                                             | 11    |
| 1.3 Види кінематичних схем ліфтів                                                   | 14    |
| 1.4 Технічні особливості ліфтів                                                     | 17    |
| 1.5 Будова, компоновка та взаємодія вузлів ліфтового механізму                      | 18    |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛІФТА                                 | 21    |
| 2.1 Загальна характеристика механізмів підйому                                      | 21    |
| 2.2 Вимоги до будови та параметрів ліфтів                                           | 22    |
| 2.3 Розрахунок і вибір тягових канатів, ваги кабіни та противаги.                   | 24    |
| 2.4 Розрахунок і вибір редуктора і канатоведучого шківa                             | 28    |
| 2.5 Розрахунок сил опору руху кабіни та противаги                                   | 30    |
| 2.6 Розрахунок сили натягу тягових канатів кабіни та противаги                      | 32    |
| 2.7 Розрахунки співвідношення сили натягу канатів, навантажень канатоведучого шківa | 37    |
| 2.8 Вибір приводного двигуна та перетворювача частоти                               | 39    |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛІФТА                                | 43    |
| 3.1 Огляд систем керування електроприводами ліфтових установок                      | 43    |
| 3.1.1 Замкнуті системи частотного керування                                         | 43    |
| 3.1.2 Системи частотно-струмового управління.                                       | 49    |
| 3.2 Принцип векторного керування                                                    | 51    |
| 3.3 Синтез векторної системи керування                                              | 55    |
| 3.3.1 Синтез регуляторів струму                                                     | 58    |
| 3.3.2 Синтез регулятора потоку                                                      | 59    |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 3.3.3 Синтез регулятора швидкості                       | 60 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В SIMULINK | 64 |
| ВИСНОВКИ                                                | 67 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ                                | 68 |
| ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА            | 69 |

## ВСТУП

Впровадження передових технологій та розробка сучасного обладнання вимагають забезпечення електроприводів високою точністю, швидкістю, широким діапазоном регулювання, рівномірністю та узгодженістю в дії під час відтворення заданих траєкторій руху в замкнених електромеханічних системах (ЕМС). Зокрема, високі вимоги ставляться до систем електроприводів циклічної дії, таких як приводи підйомних машин, екскаваторів, промислових маніпуляторів та інших механізмів. Головним завданням таких ЕМС є переміщення робочого органу на визначену відстань за мінімальний час при врахуванні певних обмежень режимних показників.

Одним із підходів, що найкраще себе зарекомендував у керуванні електроприводами, є векторне керування асинхронними двигунами.

Векторне керування дозволяє оптимізувати роботу асинхронного приводу, що призводить до ефективнішого використання енергії. Це може призводити до зменшення споживання електроенергії і відповідно, зниження витрат на операцію ліфта.

Векторне керування дозволяє точно керувати напругою та частотою асинхронного двигуна, що сприяє покращенню точності та стабільності руху ліфта. Це може покращити комфорт пасажирів та зменшити час очікування ліфта.

Векторне керування дозволяє уникнути багатьох механічних втрат, оскільки може забезпечити більш точний та ефективний контроль над роботою двигуна. Це може покращити довговічність та надійність системи.

Покращений контроль над обертовим моментом: Векторне керування дозволяє регулювати обертовий момент асинхронного двигуна з високою точністю. Це важливо для забезпечення оптимальної швидкості та роботи ліфта в різних умовах навантаження.



Легше впровадження нових технологій: Векторне керування легше піддається інтеграції з сучасними технологіями, такими як системи автоматизації та управління з використанням сенсорів і мережевих з'єднань. Це дозволяє легше впроваджувати нові функції та покращення.

Загалом, векторне керування може забезпечити більш ефективну, точну та надійну роботу асинхронного приводу ліфта, що може призвести до покращення його продуктивності та забезпечення високого рівня обслуговування.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІФТОВОЇ ГАЛУЗІ

### 1.1 Загальні дані про ліфтові установки

У наш час спостерігається стійке зростання кількості ліфтів, що вимагає постійного пошуку нових конструктивних рішень, відповідних вимогам ринку та враховують технологічні досягнення у різних галузях промисловості. Методи та технічні засоби обслуговування ліфтів оптимізуються, з особливою увагою до підвищення ефективності та якості їх установки.

В умовах жорсткої конкуренції існує постійний тиск на пошук ефективніших технологій як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках. Широкий перелік вимог споживачів до ліфтового обладнання змушує до розробки новаторських рішень.

Основні напрямки розвитку сучасного ліфтобудування включають використання передових конструкційних та оброблювальних матеріалів, удосконалення будови кабін та обладнання з урахуванням, в тому числі, вандалостійкості, поліпшення конструкцій систем обладнання для зменшення шуму та вібрацій, розширення використання зовнішніх ліфтових установок на будівлях, підвищення надійності пристроїв, якими забезпечується безпечне користування ліфтами.

Також спостерігається удосконалення приводних систем, застосування гідравлічних ліфтів плунжерного типу та комплексний підхід до вирішення проблем внутрішнього транспорту, включаючи ліфти, мультикабінні підйомники, ескалатори та пасажирські конвеєри. До того ж важливою є практика модернізації існуючого ліфтового обладнання та застосування уніфікації та стандартизації для підвищення якості виробництва та зниження вартості масового виробництва та експлуатації.

Впровадження передових методів обробки інформації та управління, включаючи системи самодіагностики на основі мікропроцесора, поліпшення технології виробництва ліфтового обладнання шлях впровадження роботизації

виробничих процесів, а також покращення методів проектування ліфтів за допомогою сучасних автоматизованих систем, є важливими напрямками розвитку в цій галузі.

Ліфт – це стаціонарно встановлена споруда, яка працює в циклічному режимі та призначена для вертикального переміщення людей та/або вантажів у кабіні. Кабіна рухається вздовж жорстких прямих направляючих, кут нахилу яких до вертикальної лінії не перевищує 15 градусів. Ліфти є ключовою частиною інженерних систем житлових будинків, офісних будівель та інших споруд.

Ліфтові механізми широко використовуються у багатьох випадках: для транспортування пасажирів, автомобілів у багатоповерхових гаражах, вантажів у магазинах та торгових центрах, а також використовуються на судах річкового і морського флоту та на борту великих вантажних і пасажирських літаків.

У сучасних міських умовах ліфт стає одним з основних та все більш популярних засобів перевезення пасажирів, особливо з урахуванням постійного зростання кількості поверхів у сучасних будівлях. Завдання ефективного перевезення великої кількості людей різних вікових груп покладає високі вимоги до надійності та безпеки функціонування та експлуатації ліфтів.

Різноманітність типів ліфтів велика, так само вони мають різні призначення та конструкційні характеристики.

## 1.2 Класифікація ліфтів

Найчастіше зустрічається класифікація ліфтів за такими критеріями.

### **За призначенням:**

Пасажирські ліфти: призначені для перевезення пасажирів в будівлях. Зазвичай використовуються в житлових будинках, офісах, готелях та інших місцях.

Вантажні ліфти: призначені для підйому та перевезення вантажів, які можуть бути різної ваги та розміру. Використовуються на складах, виробничих підприємствах, торгових центрах тощо.

Вантажно-пасажирські ліфти: комбіновані ліфти, які призначені для перевезення як пасажирів, так і вантажів. Зазвичай використовуються в багатоповерхових будівлях, де потрібно одночасно обслуговувати обидва типи транспортних потреб.

Лікарняні ліфти: спеціалізовані ліфти, які призначені для використання в медичних установах, таких як лікарні і клініки. Ці ліфти враховують унікальні потреби медичного середовища та забезпечують безпечний та ефективний транспорт пацієнтів та медичного обладнання.

Спеціальні або нестандартні ліфти: розробляються та виготовляються для задоволення конкретних вимог або унікальних умов в конкретних об'єктах або галузях. Ці ліфти можуть мати особливі функції, розміри або технічні характеристики, що відрізняють їх від стандартних моделей. Деякі типи спеціальних ліфтів включають.

#### **За типом приводу:**

Електричні ліфти: використовують електричний двигун для генерації руху, широко використовуються в різних типах будівель, включаючи житлові будинки, офісні будівлі, готелі та торгові центри.

Гідравлічні ліфти: використовують гідравлічний циліндр, наповнений рідиною, для підняття та опускання кабіни ліфта. Коли рідина насичує циліндр, це приводить до підняття кабіни, часто використовуються в невеликих будівлях, де вимагається менше швидкості та менше вантажопідйомності.

#### **За конструкцією механізму передачі руху:**

Канатні ліфти: використовують систему тросів, які прикріплені до кабіни ліфта та проходять через маховики. Рух кабіни здійснюється за рахунок

намотування або розгортання тросів. Широко використовуються в різних типах будівель, включаючи висотні споруди, офісні будівлі, готелі та інші.

Ланцюгові ліфти: використовують систему ланцюгів або ланок для приведення в рух кабіни. Ланцюги пересуваються навколо шестерень або зубчастих механізмів для підняття та опускання, можуть використовуватися в будівлях, де кабіна повинна рухатися вздовж певного шляху, наприклад, нахилених або вигнутих будівлях.

Гвинтові ліфти: використовують гвинт або гвинтову систему для підняття та опускання кабіни ліфта. Гвинт вставлений у стійку, і рухаючись вгору чи вниз, гвинт забезпечує переміщення кабіни, можуть бути використані там, де потрібна невелика вантажопідйомність або специфічний тип руху.

#### **За способом передачі руху від приводу до канатів:**

Ліфти з канатоведучим шківом: трос або канат проходить через систему шківів або блоків. Кожен шків забезпечує направлення та підтримку тросу, щоб зменшити тертя та забезпечити ефективніший рух. Широко використовуються в різних типах ліфтів, включаючи пасажирські та вантажні ліфти, а також ліфти для інвалідів.

Ліфти з барабанною лебідкою: у цих ліфтах, трос або канат обмотаний навколо великого барабана або барабанів. Коли барабан обертається, трос розгортається або намотується, забезпечуючи підняття чи опускання кабіни ліфта. Часто використовуються в житлових та комерційних будівлях.

#### **За способом кріплення канатів до кабіни:**

- з верхнім підвісом кабіни.
- піджимні ліфти: канати розташовані під кабіною.

#### **За типом системи підвісу кабіни:**

- з прямою підвіскою.
- з поліспаотною підвіскою.
- з канатним мультиплікатором.

#### **За розташуванням машинного приміщення:**

- з верхнім машинним приміщенням.

- з нижнім машинним приміщенням.

**За типом приводу лебідки:**

- з редукторним приводом.
- з безредукторним приводом.

**За швидкістю підйому:**

- повільні: до 1 м/с.
- швидкі: від 1,4 до 2 м/с.
- високошвидкісні: 2 м/с і вище.

**За точністю зупинки:**

- без системи точної зупинки.
- з системою точної зупинки.

### 1.3 Види кінематичних схем ліфтів

Кінематична схема ліфта – це графічне представлення структури та рухових елементів ліфтової системи, яке вказує на взаємодію різних частин та компонентів ліфта під час його роботи. Кінематична схема надає інженерам та конструкторам можливість вивчення та аналізу рухових характеристик ліфта, визначення шляху руху кабіни, механізмів передачі руху та інших параметрів, які впливають на ефективність та безпеку ліфтової системи. Ця схема включає в себе елементи, такі як канати, блоки, барабани, шестерні, гвинти, ланцюги, а також різні компоненти системи управління.

На кінематичних схемах використовуються різні символи для зображення елементів ліфтових систем. Канатоведучий орган відображається у вигляді круга зі штриховкою посередині, відхиляючі блоки і контршківки зображуються як менший круг без штриховки, кабіна представлена великим прямокутником, а противага – вузьким прямокутником з горизонтальною штриховкою. Підйомні канати відображаються прямою лінією, незалежно від

їх кількості паралельних віток. Основні варіанти таких схем наведено на рисунку 1.1.

Схеми з барабанним канатоведучим органом (рис.1.1 а,б) призначені для коротких висот підйому, оскільки їхній максимальний рівень обмежений довжиною каната. Це особливо корисно для використання у вантажних ліфтах з невеликою висотою підйому або у випадках, коли майже виключена можливість розміщення противаги .[3]

Барабанний канатоведучий орган може використовуватися також в комбінації із противагою (рис.1.1 в,г), проте дана схема не має переваг при порівнянні з канатоведучим шківом. Не дивлячись на це, противага складає важливу частину більшості кінематичних схем з двома основними причинами: економія енергії через балансування вантажу та поліпшення динамічних характеристик системи; та забезпечення достатнього тиску для забезпечення зчеплення канатів із канатоведучим шківом.

Однією з важливих характеристик ліфта - місце розташування машинного відділення. Ліфти, де машинне відділення має верхнє розміщення, зазвичай, мають кращі техніко-економічні показники. Вони зменшують навантаження на будівлю і шахту, скорочують довжину канатів, збільшуючи їх довговічність, підвищують ефективність та знижують вартість ліфта.

Схему з прямою підвіскою кабіни і противаги (рис.1.1 в) вирізняє простота та ефективність для ліфтів, у яких місце машинного відділення розташоване зверху. Таким чином максимізується ефективність системи та продовжується термін служби канатів, звільняючи їх від додаткового навантаження, що створюють відхиляючі блоки.

У випадку великих розмірів кабіни, забезпечення вільного переміщення противаги може бути проблематичним. В таких випадках може бути передбачено встановлення відхиляючого блоку зі сторони противаги, як показано на рис.1.1 (г). Це дозволяє зменшити розмір і вагу канатоведучого шківа (КВШ), але може призвести до зменшення кута обгортання канату, що може вплинути на його тягову здатність.

Для вирішення цієї проблеми можна використовувати схему з контршківом, який забезпечує подвійний обхід КВШ, при цьому виконуючи функцію відхиляючого блоку (рис.1.1 д). Проте використання даної схеми може призвести до погіршення експлуатаційних характеристик канатів через додатковий вигин на контршківі.

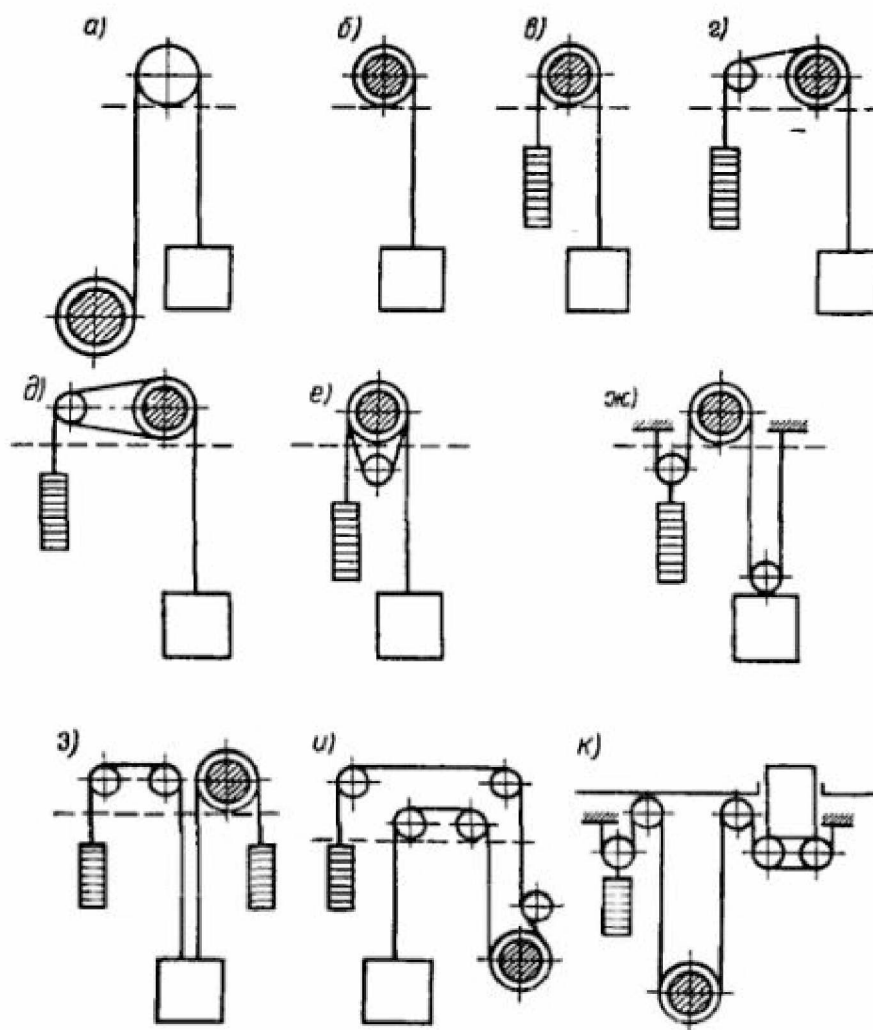


Рисунок 1.1 – Кінематичні схеми ліфтів

Альтернативою цій схемі є встановлення контршків під КВШ (рис. 1.1 е), що є ефективним при невеликих розмірах кабіни та підвищеній вантажопідйомності ліфта.[4]



Схема з поліспастом підвісу кабіни (рис. 1.1 ж) є корисною, коли необхідно використовувати одну і ту ж лебідку в ліфтах з різною вантажопідйомністю або для збільшення вантажопідйомності ліфта.

Схема з кабіною противагою (рис. 1.1 з) застосовується для зменшення кругового зусилля КВШ, запобігаючи проковзуванню канату.

Схеми з розташуванням машинного відділення знизу (рис. 1.1 а,и,к) мають кілька переваг, таких як полегшене обслуговування, зручність у ремонті обладнання та менший рівень шуму. Проте ці схеми не є широко поширеними через їхні слабкі місця, такі як:

1. Потреба в додатковому блочному приміщенні, яке розміщується вгорі, над шахтою ліфта;
2. Зменшення довговічності канатів та зростання їх кількості;
3. Підвищення навантаження на конструкцію будівлі;
4. Збільшення капітальних витрат.

#### 1.4 Технічні особливості ліфтів

До основних характеристик ліфта, які визначають його технічні параметри, відносяться вантажопідйомність, швидкість та прискорення кабіни. Вантажопідйомність ліфта визначається найбільшою вагою вантажу, який ліфт може підняти, не враховуючи ваги кабіни та пристроїв, що постійно знаходяться в ній.

Площа підлоги кабіни ліфта для індивідуального використання визначається залежно від його вантажопідйомності. У випадках, коли необхідно використовувати кабіни з більшою площею підлоги, дозволяється встановлення додаткової перегородки з дверима, що блокуються спеціальним ключем, контроль за яким забезпечується кінцевим вимикачем.

Технологічними нормами передбачаються різні стандартні розміри кабін на одне значення вантажопідйомності при проектуванні ліфта, оскільки

умови експлуатації можуть варіюватись, а ліфти можуть перевозити вантажі різної ваги та розмірів.

Ліфти з більшою площею підлоги кабіни повинні бути обладнані пристроями, які контролюють та сповіщають про перевантаження на рівні більше 10%.

Номінальна швидкість кабіни вибирається зі стандартного набору значень та представляє швидкість переміщення при нормальних умовах використання.

Максимальна швидкість кабіни обмежується технічними, економічними та фізіологічними межами. Швидкість кабіни більше 4 м/с може впливати на серцево-судинну систему та слуховий апарат людини через швидкі зміни барометричного тиску.

Зупиночна швидкість вказує на швидкість, при якій активується механізм, що забезпечує точну зупинку ліфта. Ревізійна швидкість передбачає огляд ліфтового обладнання у шахті при русі вниз.

Гранична швидкість – це швидкість, у випадку досягнення якої спрацьовує обмежувач швидкості. Розрахункова висота підйому визначається на основі архітектурного рішення будівлі та не може необмежено збільшуватись через вплив ліфтового обладнання на корисний об'єм будівлі.

Продуктивність ліфта, вимірювана кількістю пасажирів або вагою вантажу, є критично важливим параметром та залежить від різних факторів, включаючи вантажопідйомність, швидкість, висоту підйому та організацію міжповерхових перевезень.

### 1.5 Будова, компоновка та взаємодія вузлів ліфтового механізму

Основний механізм ліфта включає механізм підйому, що операційно працює за допомогою лебідки або гідроциліндра з канатною системою

передаючи рух кабіні. Пасажири або вантажі переміщуються в спеціально обладнаній кабіні з дверима, оснащеними блокувальними пристроями для забезпечення безпеки та уникнення руху кабіни при відчинених дверях.

Для уникнення зміщення кабіни або противаги набік та запобігти її коливанням під час руху, використовуються направляючі, які простягаються вздовж всієї висоти шахти ліфта. Ці направляючі також служать для зупинки кабіни або противаги за допомогою уловлювачів в разі перевищення швидкості під час аварії, утримують кабіну до її вивільнення з уловлювачів.

Простір, по якому рухається кабіна та противага, повністю обгороджений і відомий як шахта. На кожному поверсі із виходами в шахту встановлені автоматичні двері з блокувальними пристроями для забезпечення безпеки. Приміщення, де знаходиться підйомна лебідка та інше відповідне обладнання, називають машинним приміщенням.

У схемах, де машинне приміщення розташоване внизу, та в інших випадках, над шахтою у спеціальному приміщенні для блоків встановлюють відвідні блоки. Щоб уникнути неконтрольованого падіння кабіни або противаги, ліфт обладнаний автоматичною системою, яка активує уловлювачі у випадку, якщо відбувається перевищення встановленої швидкості. Вона активується з обмежувача швидкості. Уловлювачі розташовані по обидві сторони рами кабіни або противаги та активуються за допомогою каната, що обгортає шків обмежувача швидкості.

Обмежувач швидкості, який контролює максимальну швидкість кабіни, може бути встановлений в машинному чи блочному приміщенні, на кабіні чи противазі. Коли швидкість кабіни перевищує встановлені норми, обмежувач швидкості втручається, тобто викликає гальмування каната обмежувача швидкості та задіює уловлювачі.

Керівна станція, що відповідає за керування роботою ліфта, та інші пристрої та апарати, розташовуються в машинному приміщенні. Датчики сповільнення, точної зупинки та контрольні пристрої для шахтних дверей монтуються у шахті. Однак стандартна конструкція пасажирського ліфта не є

єдиною, і конструктивні рішення можуть значно відрізнятися в залежності, яке призначення ліфта, швидкість руху кабіни та тип приводу. В тому числі, для швидкісних ліфтів характерне застосування безредукторних приводів постійного струму та використання гідробуферів замість пружин. Також при високих швидкостях у кабіні передбачається примусова система вентиляції, вона налаштована на створення невеликого надлишкового тиску в салоні. Швидкісні ліфти мають власні особливості конструкції обмежувача швидкості та уловлювачів, і розміщення машинного приміщення також впливає на дизайн ліфта. Наприклад, коли машинне приміщення розташоване внизу, додаткове блочне приміщення передбачають у верхній частині шахти. Лікарняні ліфти відрізняються глибокими кабінами та приводами, що забезпечують високу точність зупинки та плавність руху кабіни.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛІФТА

### 2.1 Загальна характеристика механізмів підйому

Сучасні ліфти працюють на основі складної системи, яка включає в себе канати для переміщення кабіни чи противаги, а також приводний пристрій, який може бути у формі лебідки чи гідроциліндра з блоком на кінці.

Більшість ліфтових установок використовують неврівноважені підйомні механізми із канатними лебідками різних конструкцій. Для забезпечення безпеки пасажирів та вантажів вимагається дотримання строгих вимог щодо лебідок:

Лебідка повинна бути розрахована на навантаження, яке може виникнути в ході експлуатації, тестування чи аварійного режиму.

Електричні талі не можуть служити лебідками в ліфті.

Має існувати кінематичний зв'язок між канатоведучим органом і гальмом.

Лебідка повинна бути оснащена автоматичним колодковим гальмом.

Забороняється застосування стрічкових гальм.

У лебідках без редуктора, якщо у електроприводу не має системи утримання кабіни в нерухомості за допомогою моменту двигуна, має бути передбачені два гальма.

Допустимим є використання одного двоколодкового гальма, що включає дві незалежні системи гальмування.

Гальмівний момент, створений кожною колодкою, повинен забезпечувати утримання кабіни з урахуванням максимального вантажу.

Всі вільні частини обертових валів повинні бути захищені для запобігання випадковому контакту.

Лебідка ліфта повинна мати систему ручного керування для переміщення кабіни за допомогою постійно закріпленого на валу штурвала або знімного.

Лебідка повинна мати пристрій ручного відключення гальма, що автоматично повертається до режиму гальмування після зупинення ручного впливу.

У безредукторних лебідках для системи ручного керування має бути відведений спеціальний вимикач для контролювання процесу.

Штурвал лебідки повинен бути обладнаний вказівками щодо напрямку його обертання для підйому та опускання кабіни.

Сила, необхідна для обертання штурвала при підйомі кабіни з максимальним вантажем, не повинна перевищувати 235 Н. Якщо кабіна знімається з уловлювачів ручним приводом, то сила прикладання не має бути вище 640 Н.

Лебідка з КВШ повинна бути обладнана пристроєм, який би забезпечив достатнє зусилля для притискання канатів до обода, для підняття кабіни з вантажем без врахування розвантажуючої дії противаги. До того ж, конструкція лебідки повинна відповідати вимогам міцності та герметичності.

## 2.2 Вимоги до будови та параметрів ліфтів

Основні принципи, що керують проектуванням, виробництвом та експлуатацією ліфтового обладнання, полягають у гарантуванні безпеки та надійності. Ці принципи відображені у стандартах експлуатації ліфтів.

Додаткові вимоги до ліфтового обладнання включають в себе високу точність зупинки на рівні поверхів, плавність руху кабіни при прискоренні та гальмуванні, комфорт для пасажирів, загальний доступ, тиху роботу та відповідність допустимому рівню електромагнітних завад для систем зв'язку та телебачення.

Точність зупинки кабіни оцінюється через різницю рівнів підлоги кабіни та площадки поверху. Неправильне розташування кабіни може створити

небезпеку для пасажирів та ускладнити переміщення вантажів, передусім при використанні наземного транспорту або монорейкової системи.

Датчики точної зупинки кабіни встановлюються так, щоб різниця рівнів підлоги кабіни та площадки була однаковою при зупинці, незалежно від завантаження та напрямку руху. Згідно з рекомендаціями, точність зупинки повинна відповідати визначеним границям для різних типів ліфтів.

Комфорт пасажирів визначається сукупністю факторів: часом очікування ліфта, плавністю та точністю зупинки, рівнем шуму та вібрації в кабіні, якістю вентиляції й освітлення в салоні.

Універсальність використання ліфту передбачає просте та зрозуміле управління, що не вимагає особливих навичок від пасажирів різного віку.

Для забезпечення тихої роботи ліфта вживаються заходи для зменшення рівня шуму та запобігання його розповсюдженню через будівельні конструкції. Це включає встановлення амортизаторів для лебідки ліфта та інших вузлів обладнання, з високими вимогами щодо рівня шуму та вібрації.

Зниження електромагнітних завад забезпечується екрануванням джерел перешкод обладнання ліфта та встановленням високочастотних фільтрів у живлення ліфта.

Узагальнюючи, вимоги до електроприводу ліфтів включають в себе енергоефективність, широкий межі регулювання, надійність і довговічність, плавність зміни швидкості при розгоні та гальмуванні, точність зупинки кабіни, обмеження величини динамічних навантажень, тиху роботу та відсутність завад для радіочастот та телебачення.

### 2.3 Розрахунок і вибір тягових канатів, ваги кабіни та противаги.

За вихідними даними табл. 2.1 проведемо необхідні розрахунки.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

| Параметр           | Значення                         |
|--------------------|----------------------------------|
| Вантажопідйомність | $m = 630 \text{ кг}$             |
| Швидкість руху     | $v = 2 \text{ м / с}$            |
| Число поверхів     | $N_{\text{пов}} = 15$            |
| Висота поверху     | $h_{\text{пов}} = 3,2 \text{ м}$ |

Ліфт розташований в офісному центрі.

Висота підйому

$$H = N_{\text{пов}} \cdot h_{\text{пов}} = 15 \cdot 3,2 = 48 \text{ м}$$

Розміри кабіни:

$$A = 1,3 \text{ м}; B = 1,6 \text{ м}$$

Приблизна маса кабіни пасажирського ліфта розраховується за виразом:

$$m_{\text{каб}} = (500 \div 550) \cdot A \cdot B, \text{ кг}$$

де  $A, B$  – фізичні розміри кабіни (ширина та глибина).

$$m_{\text{каб}} = 550 \cdot 1,3 \cdot 1,6 = 1144 \text{ кг}$$

Вираз для розрахунку маси противаги:



$$m_n = m_{каб} + \varphi \cdot m, кг$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт урівноваження вантажу кабіни,  $\varphi = (0,4 \div 0,5)$ ;

$m$  – величина номінальної завантаженості кабіни, кг.

$$m_n = 1144 + 0,4 \cdot 630 = 1396 кг$$

Канати, що використовуються в ліфтах, здійснюють передачу руху від лебідки до кабіни та противаги. Їх функція полягає в забезпеченні максимальної ефективності, мінімізуючи втрати енергії через тертя. Для забезпечення безпеки пасажирів канати повинні відповідати високим стандартам надійності, міцності та довговічності, встановленим в ПУБЕЛ.

Щоб підтвердити якість встановлених канатів, їх виробляють відповідно до сертифікатів якості, які згідно державним стандартам. Те ж стосується і тягових ланцюгів. Коли кілька канатів працюють одночасно для підвісу кабіни чи противаги, у всіх мають бути однакові характеристики, такі як діаметр і будова. Ліфти вимагають відповідності тягових канатів, і будь-яке їх з'єднання з обмежувачами швидкості недопустиме.

Тягові канати в ліфтах повинні мати мінімальний діаметр 8 мм, а також відповідати мінімальній кількості паралельних гілок, зазначених у ПУБЕЛ. Зазвичай їх виробляють з дроту, що огортається навколо конопляного ядра, просоченого канатним мастилом. Стандартний сталевий канат формується з 6 ниток і ядра.

У ліфтових підйомних механізмах канати піддаються різним видам навантажень, включаючи вигинаючі, розтягуючі та зсувні, що вимагає оптимального контакту між окремими жилами каната. Канати типу ЛК мають найкращий лінійний контакт між дротами, і вони можуть відрізнитися позначеннями, серед них: ЛК-О, ЛК-Р або ТК, в залежності від їх конструкції. Окрім міцності канатів, вкрай важливо надійно з'єднати їх з іншими складовими ліфта для забезпечення безпеки й ефективності роботи.

Формула граничного статичного розривного зусилля для сталевих канатів:

$$P = S \cdot K$$

де  $P$  – розривне зусилля тягового каната, за ДСТУ або за результатами випробування каната на розрив, Н;

$K$  – коефіцієнт запасу, який приймається по табл. 2.2 в залежності від типу канатоведущого органу, призначення та швидкості ліфта;

$S$  – розрахункове значення статичного натягу однієї вітки каната, Н.

Таблиця 2.2 – Мінімальний коефіцієнт запасу міцності каната[1]

| Лебідка   | Тип ліфта                           |                                                                    | Швидкість,<br>м/с |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------|
|           | вантажний і<br>малий [ $k_{\min}$ ] | пасажирський,<br>вантажопасажирський. лікарняний<br>[ $k_{\min}$ ] |                   |
| Барабанна | 8                                   | 9                                                                  | $\leq 1$          |
| Фрикційна | 10                                  | 12                                                                 | $\geq 1$          |
| Фрикційна | 11                                  | 13                                                                 | 1...2             |
| Фрикційна | 12                                  | 14                                                                 | 2...4             |
| Фрикційна | 13                                  | 15                                                                 | $\geq 4$          |

Для визначення розрахункового натягу вітки канатної підвіски проведемо наступні розрахунки:

Для канатів підвіски кабіни:

$$S_{\text{каб}} = \frac{m + m_{\text{каб}} + m_{\text{тк}} + 0,5 \cdot m_{\text{нт}}}{n} \cdot g, \text{ Н}$$

Для канатів противаги кабіни:

$$S_n = \frac{m_n + m_{mk} + 0,5 \cdot m_{nn}}{n} \cdot g, H$$

де  $m$  – вантажопідйомність ліфта, кг;

$m_{каб}$  – маса кабіни, кг;

$m_n$  – маса протизаваги, кг;

$m_{mk}$  – маса тягових канатів від точки сходу з КВШ до точки підвіски, кг;

$m_{nn}$  – маса натяжного пристрою канатів, кг;

$n$  – число паралельних віток канатів.

Погонна маса тягового канату

$$q_{mk} = q_k \cdot n, \text{ кг / м}$$

Попередньо приймемо  $q_k = 0,5 \text{ кг / м}$

Маса тягових канатів

$$m_{mk} = q_{mk} \cdot n \cdot (H + 3) = 0,5 \cdot 4 \cdot (48 + 3) = 102 \text{ кг}$$

$$S_{каб} = \frac{630 + 1144 + 102 + 0,5 \cdot 250}{4} \cdot 9,81 = 4,907 \cdot 10^3 H$$

$$S_n = \frac{1396 + 102 + 0,5 \cdot 250}{4} \cdot 9,81 = 3,98 \cdot 10^3 H$$

$$P = S_{каб} \cdot K = 68,7 \text{ кН}$$

Приймаємо канат із групи І568 з параметрами:

Діаметр

$$d = 12 \text{ мм}$$

Погонна маса канату

$$q_{mk.\phi} = 0,53 \text{ кг / м}$$

Розривне зусилля канату

$$P = 72000 \text{ кН}$$

$$m_{mk.\phi} = k \cdot q_{mk.\phi} \cdot (H + 3) = 4 \cdot 0,53 \cdot (48 + 3) = 108,12 \text{ кг}$$

$$K_{\phi} = \frac{P \cdot k}{(m + m_k + m_{mk.\phi}) \cdot g} = \frac{72000 \cdot 4}{(630 + 1144 + 108,12) \cdot 9,81} = 15,6$$

Правильному вибору канату має відповідати умова

$$K_{\phi} \geq K$$

$$15,6 > 14$$

Перевірка за умовою міцності виконується, тому канат обрано вірно.

## 2.4 Розрахунок і вибір редуктора і канатоведучого шківів

Передавальне число редуктора визначається з урахуванням кінематичної схеми ліфта за виразом:

$$i_p = \frac{\pi \cdot D \cdot n_n}{v \cdot 60}$$

де  $D$  – розрахунковий діаметр КВШ, м;

$n_n$  – частота обертання валу двигуна в номінальному режимі, об/хв;

$v$  – лінійна швидкість кабіни, м/с.

$$i_p = \frac{3,14 \cdot 0,65 \cdot 1450}{2 \cdot 60} = 24,68$$

Вибираємо редуктор РГЛ-160-25 з передатним числом 25. Вигляд редуктора зображений на рис. 2.1

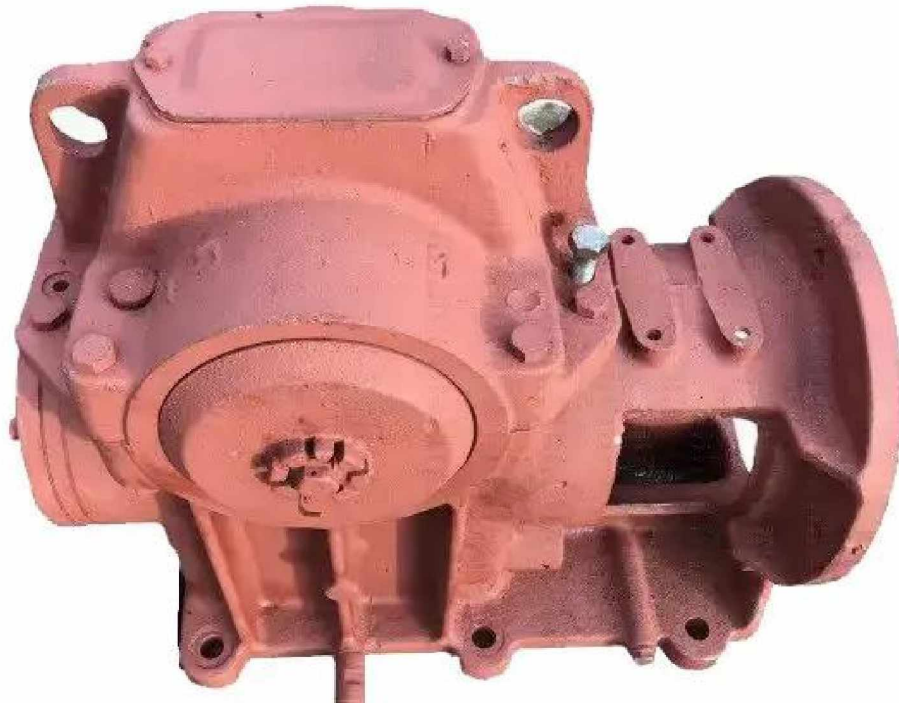


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд ліфтового редуктора РГЛ-160-25

За результатами вибору редуктора лебідки проведемо уточнення діаметра барабана (КВШ) за кінематичною умовою, що гарантує забезпечення номінальної швидкості руху кабіни з допустимою похибкою в межах 15%.

$$D = \frac{60 \cdot v \cdot i_p}{\pi \cdot n_n} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 25}{3,14 \cdot 1450} = 0,659 \text{ м}$$

Залишаємо діаметр шківів 0,65 м, оскільки отримане значення перебуває у допустимих межах.

## 2.5 Розрахунок сил опору руху кабіни та противаги

Проведемо розрахунок з опору руху детальніше, врахувавши розрахункові схеми, наведені на рис.2.2.

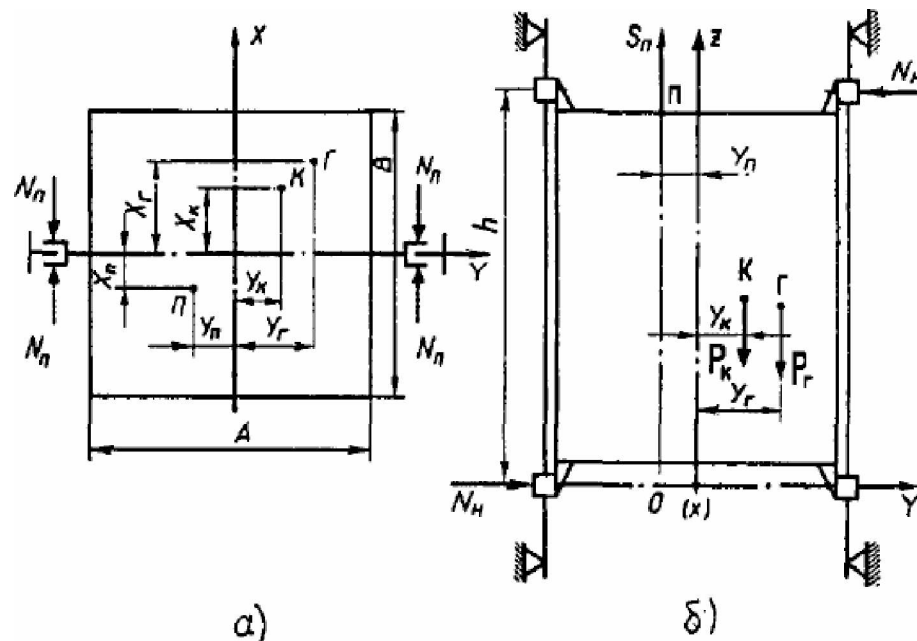


Рисунок 2.2 – Схеми для визначення сил опорних реакцій башмаків кабіни (а – горизонтальна проєкція кабіни, б – вертикальна проєкція кабіни)

$X_n, Y_n$  – значення координат зміщення точки підвісу кабіни орієнтовно  $(0,03 \div 0,1)$  м;  $X_{kab}, Y_{kab}$  – величини повздовжнього та поперечного зміщень центра мас кабіни, залежить від будови дверей кабіни орієнтовно  $(0,02 \div 0,1)$  м;  $X_e = B / 6$ ;  $Y_e = A / 6$  – розраховуються припускаючи, що вантаж рівномірно розподілений по кабіні.

Відстань між башмаками по вертикалі:

$$h_{\sigma} = h_{\kappa} + 0,25 = 2,2 + 0,25 = 2,45 \text{ м}$$

де  $h_{\kappa}$  – висота кабіни;

Нормальні тиски (кабіна без вантажу)

$$N_{нкаб} = \frac{m_{каб} (Y_{каб} + Y_n)}{h_{\sigma}} g = \frac{1144 \cdot (0,05 + 0,06)}{2,45} \cdot 9,81 = 503,9 \text{ Н}$$

$$N_{нкаб} = \frac{m_{каб} (X_{каб} + X_n)}{2h_{\sigma}} g = \frac{1144 \cdot (0,05 + 0,06)}{2 \cdot 2,45} \cdot 9,81 = 251,9 \text{ Н}$$

Значення нормальних тисків для вантажу не враховуючи масу кабіни:

$$N_{нв} = \frac{m \cdot (Y_{\epsilon} + Y_n)}{h_{\sigma}} g = \frac{630 \cdot (0,217 + 0,06)}{2,45} \cdot 9,81 = 697,9 \text{ Н}$$

$$N_{нв} = \frac{m \cdot (X_{\epsilon} + X_n)}{2h_{\sigma}} g = \frac{630 \cdot (0,267 + 0,06)}{2 \cdot 2,45} \cdot 9,81 = 412 \text{ Н}$$

Величина сили опору руху кабіни напрямними при башмаках ковзання:

$$\begin{aligned} F_{каб} &= (2 \cdot N_{нкаб} + 4 \cdot N_{нкаб}) \cdot \omega + 0,0015 \cdot m_{каб} \cdot g = \\ &= (2 \cdot 503,9 + 4 \cdot 251,9) \cdot 0,12 + 0,0015 \cdot 1144 \cdot 9,81 = 258,7 \text{ Н} \end{aligned}$$

де  $\omega = 0,12$  – коефіцієнт спротиву руху башмаків ковзання.

Величина сили опору руху вантажу при башмаках ковзання:

$$F_{\epsilon} = (2 \cdot N_{нв} + 4N_{нв}) \cdot \omega = (2 \cdot 697,9 + 4 \cdot 412) \cdot 0,12 = 365,3 \text{ Н}$$

Величина сили опору руху проти ваги при башмаках ковзання:

$$F_n = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot m_n \cdot g = 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1396 \cdot 9,81 = 102,7 \text{ Н}$$

## 2.6 Розрахунок сили натягу тягових канатів кабіни та проти ваги

Режими 5, 6 характеризуються рухом кабіни завантаженої на 110% від номінального значення. Останній відповідає режиму статичним випробуванням ліфта. Згідно вимог ПУБЕЛ статичні випробування тривають впродовж 10 хвилин, кабіна в цей час знаходиться в нижньому положенні.

Для пасажирських ліфтів на прямій підвісці приймаються випробування з навантаженням на рівні  $1.5Q$ . Для інших із вантажем на рівні  $2Q$ . [4]

Вирази для визначення сили натягу канатів записуються з міркувань режимів роботи ліфта і залежать від кінематичної схеми ліфта. Для випадку, що розглядається в цій роботі, кабіна та проти вага на безпосередньому підвісі.

1. Кабіна внизу завантажена номінальним вантажем, підйом.

— сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 1} = (m + m_{\kappa}) \cdot g + F_{\kappa} + F_{\epsilon} + m_{mk} \cdot g$$

$$S_{\kappa 1} = (630 + 1144) \cdot 9,81 + 258,7 + 365,3 + 102 \cdot 9,81 = 19,03 \text{ кН}$$

— сила натягу канатів проти ваги

$$S_{n1} = (m_n + m_y) \cdot g - F_n$$

$$S_{n1} = (1396 + 70,7) \cdot 9,81 - 102,7 = 14,3 \text{ кН}$$



2. Кабіна зверху завантажена номінальним вантажем, підйом.

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 2} = \left( (m + m_{\kappa} + m_{n\kappa} + m_y) \cdot g + F_{\kappa} + F_{\epsilon} \right)$$

$$S_{\kappa 2} = (630 + 1144 + 15.3 + 70.7) \cdot 9,81 + 258.7 + 365.3 = 18.87 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів противаги

$$S_{n2} = m_n \cdot g - F_n + m_{m\kappa} \cdot g$$

$$S_{n2} = 1396 \cdot 9,81 - 102.7 + 102 \cdot 9,81 = 14.59 \text{ кН}$$

3. Ненавантажена кабіна внизу, підйом

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 3} = m_{\kappa} \cdot g - F_{\kappa} + m_{m\kappa} g$$

$$S_{\kappa 3} = 1144 \cdot 9.81 - 258.7 + 102 \cdot 9.81 = 11.96 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів противаги

$$S_{n3} = (m_n + m_y) \cdot g + F_n$$

$$S_{n3} = (1396 + 70.7) \cdot 9,81 + 102.7 = 14.49 \text{ кН}$$

4. Ненавантажена кабіна вверху, спуск

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 4} = (m_{\kappa} + m_{mk} + m_y) \cdot g - F_{\kappa}$$

$$S_{\kappa 4} = (1144 + 15.3 + 70.7) \cdot 9,81 - 258.7 = 11.81 \text{ кН}$$

— сила натягу канатів противаги

$$S_{n4} = (m_n \cdot g + F_n) + m_{mk} \cdot g$$

$$S_{n4} = 1396 \cdot 9.81 + 102.7 + 102 \cdot 9.81 = 14.8 \text{ кН}$$

5. Завантажена на 110% від номіналу кабіна вниз, режим підйому. Динамічні випробування.

— сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 5} = S_{\kappa 1} + 0,1 \cdot m \cdot g$$

$$S_{\kappa 5} = 19030 + 0.1 \cdot 630 \cdot 9,81 = 19.65 \text{ кН}$$

— сила натягу канатів противаги

$$S_{n5} = S_{n1} = 14.29 \text{ кН}$$

6. Завантажена на 110% від номіналу кабіна вверху, режим спуску. Динамічні випробування.

— сила натягу канатів кабіни

$$S_{\kappa 6} = S_{\kappa 2} + 0,1 \cdot m \cdot g$$

$$S_{\kappa 6} = 18870 + 0.1 \cdot 630 \cdot 9.81 = 19.49 \text{ кН}$$

— сила натягу канатів противаги

$$S_{n6} = S_{n2} = 14.59 \text{ кН}$$

7. Завантажена номінальним вантажем кабіна вниз, спуск.

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{к7} = \left( (m + m_{к}) \cdot g - F_{к} - F_{е} \right) + m_{мк} \cdot g$$

$$S_{к7} = (630 + 1144) \cdot 9.81 - 258.7 - 365.3 + 102 \cdot 9.81 = 17.78 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів противаги

$$S_{n7} = S_{n3} = 14.49 \text{ кН}$$

8. Завантажена номінальним вантажем кабіна вгору, спуск.

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{к8} = \left( (m + m_{к} + m_{мк} + m_{у}) \cdot g - F_{к} - F_{е} \right)$$

$$S_{к8} = (630 + 1144 + 15.3 + 70.7) \cdot 9.81 - 258.7 - 365.3 = 17.62 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів противаги

$$S_{n8} = S_{n4} = 14,8 \text{ кН}$$

9. Ненавантажена кабіна вниз, підйом

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{к9} = m_{к} \cdot g + F_{к} + m_{мк} \cdot g$$

$$S_{к9} = 1144 \cdot 9.81 + 258.7 + 102 \cdot 9.81 = 12.48 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів протизваги

$$S_{n9} = S_{n1} = 14.29 \text{ кН}$$

#### 10. Ненавантажена кабіна вверху, спуск

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{к10} = (m_{к} + m_{нк} + m_{y}) \cdot g$$

$$S_{к10} = (1396 + 15.3 + 70.7) \cdot 9.81 = 12,07 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів протизваги

$$S_{n10} = S_{n2} = 14,59 \text{ кН}$$

#### 11. Статичне випробування ліфта, кабіна перевантажена на 100% внизу.

– сила натягу канатів кабіни

$$S_{к11} = (2m + m_{к}) \cdot g + m_{нк} \cdot g$$

$$S_{к11} = (2 \cdot 630 + 1144) \cdot 9.81 + 102 \cdot 9.81 = 24.58 \text{ кН}$$

– сила натягу канатів протизваги

$$S_{n11} = m_n \cdot g$$

$$S_{n11} = 1396 \cdot 9.81 = 13.69 \text{ кН}$$

## 2.7 Розрахунки співвідношення сили натягу канатів, навантажень канатоведучого шківа

Співвідношення сил натягу канатів визначається для всіх режимів розглянутих в пункті 2.6 за виразом:

$$\psi_i = \frac{S_{i\max}}{S_{i\min}}$$

де  $S_{i\max}$  та  $S_{i\min}$  – найбільше та найменше сили натягу канатів підвіски кабіни у відповідному режимі.

$$\psi_1 = \frac{S_{1\max}}{S_{1\min}} = \frac{19.03}{14.29} = 1.332$$

$$\psi_2 = \frac{S_{2\max}}{S_{2\min}} = \frac{18.87}{14.59} = 1.293$$

$$\psi_3 = \frac{S_{3\max}}{S_{3\min}} = \frac{14.49}{11.96} = 1.211$$

$$\psi_4 = \frac{S_{4\max}}{S_{4\min}} = \frac{14.8}{11.81} = 1.253$$

$$\psi_5 = \frac{S_{5\max}}{S_{5\min}} = \frac{19.65}{14.29} = 1.375$$

$$\psi_6 = \frac{S_{6\max}}{S_{6\min}} = \frac{19.49}{14.59} = 1.335$$

$$\psi_7 = \frac{S_{7\max}}{S_{7\min}} = \frac{17.78}{14.49} = 1.227$$

$$\psi_8 = \frac{S_{8\max}}{S_{8\min}} = \frac{17.62}{14.8} = 1.191$$

$$\psi_9 = \frac{S_{9\max}}{S_{9\min}} = \frac{14.29}{12.48} = 1.145$$

$$\psi_{10} = \frac{S_{10\max}}{S_{10\min}} = \frac{14.59}{12.07} = 1.209$$

$$\psi_{11} = \frac{S_{11\max}}{S_{11\min}} = \frac{24.58}{13.69} = 1.795$$

Консольне навантаження КВШ аналогічно визначається для кожного режиму за виразом:

$$P_{Ki} = S_{Ki} + S_{Pi}$$

де  $i$  – номер режиму.

$$P_{K1} = S_{K1} + S_{P1} = 19.03 + 14.29 = 33.31 \text{ кН}$$

$$P_{K2} = S_{K2} + S_{P2} = 18.87 + 14.59 = 33.46 \text{ кН}$$

$$P_{K3} = S_{K3} + S_{P3} = 14.49 + 11.96 = 26.46 \text{ кН}$$

$$P_{K4} = S_{K4} + S_{P4} = 11.81 + 14.8 = 26.61 \text{ кН}$$

$$P_{K5} = S_{K5} + S_{P5} = 19.65 + 14.29 = 33.93 \text{ кН}$$

$$P_{K6} = S_{K6} + S_{P6} = 19.49 + 14.59 = 34.08 \text{ кН}$$

$$P_{K7} = S_{K7} + S_{P7} = 17.78 + 14.49 = 32.3 \text{ кН}$$

$$P_{K8} = S_{K8} + S_{P8} = 17.62 + 14.8 = 32.42 \text{ кН}$$

$$P_{K9} = S_{K9} + S_{P9} = 12.48 + 14.29 = 26.77 \text{ кН}$$

$$P_{K10} = S_{K10} + S_{P10} = 12.07 + 14.59 = 26.66 \text{ кН}$$

$$P_{K11} = S_{K11} + S_{P11} = 24.58 + 13.69 = 38.28 \text{ кН}$$

Розраховуємо окружного навантаження КВШ. Режим підйому невірноваженого вантажу:

$$P_1 = S_{1\max} - S_{1\min} + 0.02 \cdot S_{1\max} = 19.03 - 14.29 + 0.02 \cdot 19.03 = 5.12 \text{ кН}$$

$$P_2 = S_{2\max} - S_{2\min} + 0.02 \cdot S_{2\max} = 18.87 - 14.59 + 0.02 \cdot 18.87 = 4.7 \text{ кН}$$

$$P_3 = S_{3\max} - S_{3\min} + 0.02 \cdot S_{3\max} = 14.49 - 11.96 + 0.02 \cdot 14.49 = 2.82 \text{ кВ}$$

$$P_4 = S_{4\max} - S_{4\min} + 0.02 \cdot S_{4\max} = 14.8 - 11.81 + 0.02 \cdot 14.8 = 32.87 \text{ кВ}$$

$$P_5 = S_{5\max} - S_{5\min} + 0.02 \cdot S_{5\max} = 19.65 - 14.29 + 0.02 \cdot 19.65 = 5.75 \text{ кВ}$$

$$P_6 = S_{6\max} - S_{6\min} + 0.02 \cdot S_{6\max} = 19.49 - 14.59 + 0.02 \cdot 19.49 = 5.286 \text{ кВ}$$

$$P_7 = S_{7\max} - S_{7\min} + 0.02 \cdot S_{7\max} = 17.78 - 14.49 + 0.02 \cdot 17.78 = 3.64 \text{ кВ}$$

$$P_8 = S_{8\max} - S_{8\min} + 0.02 \cdot S_{8\max} = 17.62 - 14.8 + 0.02 \cdot 17.62 = 31.77 \text{ кВ}$$

$$P_9 = S_{9\max} - S_{9\min} + 0.02 \cdot S_{9\max} = 12.94 - 10.34 + 0.02 \cdot 12.94 = 2.87 \text{ кВ}$$

$$P_{10} = S_{10\max} - S_{10\min} + 0.02 \cdot S_{10\max} = 14.59 - 12.07 + 0.02 \cdot 14.59 = 2.82 \text{ кВ}$$

$$P_{11} = S_{11\max} - S_{11\min} + 0.02 \cdot S_{11\max} = 24.58 - 13.69 + 0.02 \cdot 24.58 = 11.38 \text{ кВ}$$

## 2.8 Вибір приводного двигуна та перетворювача частоти

Необхідна потужність приводного двигуна лебідки:

$$N_{\partial} = \frac{P_{\max} \cdot V}{\eta_{\text{леб}}} = \frac{5.12 \cdot 10^3 \cdot 2}{0.7} = 14,64 \text{ кВт}$$

де  $P_{\max}$  – максимальне окружне навантаження КВШ (режими з 1 по 4)

Врахуємо динамічні навантажень коефіцієнтом запасу, тоді:

$$P_{\partial\partial} = K_z \cdot N_{\partial} = 1.2 \cdot 14,64 = 17,6 \text{ кВт}$$

Обираємо двигун 4A160M4У3 потужністю 18,5 кВт, номінальною частотою обертання 1467 об/хв. Параметри обраного двигуна занесені в

таблицю 2.3. Загальний вигляд асинхронного двигуна представлений на рисунку 2.3



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд двигуна 4A160M4U3

Таблиця 2.3 – Паспортні дані асинхронного двигуна серії 4A160M4U3

|                                      |                                    |                                    |
|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Позначення                           | Номінальна потужність              | 18,5 кВт                           |
| $U_n$                                | Номінальна напруга                 | $U_n = 380 \text{ В}$              |
| $p_n$                                | Число пар полюсів                  | 2                                  |
| $J_{\text{ов}}$                      | Момент інерції                     | $0,13 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ |
| $\eta_n$                             | ККД                                | 89,5%                              |
| $\cos \varphi$                       | Коефіцієнт потужності              | 0,88                               |
| $\lambda_k$                          | Перевантажувальна здатність        | 2,3                                |
| $s_n$                                | Номінальне ковзання                | 0.022                              |
| $s_k$                                | Критичне ковзання                  | 0.16                               |
| $f$                                  | Номінальна частота напруги         | 50 Гц                              |
| Параметри Г-подібної схеми заміщення |                                    |                                    |
| $X_\mu$                              | Взаємна індуктивність              | 4.3                                |
| $R_1'$                               | Активний опір статора              | 0.042                              |
| $X_1'$                               | Індуктивний опір розсіяння статора | 0.085                              |
| $R_2''$                              | Активний опір ротора               | 0.024                              |



|         |                                     |      |
|---------|-------------------------------------|------|
| $X_2''$ | Індуктивний опір розсіювання ротора | 0.13 |
|---------|-------------------------------------|------|

Вибираючи перетворювач частоти, необхідно врахувати електричний струм, який споживається двигуном, оскільки потужність двигуна залежить від максимального струму. Знаємо, що двигун працює в важких умовах, а на прискорення відводиться короткий проміжок часу, можуть траплятися ситуації зі значними перевантаженнями. Струм, в таких умовах, може перевищити номінальне значення. Важливо також, щоб перетворювач частоти мав підтримку реалізації векторного управління, бо воно є незамінним при необхідності роботи системи з високою реакцією на зміни навантаження.

Беручи за основу результати проведеного раніше розрахунку, обираємо перетворювач частоти виробника Danfoss модель VLT Automation Drive FC-302 22 кВт рис. 2.4 з паспортними даними, представленими в таблиці 2.4.

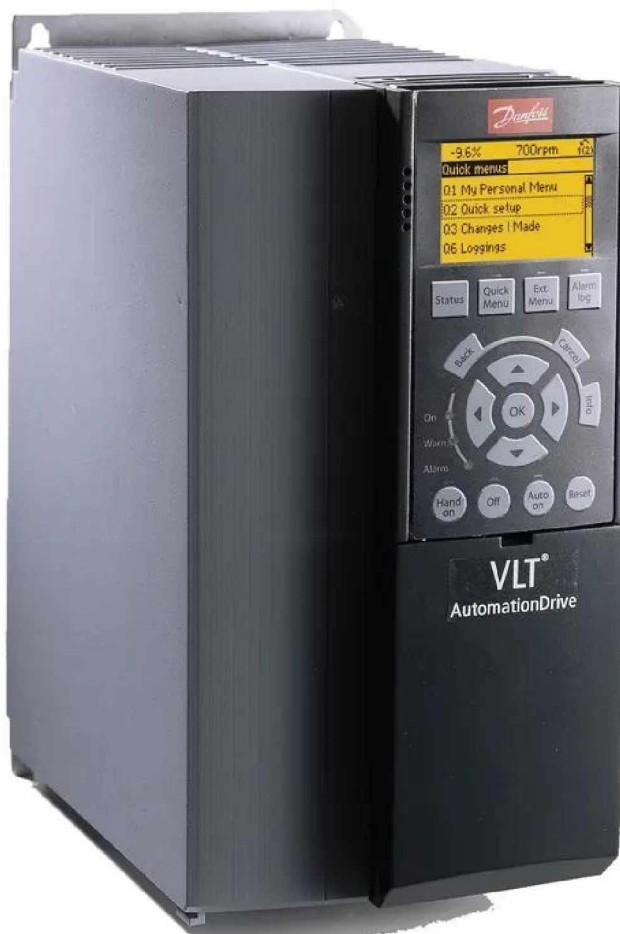


Рисунок 2.4 – Вигляд перетворювача частоти Danfoss VLT Automation

## Drive FC-302 22 кВт

Таблиця 2.4 – Паспортні дані перетворювача частоти Danfoss VLT

Automation Drive FC-302 22 кВт

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Номінальний струм  | 44 А      |
| Потужність         | 22 кВт    |
| Захист             | IP20      |
| Вхідна фазність    | 3-ф/380 В |
| Вихідна фазність   | 3-ф/380 В |
| Вихідна частота    | 400 Гц    |
| ККД перетворювача  | 98%       |
| Робоча температура | 0–50°     |
| Гарантія           | 12 міс.   |

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛІФТА

### 3.1 Огляд систем керування електроприводами ліфтових установок

#### 3.1.1 Замкнуті системи частотного керування

Для отримання бажаних статичних і динамічних властивостей частотно-регульованого асинхронного електроприводу використовують лише замкнуті системи регулювання його координат. В структуру узагальненої функціональної схеми подібної системи (рисунок 3.1) окрім асинхронного двигуна (АД) і керованого перетворювача частоти входять регулятори Р і датчики Д змінних електроприводу. На вході регуляторів керуючими сигналами  $U_y$  можуть виступати сигнали завдання будь-яких координат електроприводу – швидкості, струму статора, кута повороту ротора АД, магнітного потоку і т. д. Як збурюючі впливи на електропривод виступають моменти сил опору  $M_c$  на валу двигуна або коливання напруги живильної мережі  $U_c$ . [7]

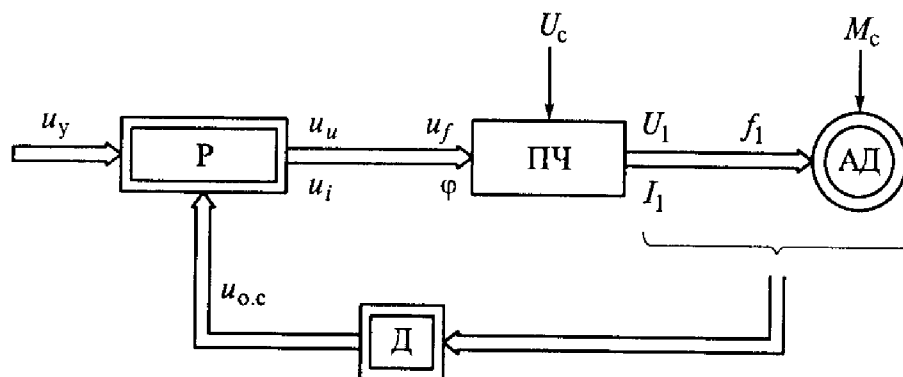


Рисунок 3.1 – Функціональна схема замкненої системи зі скалярними керуванням ПЧ-АД

Сигнали на вході датчиків є змінними двигуна, які можна безпосередньо виміряти (напруга, струм і частота статора, швидкість ротора, магнітний потік у повітряному зазорі двигуна) або визначені шляхом розрахунку за допомогою

математичної моделі асинхронного двигуна (електрорушійна сила (ЕРС), потокозчеплення статора, ротора і т. п.). Сигнали на виході регуляторів, які залежать від керуючих впливів, сигналів зворотних зв'язків  $U_{o.ш.}$  та прийнятих алгоритмів регулювання, виступають сигналами управління вихідним напругою  $U_U$ , струмом  $I_I$  та частотою  $U_f$  перетворювача частоти.

Варіант функціональної схеми системи частотного керування асинхронного двигуна зі зворотним зв'язком по струму статора зображений на рисунку 3.2. Тут сигнали з датчиків струму ДС<sub>А</sub> і ДС<sub>С</sub>, пропорційні миттєвим значенням струмів фаз А і С обмоток статора, надходять в функціональний перетворювач струму ФП, тут формуються вихідні сигнали  $I_I$  та  $I_{IA}$ , пропорційні відповідно до поточного значенням струму статора й активної складової цього струму. У суматорах  $\Sigma 1$  і  $\Sigma 2$  об'єднуються сигнали керування та зворотних зв'язків, що приходять із функціональних пристроїв А1, А2 і А3. Пристрій А4 здійснює передачу сигналу  $I_1$ , на вхід А3 тільки у випадку перевищення на суматорі сигналу  $\Sigma 3$ , пропорційного поточному значенню максимально допустимого струму статора двигуна.

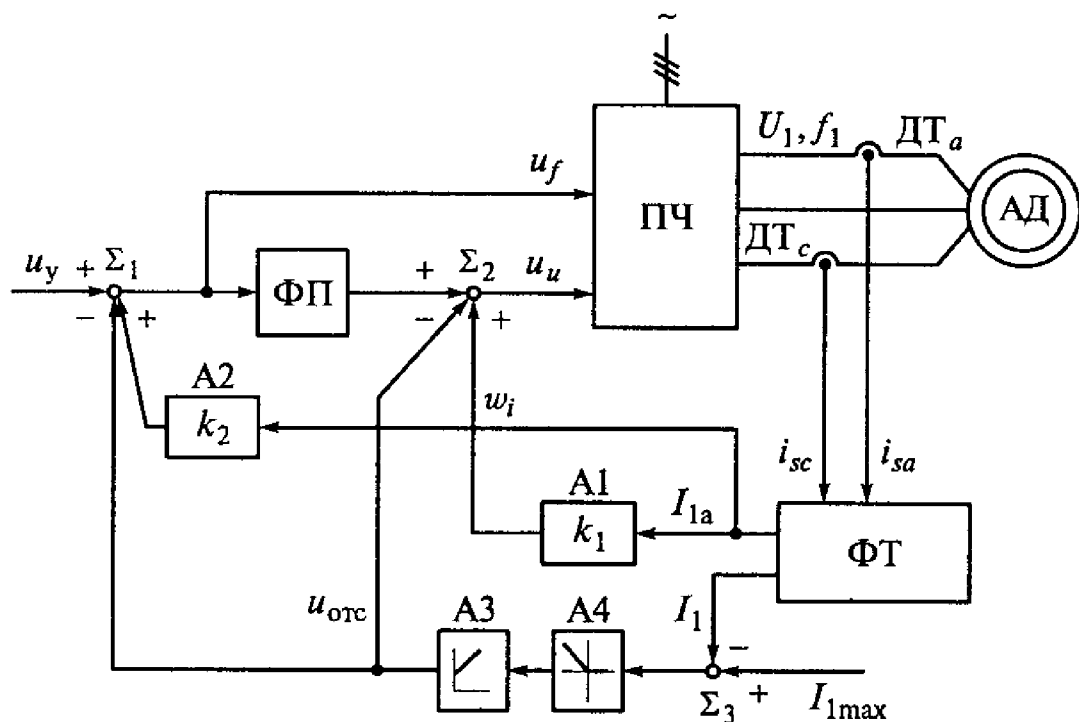


Рисунок 3.2 – Функціональна схема скалярної системи підпорядкованого керування системи ПЧ-АД зі зворотнім зв'язком по струму статора

Доцільно розглянути призначення кожного з контурів зворотних зв'язків і їх вплив на властивість електроприводу окремо. Так, при дії тільки позитивного зворотного зв'язку по струму від  $A_1$  зі збільшенням моменту статичного навантаження АД та відповідного збільшення струму статора на вході суматора  $\Sigma_2$  з'являється додатковий сигнал  $U_b$ , що зумовлює збільшення сигналу  $U_U$ . У результаті зі збільшенням струму статора збільшується також вихідна напруга ПЧ. У той же час його вихідна частота, зумовлена дією сигналу  $U_f$ , залишається постійною. Зростання напруги на обмотках статора АД веде до компенсації падіння напруги на їх повному опорі і, як результат, зростанню потоку намагнічування АД.

Ступінь компенсації визначається коефіцієнтом підсилення  $k_I$ , кола позитивного зворотного зв'язку по струму. Явно, чим більше  $k_I$  тим більшим буде потік при тому ж значенні абсолютного ковзання. Границя збільшення  $k_I$  визначається умовами стійкості замкненої системи керування та допустимими значеннями потоку намагнічування та напруги живлення АД.

Зі зниженням частоти живлення повний опір кола намагнічування і, як наслідок, падіння напруги в статорі АД знижуються. В такому випадку для стабілізації та обмеження потоку намагнічування в замкненій по повному струму системі ступінь компенсації падіння напруги – коефіцієнт  $k_I$  – треба зменшувати зі зниженням частоти вихідної напруги ПЧ.

Схожий недолік відсутній при використанні зворотного зв'язку з активною складовою струму статора. Приймавши в якості сигналу зворотного зв'язку активну складову струму статора, постійність потокозчеплення статора буде зберігатися при тому ж коефіцієнті  $k_I$ .

При частотному керуванні АД з подібним зворотним зв'язком по струму можна реалізувати механічні характеристики електропривода з підвищеною перевантажувальною здатністю по моменту та жорсткістю, близькою до природної лише у вузькому діапазоні регулювання швидкості.

Вплив позитивного зворотного зв'язку по струму з боку пристрою  $A_2$  пов'язаний з одночасним впливом на вихідну частоту та напругу ПЧ. За рахунок одночасного їх зростання при збільшенні навантаження на валу АД відповідно підвищується швидкість ідеального холостого ходу АД, тим самим забезпечуючи стабілізацію його швидкості, та збереження сталості перевантажувальної здатності АД за моментом. Зростання коефіцієнта підсилення  $k_2$  пристрою  $A_2$ , що веде до підвищення жорсткості механічної характеристики АД, обмежене умовами стійкості замкненої системи керування та допустимими значеннями частоти і напруги живлення двигуна.

Сукупність позитивних зворотних зв'язків по струму статора із використанням пристроїв  $A_1$  та  $A_2$  за рахунок стабілізації швидкості останніми сприяє у помітному підвищенні жорсткості механічних характеристик АД і при сталому статичному навантаженні розширенні діапазону регулювання швидкості вниз від номінальної до 10:1. Перевагою подібних систем є відсутність тахогенератора на валу.

З метою захисту перетворювача частоти та двигуна від перевантаження по струму використовується режим струмового відсічення використовуючи суматор  $\Sigma_3$  і пристрій  $A_4$ . При  $I_1 > I_{1max}$  на вхід ПІ-регулятора струму відсічення  $A_3$  приходить сигнал перевищення струму статора вище допустимого. Вихідний сигнал  $A_3$   $U_{відс}$  може вплинути і на зниження вихідної напруги ПЧ (вузол  $\Sigma_2$ ), і, одночасно, на зниження частоти живлення АД (вузол  $\Sigma_1$ ).

При впливі тільки на вихідну напругу перетворювача, якщо у регулятора  $A_3$  є інтегральний канал регулювання, за рахунок негативного зворотного зв'язку по струму перетворювач частоти з джерела напруги переходить у режим джерела струму. Таким чином, при сталості струму статора АД за рахунок більшого коефіцієнта зворотного зв'язку регулятора  $A_3$  (для ПІ-регулятора – нескінченно великого), ніж пристрою  $A_1$ , при зменшенні швидкості будуть знижуватися потік і момент двигуна, чим буде викликане перекидання механічної характеристики АД. Такий режим роботи відсічення

використовується тільки разом із одночасним впливом на вихідну частоту перетворювача.

За рахунок негативного сигналу зворотного зв'язку по струму статора (сильнішого, ніж  $A_2$ ), що надходить на суматор  $\Sigma_1$ , разом зі стабілізацією струму відбувається зниження його частоти а, отже, швидкості ідеального холостого ходу АД. Цим забезпечується сталість магнітного потоку, абсолютного ковзання і моменту двигуна. Проте статична та динамічна точності стабілізації зазначених змінних є обмеженими умовами стійкості замкнутих контурів регулювання [7].

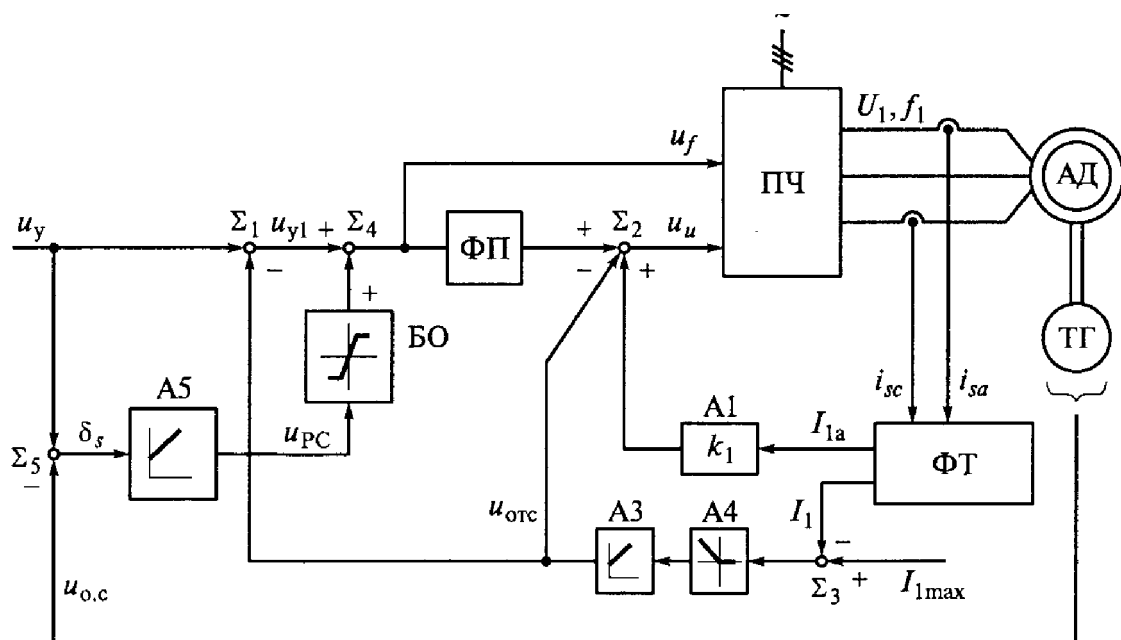


Рисунок 3.3 – Функціональна схема скалярної системи ПЧ-АД зі зворотнім зв'язком по швидкості

Розширення діапазону регулювання по швидкості АД може бути отримане введенням в розглянуту систему керування негативного зворотного зв'язку по швидкості. Функціональну схему подібної системи при живленні від перетворювача частоти як джерела напруги зображена на рисунку 3.3. Тут канал негативного зворотного зв'язку по швидкості представляється тахогенератором ТГ як датчиком зворотного зв'язку, вузлом  $\Sigma_5$

підсумовування напруг керування швидкістю АД  $U_y$  та зворотного негативного зв'язку по швидкості  $U_{oш}$ , регулятор значення абсолютного ковзання  $A_5$ , блок обмеження величини його вихідної напруги  $U_{PШ}$ , і вузол  $\Sigma_4$ , що виконує функцію сумування напруги  $U_{PШ}$  та результуючої напруги  $U_{y1}$  з виходу суматора  $\Sigma_1$ . [8]

Зі збільшення навантаження на валу АД (від  $M_1$  до  $M_2$  на рисунку 3.4) за рахунок зниження швидкості АД і, як наслідок, сигналу  $U_{oш}$  зростає сигнал неузгодженості  $\delta_s = U_y - U_{oш} \equiv \omega_{00} - \omega \equiv S_a$ , пропорційний абсолютному ковзанню двигуна. Тут  $\omega_{00}$  – швидкість ідеального холостого ходу АД (відповідає вихідному сигналу управління  $U_y$ ),  $\omega$  – поточна швидкість АД при заданому навантаженні на його валу.

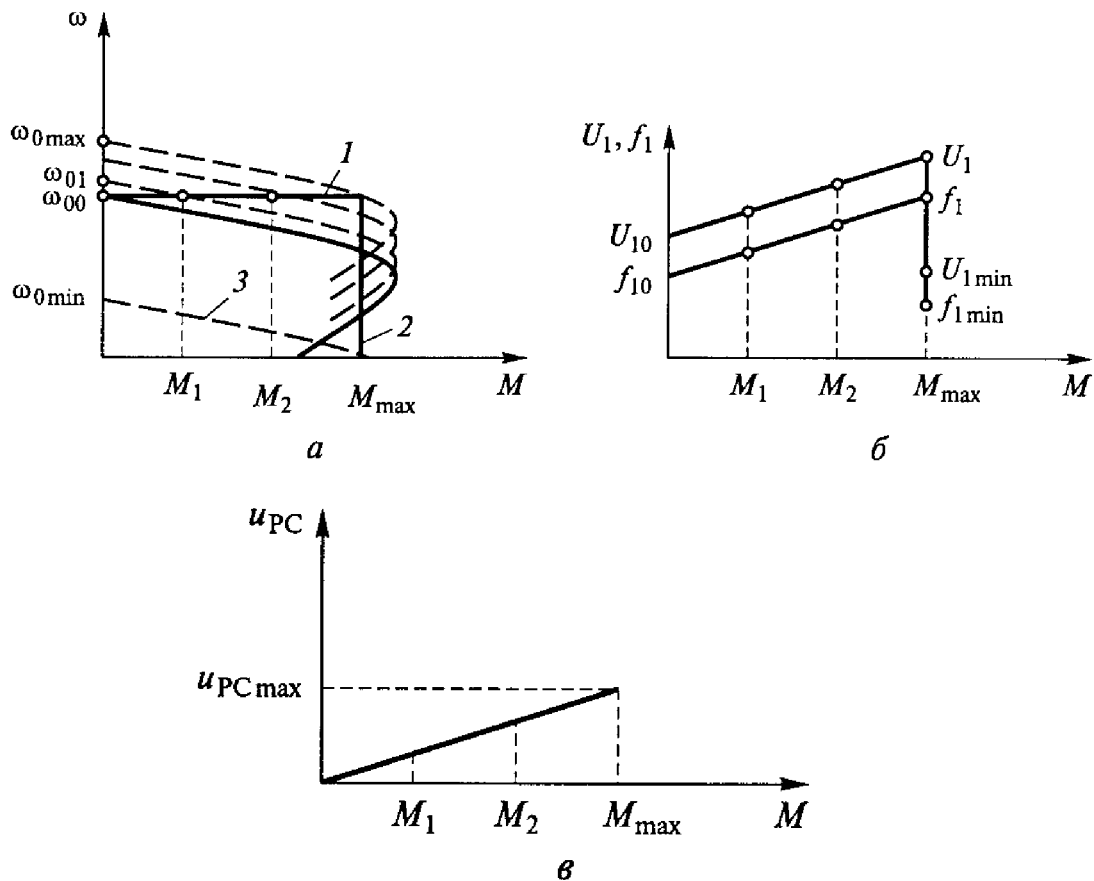


Рисунок 3.4 – Механічні характеристики (а), залежності вихідних напруг і частоти ПЧ (б), напруги регулятора швидкості (в) від момента в скалярній системі ПЧ-АД зі зворотнім зв'язком по швидкості



Коли  $\delta_s \neq 0$  сигнал  $U_{PII}$  на виході регулятора ковзання, додатний і складається із сигналом  $U_{yI} = U_y$  (при  $I_I < I_{I_{max}}$ ). Через наявність інтегральної складової передатної функції регулятора  $A_5$  забезпечується таке зростання сигналу керування  $U_f$  перетворювачем частоти, частота вихідної напруги ПЧ при якому стає рівною  $f_{I0}(1+S_a)$ . У той же час зі зміною частоти за рахунок ФП в порівнянні з початковою напругою  $U_{I0}$  змінюється і вихідна напруга перетворювача  $U_I$  (рис. 3.4, б). Швидкість двигуна при цьому відновлюється до заданого значення  $\omega_{00}$ . Це значить, що забезпечується абсолютна жорсткість механічної характеристики асинхронного двигуна (лінія 1 на рис. 3.4, а).

У випадку перевищення максимально допустимого струму статора АД ( $I_I > I_{I_{max}}$ ,  $M > M_{max}$ ), регулятор ковзання має бути виключений із роботи, наприклад, обмеженням його вихідного сигналу  $U_{PII}$  на рівні  $U_{PII_{max}}$  (рис. 3.4, в). У цей же час входять в роботу негативні зворотні зв'язки за струмом статора з регулятором  $A_3$ , чим забезпечується за рахунок одночасного зниження частоти а напруги статора АД до їхніх мінімальних значень  $f_{Imin}$ ,  $U_{Imin}$  обмеження моменту двигуна при  $\omega = 0$  на рівні  $M_{max}$  (лінія 2 на рис. 3.4, а). Мінімальне значення синхронної швидкості двигуна  $\omega_{0min}$  відповідатиме значенням  $f_{Imin}$ ,  $U_{Imin}$  механічна характеристика лінії 3 (рис. 3.4, а).[6]

Стійкість і динамічні показники якості регулювання швидкості двигуна визначаються через вибір пропорційної та інтегральної складових передатних функцій регуляторів  $A_5$  і  $A_3$ .

### 3.1.2 Системи частотно-струмового управління.

При частотно-струмовому керуванні АД живиться від перетворювача частоти (ПЧ), який працює в режимі джерела струму. Такий перетворювач можна реалізувати на основі автономного інвертора струму (рис. 3.5, а), куди

входить керований випрямляч КВ, який забезпечує за рахунок негативного ЗЗ за струмом навантаження (датчик струму ДС і регулятор струму РС) наряду з фільтруючим дроселем Др кероване джерело постійного струму й інвертор струму ІС, який виконує функцію формування потрібної частоти вихідного струму. Також можна реалізувати ПЧ і на базі перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком БПЧ (рис. 3.5, б). В них для кожної з вентильних груп наявний внутрішній контур регулювання струму, частота же вихідного струму БПЧ формується генератором частоти ГЧ. Контур регулювання струму ПЧ, зазвичай, астатичний, а параметри його ПІ-регулятора визначаються таким самим чином, як і для ПІ-регулятора струму в ЕП постійного струму [8].

Унікальною особливістю перетворювача частоти (ПЧ) є його здатність до взаємного обміну енергією між мережею живлення та двигуном із неререверсивним керованим вентилем. Це досягається за допомогою зміни напрямку протидії-ЕРС інвертора та збереження напрямку випрямленого струму в ньому.[3]

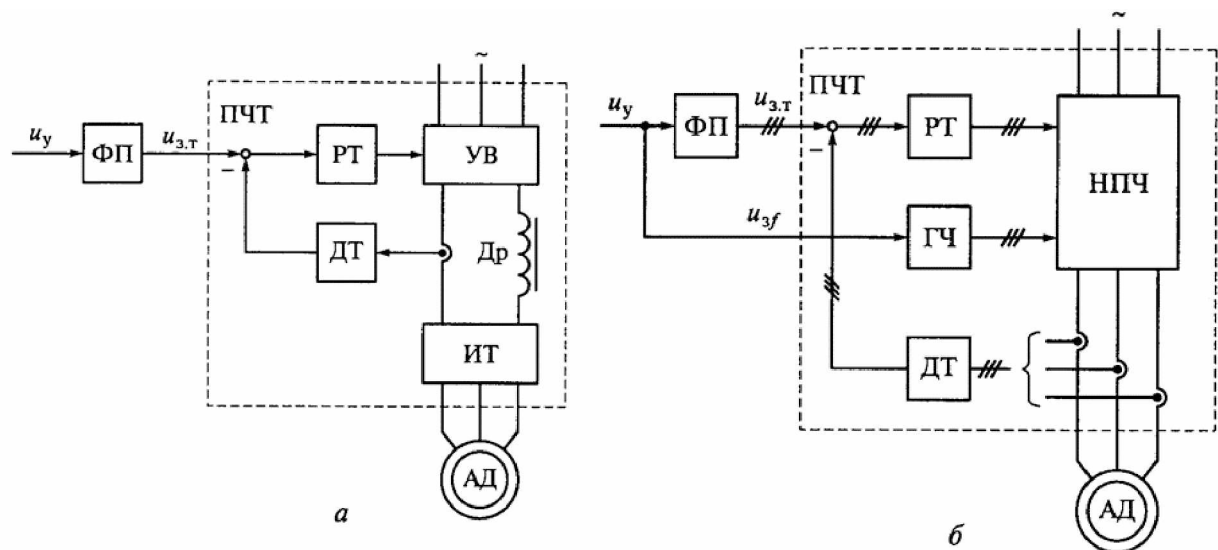


Рисунок 3.5 – Функціональні схеми скалярних систем ПЧ-АД при живленні від джерел струму на основі автономного інвертора (а) та перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком (б)

Керування двигуном відбувається за допомогою сигналів завдання вихідного струму  $U_{з.с}$  та частоти  $U_{з.ф}$  ПЧ. У свою чергу, обидва сигнали

залежать від загального сигналу керування  $U_y$ . При живленні АД від джерела струму через розмагнічувальну дію струму ротора магнітний потік АД значно збільшується при зміні абсолютного ковзання. Отже, для стабілізації магнітного потоку АД при зміні навантаження в канал формування струму ПЧ вводиться функціональний перетворювач ФП, який визначає завдання струму статора  $I_l$  як функції абсолютно ковзання  $S_a$ .

Позитивні властивості АД при його живленні від ПЧ включають: незалежність електромагнітного моменту АД від частоти та можливість при заданому значенні струму статора й абсолютному критичному ковзанні гарантувати більший момент, у порівнянні із живленням від джерела напруги. Це може бути реалізоване лише в замкнутій системі, при контролі абсолютного ковзання та струму двигуна в функції завантаження [2].

### 3.2 Принцип векторного керування

Векторне керування, основні засади якого були сформовані у 1970-х роках, зазнало значну трансформацію в результаті значних наукових досліджень і розвитку напівпровідникової енергетичної електроніки та мікропроцесорних систем. У наш час векторне керування має широке застосування в електроприводах, які випускаються проєктуються по всьому світу.

Математичне представлення трифазного асинхронного двигуна у прямокутних системах координат надало пояснення його електричному просторовому опису та стало ключовим елементом при впровадженні цієї технології.

Основною ідеєю векторного керування асинхронним двигуном є можливість окремого керування швидкістю та потокозчепленням двигуна. З

цією метою струм двигуна спочатку знімається в статичній системі  $\alpha$ - $\beta$ , надалі він переводиться в обертову систему координат  $d$ - $q$ , що показано на рис. 3.6.

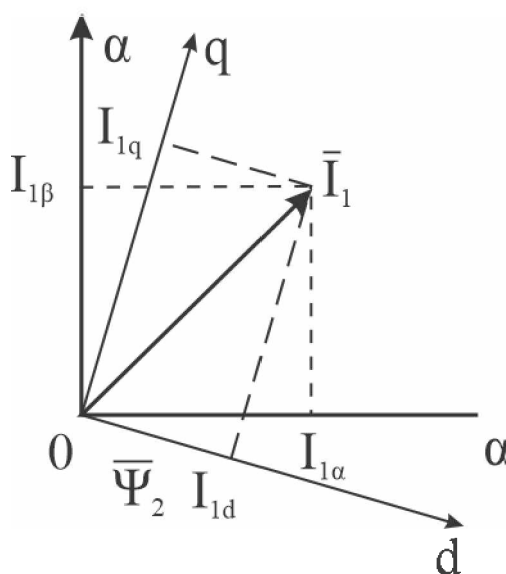


Рисунок 3.6 – Представлення взаємного розташування ортогональних систем координат

Коли вісь  $\alpha$  орієнтована за вектором потокозчеплення ротора довжина вектора є величиною потокозчеплення, а його проєкція пропорційна обертовій швидкості валу двигуна.[5]

Позначення прийняті на рис. 3.7:  $i_d$ ,  $i_q$  – проєкції струмів у прямокутній системі координат  $d$ - $q$ , що обертається зі швидкістю  $\Theta_c$ ;  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  – проєкції струму в стаціонарній системі координат зв'язаній зі статором;  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  – фазні струми статора.

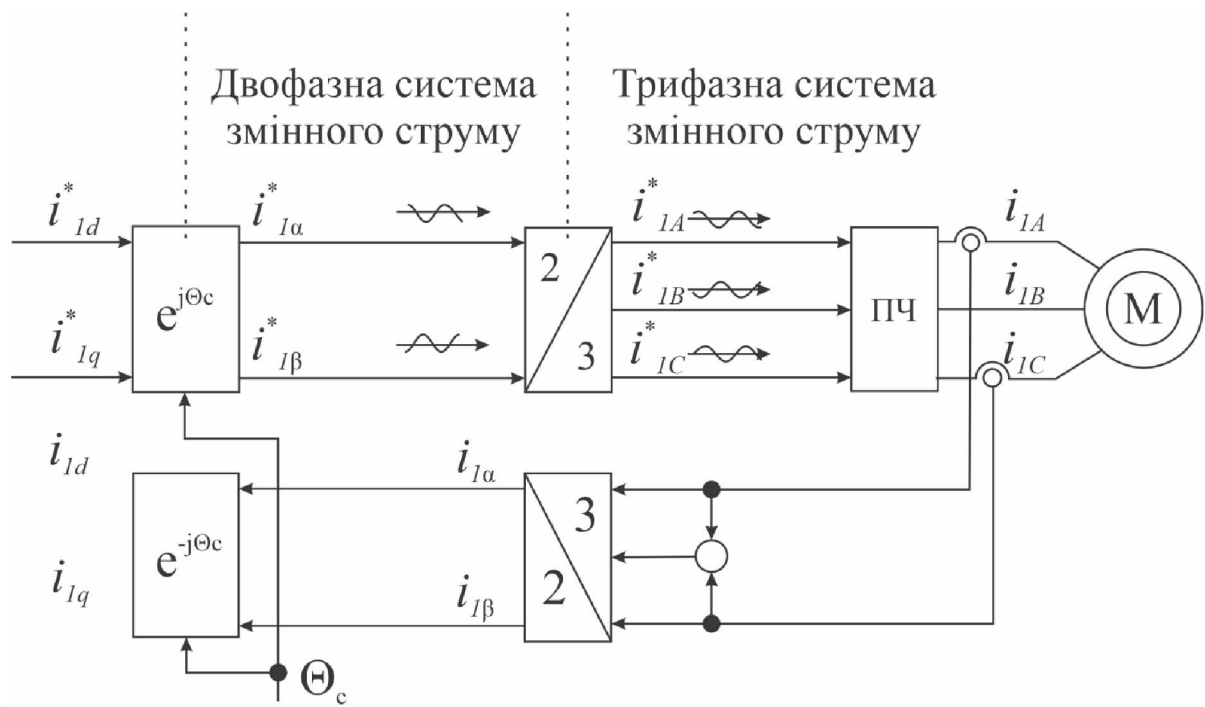


Рисунок 3.7 – Координатні перетворення у векторній системі керування

Рисунок вище зображує функціональну схему векторної системи управління. За цією схемою ми бачимо, що керовані параметри перетворюються з однієї координатної системи в іншу через перетворення, відомі як "Перетворення Кларка і Парка". Процес перетворення можна розбити на два етапи:

1. На першому етапі виконується перехід від обертової системи координат d-q, до нерухомої системи координат  $\alpha$ - $\beta$ , зв'язаної зі статором.
2. На другому етапі відбуваються перетворення величин з системи координат  $\alpha$ - $\beta$  до природньої трифазної системи координат ABC.

Таким чином, контрольовані величини проходять ці два основних перетворення в процесі функціонування векторного управління.

У перетворенні Кларка беруть участь трифазні струми -  $i_A$ ,  $i_B$  та  $i_C$ , для визначення струмів у двофазній ортогональній системі координат статора, орієнтованій по осях  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ . З отриманням цих двох струмів у нерухомій системі координат статора їх піддають перетворенням у відповідні компоненти струмів  $i_d$ ,  $i_q$  в системі координат d-q. Цей процес називається перетворенням Парка.

Перетворення Кларка.

Тут вісь  $\alpha$  суміщається з віссю  $x$ :

$$\begin{aligned}i_{\alpha} &= i_a \\i_{\beta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot i_b \\i_a + i_b + i_c &= 0\end{aligned}$$

Перетворення Парка:

$$\begin{aligned}i_d &= i_{\alpha} \cdot \cos \theta + i_{\beta} \cdot \sin \theta, \\i_q &= -i_{\alpha} \cdot \sin \theta + i_{\beta} \cdot \cos \theta.\end{aligned}$$

Зворотні математичні перетворення Парка та Кларка:

Перехід від обертової системи координат  $d$ - $\beta$  до нерухомої  $\alpha$ - $\beta$ :

$$\begin{aligned}i_{\alpha} &= i_d \cdot \cos \theta - i_q \cdot \sin \theta, \\i_{\beta} &= i_d \cdot \sin \theta + i_q \cdot \cos \theta.\end{aligned}$$

Вирази переходу від двофазної ортогональної  $\alpha$ - $\beta$  до трифазної природної  $abc$ :

$$\begin{aligned}i_a &= i_{\alpha}, \\i_b &= -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta}, \\i_c &= -\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta}.\end{aligned}$$

Випадок орієнтації осі  $d$  за вектором потокозчеплення ротора, є аналогією між системами керування електроприводами асинхронними

двигунами та двигуном постійного струму. Це видно на структурних схемах рис. 3.8. Така аналогія наштовхнула дослідників на гіпотезу, що керування координатами електроприводу змінного струму проходить схожим чином із керуванням координатами електроприводу постійного струму.

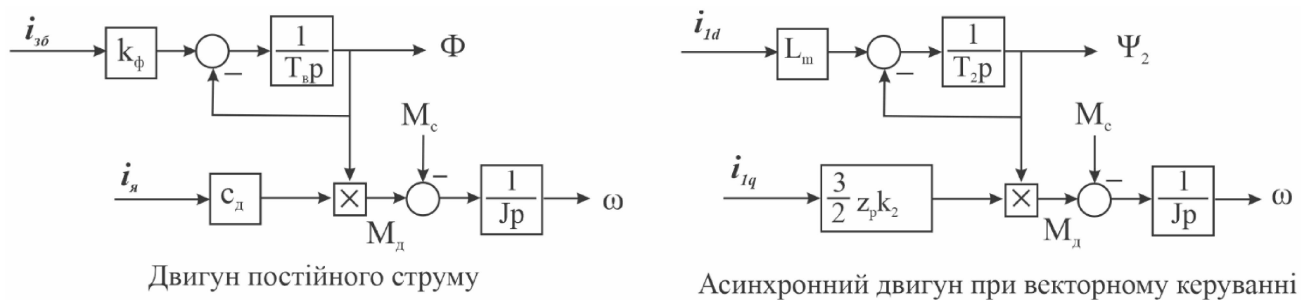


Рисунок 3.8 – Аналогія між структурними схемами АД і ДПС

Позначення прийняті на рисунку вище:  $i_{zb}$ ,  $i_{ia}$  – струми збудження і якоря ДПС;  $T_z$  – постійна часу обмотки збудження ДПС;  $k_\phi$  – коефіцієнт, який враховує конструкцію ДПС;  $c_d$  – стала ДПС;  $J$  – момент інерції двигуна;  $M_d$  – момент двигуна;  $M_c$  – момент статичного опору (навантаження);  $i_{ld}$ ,  $i_{lq}$  – d, q складові струму статора АД;  $k_2$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора АД;  $T_2$  – електромагнітна стала АД;  $z_p$  – число пар полюсів.

### 3.3 Синтез векторної системи керування

Використання векторного керування має ряд переваг, зокрема здатність створення високодинамічних систем електроприводу з широким спектром застосування та можливість налаштування діапазонів регулювання швидкості практично для будь-яких потреб. Векторне керування призначене для впровадження закону частотного керування  $\tilde{\Psi}_r = const$ , забезпечуючи необхідні статичні та динамічні характеристики електроприводам через розподілене управління механічними (швидкість, момент) та магнітними

(потокосцеплення або магнітний потік) координатами. Векторне керування враховує взаємне розташування узагальнених векторів електромагнітних величин.

У силових схемах таких приводів зазвичай використовується частотний перетворювач на основі некерованого випрямляча й автономного інвертора напруги (для низьких швидкостей існує можливість використання безпосередніх перетворювачів частоти). Вихідна напруга генерується по принципу широтно-імпульсної модуляції.

Функціональна схема системи векторного керування асинхронного двигуна, де всі регульовані координати можуть бути виміряні, представлена на рисунку 3.9. Система включає два канали управління: модуль вектора потокосцеплення ротора та кутова швидкість ротора. Кожен канал має по два контури регулювання.

Завдання сигналів відбувається в системі координат d, q, орієнтованій за вектором потокосцеплення ротора  $\tilde{\Psi}_r$ , математичний запис умови обертання має такий вигляд:

$$\psi_{rd} = |\tilde{\Psi}_r| = \Psi_r,$$

$$\psi_{rq} = 0.$$

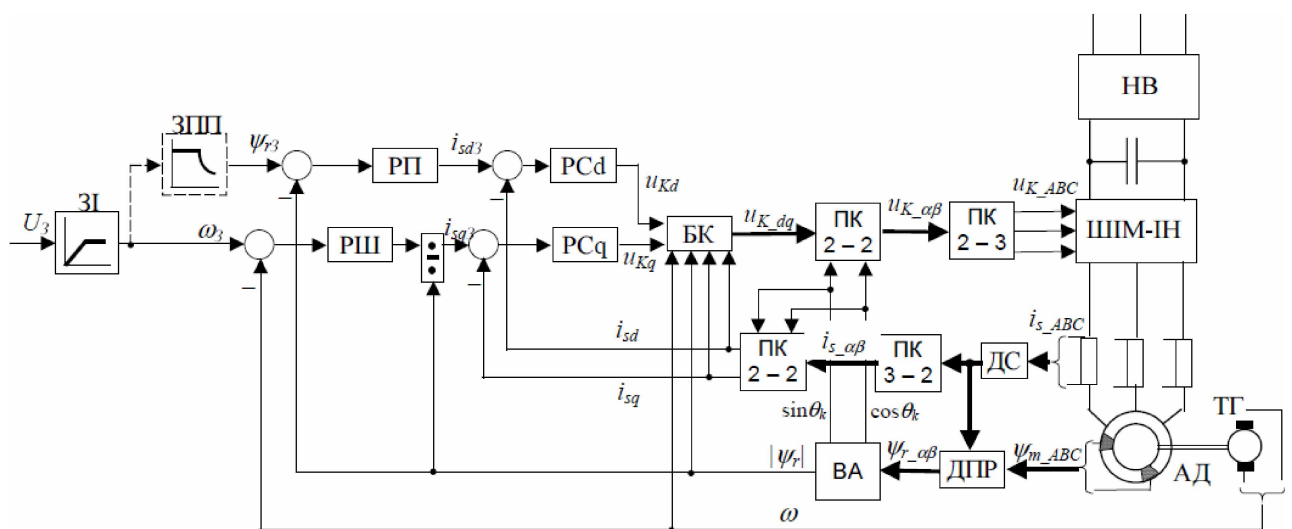


Рисунок 3.9 – Функціональна схема системи векторного керування АД з орієнтацією за вектором потокосцеплення ротора



Переведення сигналів до трифазної системи координат статора передбачено за допомогою спеціальних пристроїв – перетворювачів координат. Вони дають змогу перетворювати сигнали з системи, яка обертається за вектором потокозчеплення ротора ( $d, q$ ), на сигнали в нерухомій системі координат статора (система  $\alpha, \beta$ ), і нарешті в нерухому систему А, В, С.

Складові струму статора, виміряні датчиками струму, піддаються перетворенню назад до системи координат  $d, q$  через обернені перетворення. Зазвичай, регулятори внутрішніх контурів регулювання струму статора мають пропорційно-інтегральну структуру.

Зняття вимірювань основних компонентів потокозчеплення  $\tilde{\Psi}_m$  проходить із застосуванням датчиків Холла або ж вимірювальних обмоток в системі координат А, В, С. Складові потокозчеплення ротора  $\tilde{\Psi}_r$  визначаються у датчику потокозчеплення ротора по відповідним формулам, без урахування коефіцієнта передачі датчиків Холла.

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = k_r^{-1} \psi_{m\alpha} - L_{r\sigma} i_{s\alpha}, \\ \psi_{r\beta} = k_r^{-1} \psi_{m\beta} - L_{r\sigma} i_{s\beta}. \end{cases}$$

Сигнали амплітуди і фази вектора визначаються у векторному аналізаторі. Пропорційний модулю вектора потокозчеплення ротора сигнал надходить до блока порівняння регулятора потокозчеплення, зазвичай, ПІ-типу. Гармонійні сигнали  $\cos\theta_\kappa$  та  $\sin\theta_\kappa$  беруть участь у перетвореннях координат  $2 \rightarrow 2$  включенням до відповідних координатних перетворювачів (ПК  $2 \rightarrow 2$ ).

Для вимірювання швидкості обертання ротора двигуна тахогенератор закріплюють на валу двигуна. Зазвичай, регулятор швидкості пропорційного

або пропорційно-інтегрального типу. Це залежить від потреби у наданні системі астатичних властивостей.

Структурна схема системи векторного керування, яка орієнтована за потокозчепленням ротора, складається з двох каналів регулювання: каналу потоку та каналу регулювання швидкості обертання ротора. Канал потокозчеплення включає в себе регулятор потоку, регулятор струму та перетворювач частоти.

### 3.3.1 Синтез регуляторів струму

Для розімкненого контуру стабілізації струму передавальна функція:

$$W_{\text{роз.к.стаб.І}}(p) = W_{\text{РС}}(p) \cdot \frac{k_{\Pi}}{T_n \cdot p + 1} \cdot \frac{1/R_{\varepsilon}}{T_{1\varepsilon} \cdot p + 1},$$

де  $R_{1\varepsilon}$  – сумарний активний опір фази двигуна,

$$R_{1\varepsilon} = R_{\varepsilon} + k_r^2 \cdot R_r$$

$$\text{де } k_r = \frac{L_m}{L_r}$$

Бажана передавальна функція розімкненого контуру стабілізації струму:

$$W_{\text{б.роз.к.стаб.І}}(p) = \frac{1/k_{\text{зв.с}}}{a_c \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}$$

де  $k_{\text{зв.с}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму.

Приймаємо  $a_c = 2$  для налаштування регулятора на модульний оптимум,

$$T_\mu = T_n.$$

Передавальна функція регулятора:

$$W_{PC}(p) = \frac{1/k_{33,c}}{2 \cdot T_n \cdot p \cdot (T_n \cdot p + 1)} \cdot \frac{T_n \cdot p + 1}{k_n} \cdot \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{1/R_{1e}} = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{2 \cdot k_{33,c} T_n \cdot p \cdot k_n \cdot 1/R_{1e}}$$

Спростимо запис, позначивши:

$$T_{II} = \frac{2 \cdot k_{33,c} \cdot T_n \cdot k_n}{R_{1e}}$$

Тоді вираз має вигляд:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_{1e} \cdot p + 1}{T_{II} \cdot p}$$

### 3.3.2 Синтез регулятора потоку

Передавальна функція розімкненого контуру стабілізації потоку:

$$W_{роз.к.стаб.П}(p) = W_{РП}(p) \cdot W_{зам.к.стаб.}(p) \cdot \frac{k_r L_r}{T_2 p + 1}$$

Передавальна функція замкненого контуру регулювання струму:

$$W_{зам.к.стаб.І}(p) = \frac{W_{роз.к.стаб.І}(p)}{1 + W_{роз.к.стаб.І}(p) \cdot k_{33,c}} = \frac{1/k_{33,c}}{2 \cdot T_n \cdot p + 1}$$

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру стабілізації потоку:

$$W_{\text{б.роз.к.стаб.П}}(p) = \frac{1 / k_{\text{зз.н}}}{a_c \cdot T_{\mu c} \cdot p \cdot (T_{\mu c} \cdot p + 1)}$$

Приймаємо відповідно  $a_c = 2$ ,  $a_n = 2$  для настройки регулятора на МО, а некомпенсовану сталу часу приймаємо  $T_{\mu c} = a_n T_n$ .

Знайдемо передавальну функцію регулятора:

$$W_{\text{РП}}(p) = \frac{1 / k_{\text{зз.с}}}{2 \cdot 2 \cdot T_n \cdot p \cdot (2 \cdot T_n \cdot p + 1)} \cdot \frac{2 \cdot T_n \cdot p + 1}{1 / k_{\text{зз.с}}} \cdot \frac{T_2 p + 1}{k_r L_r} = \frac{k_{\text{зз.с.1}} (T_2 \cdot p + 1)}{4 \cdot T_n \cdot p \cdot k_{\text{зз.н}} \cdot L_m}$$

Позначивши:

$$T_{\text{П}} = \frac{k_{\text{зз.н}} \cdot 4 \cdot T_n \cdot L_m}{k_{\text{зз.с.1}}}$$

Тоді вираз матиме вигляд:

$$W_{\text{РП}}(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_{\text{П}} \cdot p}$$

### 3.3.3 Синтез регулятора швидкості

Передавальна функція розімкнутого контуру стабілізації швидкості:

$$W_{\text{роз.к.стаб.Ш}}(p) = \frac{1}{|\Psi_2| \cdot k_{\text{зз.н}}} \cdot W_{\text{РШ}}(p) \cdot W_{\text{зам.к.стаб.І}}(p) \cdot |\Psi_2| \cdot \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_r \cdot \frac{1}{J \cdot p}$$

Передавальна функція замкненого контуру регулювання струму:

$$W_{\text{зам.к.стаб.І}}(p) = \frac{W_{\text{роз.к.стаб.І}}(p)}{1 + W_{\text{роз.к.стаб.І}}(p) \cdot k_{\text{зз.с}}} = \frac{1/k_{\text{зз.с.2}}}{2 \cdot T_n \cdot p + 1}$$

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру стабілізації потоку:

$$W_{\text{б.роз.к.стаб.ІІІ}}(p) = \frac{1/k_{\text{зз.ІІІ}}}{a_c \cdot T_{\mu c} \cdot p \cdot (T_{\mu c} p + 1)}$$

Відповідно приймемо  $a_c = 2, a_{\mu} = 2$  налаштовуючи регулятор на МО, а некомпенсована стала часу  $T_{\mu c} = a_{\mu} \cdot T_n$ .

Передавальна функція регулятора:

$$\begin{aligned} W_{PII}(p) &= \frac{1/k_{\text{зз.ІІІ}}}{2 \cdot 2 \cdot T_n \cdot p \cdot (2 \cdot T_n \cdot p + 1)} \cdot \frac{2 \cdot T_n \cdot p + 1}{1/k_{\text{зз.с}}} \cdot \frac{2 \cdot k_{\text{зз.ІІ}} \cdot J \cdot p}{3 \cdot z_p \cdot k_r} = \\ &= \frac{k_{\text{зз.ІІ}} \cdot k_{\text{зз.с.2}} \cdot J}{3 \cdot z_p \cdot k_r \cdot 2 \cdot T_n \cdot k_{\text{зз.ІІІ}}} = k_{PII} \end{aligned}$$

Сталі часу

$$T_{1\epsilon} = \sigma \cdot \frac{L_i}{R_{1\epsilon}}$$

$$T_2 = \sigma \cdot \frac{L_r}{R_r}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за потоком:

$$k_{\text{зз.ІІ}} = \frac{U_{\text{н.з}}}{\Psi_2}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом в контурі потокозчеплення:

$$k_{\text{зв.з.1}} = \frac{U_{\text{н.з.}}}{I_{1d\delta}}$$

Аналогічно для коефіцієнту зворотного зв'язку за струмом у контурі регулювання моменту:

$$k_{\text{зв.з.2}} = \frac{U_{\text{н.з.}}}{I_{1d\delta}}$$

Коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю:

$$k_{\text{зв.ш}} = \frac{U_{\text{н.з.}}}{\omega_{r\delta}}$$

Коефіцієнт передачі перетворювача по напрузі і стала часу:

$$k_n = \frac{U_{\delta}}{U_{\text{н.з.}}}$$

$$T_n = 0,001 \text{ с}$$

Задаємось базовими значеннями координат електроприводу для розрахунку регуляторів і складових моделі.

Амплітудне значення номінальної фазної напруги статора

$$U_{\delta} = \sqrt{2} \cdot U_{\phi.\text{н.}}, \text{ В}$$

$$I_{1d\delta} = I_{1d}, \text{ А}$$

$$I_{1q\delta} = k_{\text{max}} \cdot I_{1q}, \text{ А}$$

де  $k_{\max}$  – перевантажувальна здатність двигуна за моментом

$$k_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_{\text{н}}}$$

Номінальна кутова частота напруги статора

$$\omega_{\delta} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{с.н.}}, \text{ рад/с}, \text{ рад/с}$$

Кутова частота обертання ротора

$$\omega_{\text{р.}\delta} = \frac{\omega_{\delta}}{Z_p}, \text{ рад/с}$$

Електромагнітний момент

$$M_{\delta} = k_{\max} \cdot \frac{P_{\text{н}}}{\omega_{\text{р.}\delta}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Потокозчеплення ротора

$$\Psi_{2\delta} = \Psi_2 = L_m \cdot I_{1d}, \text{ Вб}$$

Розрахунок проєкцій струмів

$$I_{1d} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left( \frac{-R_s \cdot \sin \varphi - X_s \cdot \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left( \frac{X_s \cdot \sin \varphi + R_s \cdot \cos \varphi - \frac{U_1}{I_1}}{X_m} \right)^2}$$

$$I_{1q} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left( \cos \varphi - \frac{-R_s \cdot \sin \varphi - X_s \cdot \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left( -\sin \varphi - \frac{X_s \cdot \sin \varphi + R_s \cdot \cos \varphi - \frac{U_1}{I_1}}{X_m} \right)^2}$$

## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В SIMULINK

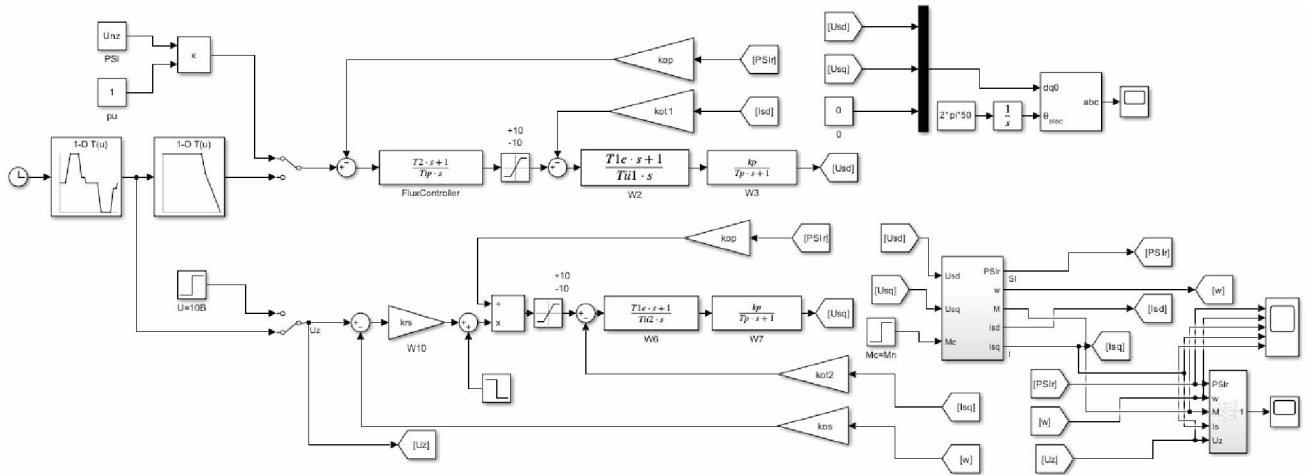


Рисунок 4.1 – Модель векторної системи керування у Simulink

На рисунку 4.1 зображена модель векторної системи керування асинхронним двигуном за потокозчепленням ротора, зібрана у Simulink.

Регулятори струму d, q складових W2, W6 показані у вигляді блоків Transfer Function ПІ-типу. Синтез проводився у п.3.3.1. Регулятор потокозчеплення зображений передавальною функцією в блоці FlowController, синтез проводився у п.3.3.2. Регулятор швидкості П-типу представлений у вигляді блоку Gain W10, синтез проводився у п.3.3.3. Перетворювач частоти представлений блоками W3, W7 для d, q керованих координат відповідно. Статичний момент навантаження подається на вході Mc підсистеми асинхронного двигуна, імітуючи вантаж у кабіні.

Структурну модель асинхронного двигуна в системі координат d-q із блоком компенсації наведено на рисунку 4.2. На рис. 4.1 вона представлена окремим блоком, перед тим схована у підсистему.

Модель уособлює присутність двох каналів регулювання в системі векторного керування – модуля потокозчеплення ротора й електромагнітного моменту. Компоненти, що відповідають проєкціям векторів напруги і струму



статора на вісь d, мають назву «потокоутворюючих», а проєкції на вісь q – «моментоутворюючих».

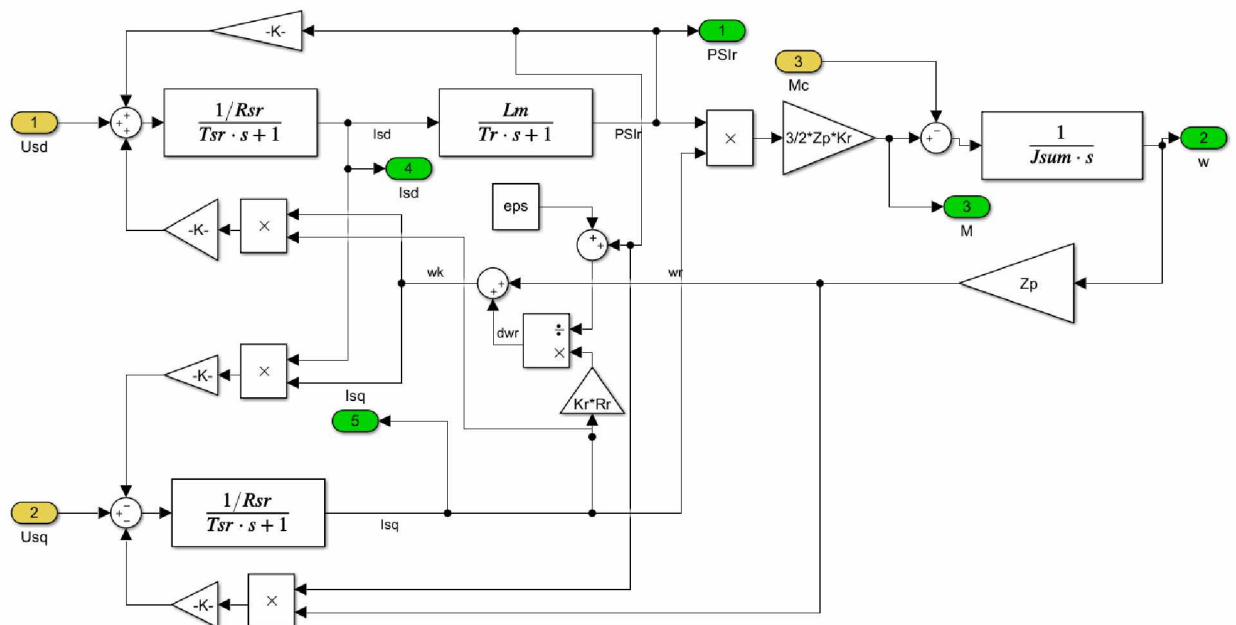


Рисунок 4.2 – Модель асинхронного двигуна в системі координат d-q

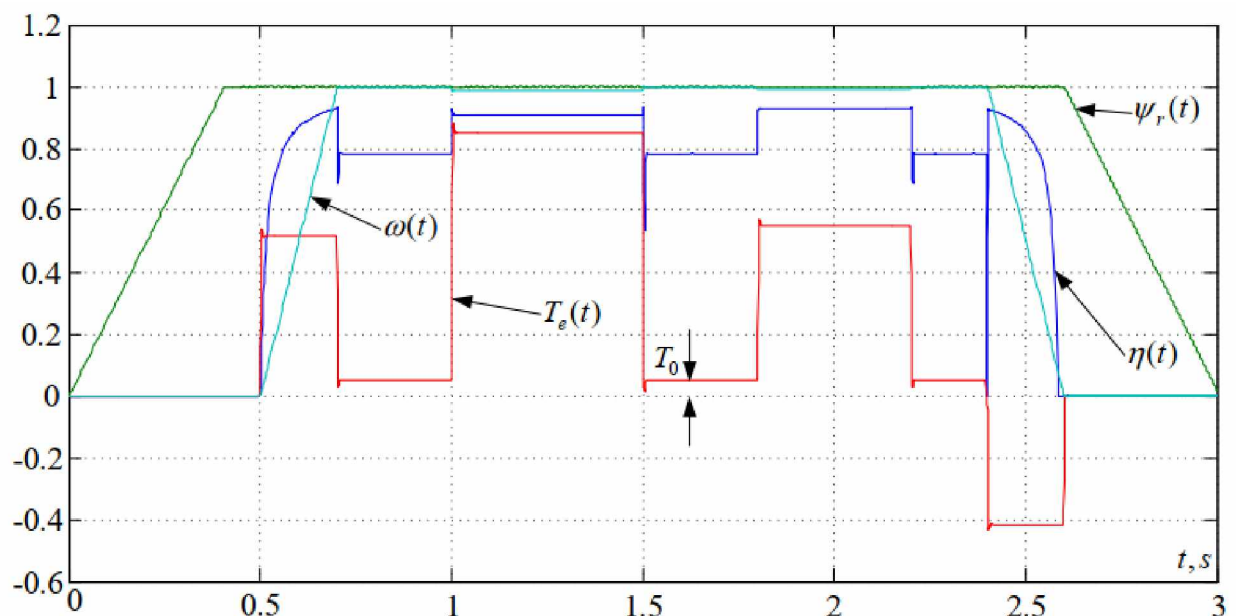


Рисунок 4.3 – Перехідні процеси у системі векторного керування швидкістю АД за потокозчепленням ротора

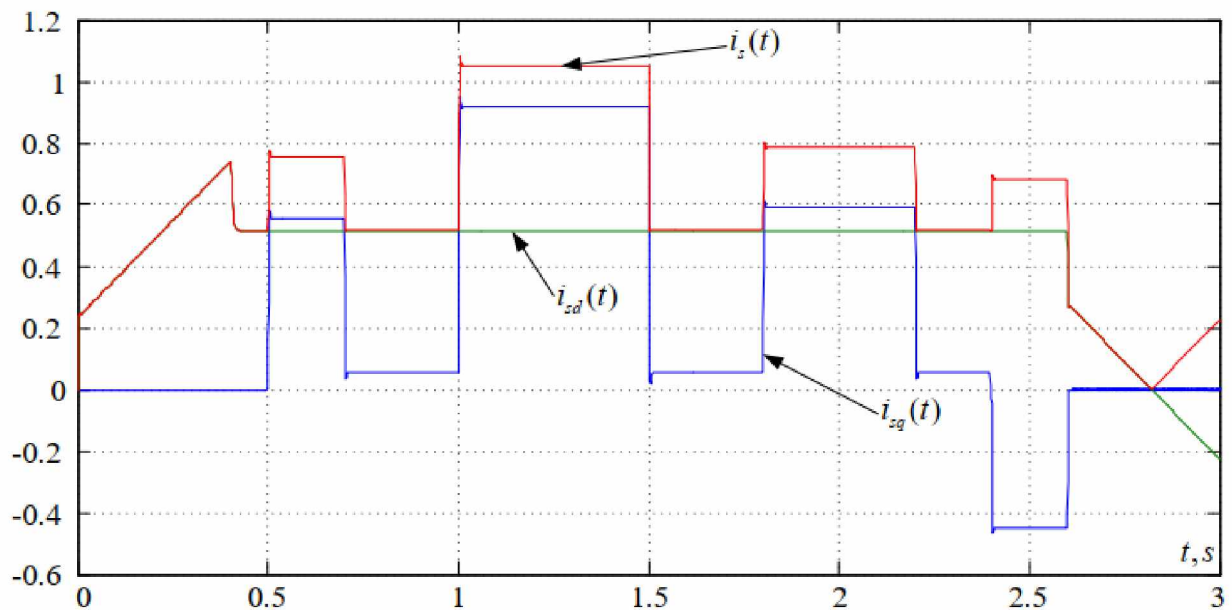


Рисунок 4.4 – Перехідні процеси струму статора та його компонентів у системі векторного керування швидкістю АД за потокозчепленням ротора

За отриманими осцилограмами перехідних процесів, які представлені на рисунку 4.3, 4.4 можна дійти висновку, що розроблена векторна система керування електропривода асинхронного двигуна відпрацьовує пуск, рух на усталеній швидкості та гальмування, чим і доводиться адекватність роботи розробленої моделі. Спочатку зростає магнітний потік до номінального значення, а лише після цього починається повноцінне відпрацювання циклу. Графіки моменту демонструють високу динамічну спроможність системи, відпрацювання відбувається з мінімальним перерегулюванням.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі були вивчені питання сучасного стану ліфтової індустрії, розглянуті кінематичні схеми ліфтів. Надана оцінка технічним можливостям та обмеженням, які накладаються на ліфти згідно технічних норм і стандартів.

За наданими вихідними даними розраховані параметри кабіни, противаги, виконаний розрахунок і вибір канатів. Проведена перевірка по критерію статичного розривного зусилля. З метою забезпечення руху ліфта на визначеній швидкості обраний редуктор РГЛ-160-25 з передатним числом 25. Як приводний обрано асинхронний двигун із короткозамкненою обмоткою серії 4А модель 4А160М4У3 потужністю 18,5 кВт і частотою обертання 1467 об/хв. Векторне керування в асинхронному електроприводі має бути забезпечено із застосуванням перетворювача частоти Danfoss VLT Automation Drive FC-302 потужністю 22 кВт.

Розроблена електромеханічна система на основі перетворювача частоти та асинхронного двигуна з векторним керуванням за потокозчепленням ротора. Для цього проведений синтез регуляторів струму, потокозчеплення та швидкості. У бібліотеці Simulink пакету прикладних програм MATLAB зібрана імітаційна модель розробленої системи електроприводу. Зняті графіки перехідних процесів швидкості, потокозчеплення, струму, моменту.

Аналізуючи отримані результатами моделювання можна зробити висновок про те, що спроектована система векторного керування працює адекватно та прогнозовано, а перехідні процеси задовольняють заданим критеріям.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ліфти : навч. посібник / О. В. Григоров [та ін.] ; дар. О. В. Григоров. — Харків : ХНАДУ, 2016. — 172 с.
2. Методичні вказівки для виконання курсової, самостійної та практичних робіт з дисципліни «Безпека експлуатації ліфтів та спецтехніки» (для студентів 5 курсу денної форми навчання спеціальності 7.17020201, 8.17020201 – Охорона праці (за галузями)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. Х. Далека, В. М. Шавкун. — Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. — 61 с.
3. Волков Д.П. Лифты. — Москва : Изд-во АСВ, 1999. — 480 с.: ил.
4. Архангельский Г.Г., Вайнсон А. А., Ионов А. А. Эксплуатация и расчет лифтовых установок. — Москва: МИСИ, 1980.
5. Белікова Л. Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів /Л. Я. Белікова, В. П. Шевченко. — О.: Наука і техніка, 2012.— 480 с.
6. Чиликин М.Г., Сандлер А.С., Общий курс электропривода. Учебник для вузов. 6-е изд., доп. и перераб.
7. SimPowerSystems User's Guide. — Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. — 40
8. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. — Екатеринбург: УРО РАН, 2000. — 654 с.2 р.
9. Дьяконов В.П. Simulink 4. Специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 528с.

## ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА

| Позначення<br>документа | Документ | Умовне<br>позначення | Зміст зауваження |
|-------------------------|----------|----------------------|------------------|
|                         |          |                      |                  |

Дата \_\_\_\_\_