

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КОВБАСА  
(підпис)

“ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи  
автоматизації, електропривод та електромобільність»  
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

на тему:

Дослідження режимів роботи електромеханічної системи тунельного  
ескалатора

Виконав : студент II курсу, групи ЕП-21мп

\_\_\_\_\_ Пащак Марк Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Науковий керівник к.т.н., проф. Печеник Микола Валентинович

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

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

Рецензент \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Чумак В. В

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

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Київ – 2024 р.

## ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

| № з/п | Лист | Позначення      | Назва                                                     | Кількість листів | Примітка |
|-------|------|-----------------|-----------------------------------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4   |                 | Завдання на магістерську дисертацію                       | 2                |          |
| 2     | A4   | 141.2110.010.МД | Пояснювальна записка                                      | 110              |          |
| 3     | A1   | 141.2110.010.МД | Загальний вид та технологічна схема                       | 1                |          |
| 4     | A1   | 141.2110.010.МД | Розрахункова схема ескалатору. Результати розрахунку.     | 1                |          |
| 5     | A1   | 141.2110.010.МД | Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування | 1                |          |
| 6     | A1   | 141.2110.010.МД | Результати дослідження                                    | 1                |          |
| 7     | A1   | 141.2110.010.МД | Результати дослідження                                    | 1                |          |
| 8     | A1   | 141.2110.010.МД | Результати дослідження                                    | 1                |          |
|       |      |                 |                                                           |                  |          |

|          |              |                                                                                     |      |                                                                                                |                                                             |        |
|----------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
|          |              |                                                                                     |      | <i>141.2110.010.МД</i>                                                                         |                                                             |        |
|          | ПІБ          | Підп.                                                                               | Дата | Дослідження режимів роботи електромеханічної системи тунельного ескалатора<br><br>Відомість МД | Лист                                                        | Листів |
| Розробн. | Пащак М.С.   |  |      |                                                                                                | 2                                                           | 110    |
| Керівн.  | Печеник М.В. |                                                                                     |      |                                                                                                | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. АЕМС-ЕП<br>Гр. ЕП - 21мп. |        |
| Конс.    |              |                                                                                     |      |                                                                                                |                                                             |        |
| Н/контр. | Печеник М.В. |                                                                                     |      |                                                                                                |                                                             |        |
| Зав.каф. | Ковбаса С.М. |                                                                                     |      |                                                                                                |                                                             |        |

## **Пояснювальна записка до магістерської дисертації**

на тему: «Дослідження режимів роботи електромеханічної системи  
тунельного ескалатора»

Київ – 2024 р.

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

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій КОВБАСА  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
Пацаку Марку Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження режимів роботи електромеханічної системи тунельного ескалатора \_\_\_\_\_

науковий керівник дисертації Печеник Микола Валентинович, к.т.н., проф. \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження: Статичні та динамічні характеристики електромеханічної системи ескалатора

4. Вихідні дані: Висота підйому 55м, кут нахилу ескалатора 30°, швидкість руху 0.75м/с, ширина ступені 1м, глибина сідця 0.4м, крок сідців 0.45м, маса сідця 26кг, діаметр розподільного кола зірочки 1.7м, середня маса пасажирів 69кг.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Вступ, аналітичний огляд науково-технічної літератури, розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи ескалатора, розрахунок та вибір елементів керування, дослідження статичних та динамічних характеристик, розробка стартам-проекту, висновки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Завдання на магістерську дисертацію, пояснювальна записка, загальний вид та технологічна схема ескалатору, структурна схема алгоритму непрямого векторного керування, результати дослідження.

7. Орієнтовний перелік публікацій: \_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації\*

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

\* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання 01 вересня 2023р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                                                                                                                                         | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний огляд науково-технічної літератури та принципів побудови конструктивних елементів ескалатору. Аналіз систем електроприводів. Формування вимог до електроприводу ескалатора. | 15.09.2023                                      | Виконано |
| 2     | Розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи ескалатора.                                                                                                                     | 30.09.2023                                      | Виконано |
| 3     | Математичний опис елементів електромеханічної системи тунельного ескалатора.                                                                                                            | 15.10.2023                                      | Виконано |
| 4     | Розробка моделі електромеханічної системи.                                                                                                                                              | 25.11.2023                                      | Виконано |

|   |                                                                                                       |            |          |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|
| 5 | Дослідження режимів роботи та характеристик електромеханічної системи. Аналіз результатів досліджень. | 25.12.2023 | Виконано |
| 6 | Розробка стартап-проекту.                                                                             | 30.12.2023 | Виконано |
| 7 | Висновки по роботі. Оформлення магістерської дисертації. Підготовка презентації.                      | 05.01.2024 | Виконано |

Студент

  
(підпис)

Марк ПАЩАК

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола ПЕЧЕНИК

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація виконана на 110 сторінках, складається із вступу, 5 розділів, висновка, списку використаних джерел та додатків (108 сторінок пояснювальної записки, 56 рисунки, 30 таблиць, 23 використаних джерел та 6 додатків).

Мета роботи – дослідження електромеханічної системи тунельного ескалатора при різних режимах роботи.

В ході написання дисертації здійснено аналітичний огляд наукової літератури по темі дисертації, сформовано основні вимоги до електромеханічної системи ескалатора та електродвигуна зокрема. Розраховано та обрано асинхронний електродвигун. Складено модель для дослідження та проведено дослідження статичних та динамічних характеристик. Проаналізовано отримані результати. Розроблено стартап-проект.

При розрахунку, моделюванні та оформленні використовувались такі програми: Microsoft Office Word 2019, Microsoft Office Visio 2010, MathType 7.6, MATLAB R2014b.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, ЕСКАЛАТОР, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, МОМЕНТ НАВАНТАЖЕННЯ

|           |      |              |                                                                                     |      |                                                                            |                                                            |   |        |         |  |
|-----------|------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---|--------|---------|--|
|           |      |              |                                                                                     |      | 141.2110.010.МД                                                            |                                                            |   |        |         |  |
|           |      |              |                                                                                     |      | Дослідження режимів роботи електромеханічної системи тунельного ескалатора | Лім                                                        |   | Маса   | Масштаб |  |
| Зм.       | Лист | № докум.     | Підпис                                                                              | Дата |                                                                            |                                                            | Т |        |         |  |
| Розроб.   |      | Пашак М.С.   |  |      |                                                                            |                                                            |   |        |         |  |
| Перевір.  |      |              |                                                                                     |      |                                                                            |                                                            |   |        |         |  |
|           |      |              |                                                                                     |      |                                                                            |                                                            |   |        |         |  |
| Керівник  |      | Печеник М.В. |                                                                                     |      |                                                                            | Лист                                                       |   | Листів |         |  |
| Н. контр. |      |              |                                                                                     |      |                                                                            | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>Каф. АЕМС-ЕП<br>Гр. ЕП – 21мп |   |        |         |  |
| Ватверд.  |      | Ковбаса С.М. |                                                                                     |      |                                                                            |                                                            |   |        |         |  |

## SUMMARY

The master's thesis is completed on 111 pages, consists of introduction, 5 chapters, conclusion, list of used sources and appendices (109 pages of explanatory notes, 56 figures, 30 tables, 23 used sources and 6 appendices).

The purpose of the work is to study the electromechanical system of the tunnel escalator in different modes of operation.

In the course of writing the dissertation, an analytical review of the scientific literature on the topic of the dissertation was carried out, the main requirements for the electromechanical system of the escalator and the electric motor in particular were formed. An asynchronous electric motor is calculated and selected. A research model was developed and static and dynamic characteristics were studied. The obtained results were analyzed.

A startup project has been developed. The following programs were used for calculation, modeling and design: Microsoft Office Word 2019, Microsoft Office Visio 2010, MathType 7.6, MATLAB R2014b.

ELECTRO-MECHANICAL SYSTEM, ESCALATOR, VECTOR CONTROL,  
ASYNCHRONOUS MOTOR, MATHEMATICAL MODEL, TRANSIENT  
PROCESSES, LOAD MOMENT

|           |       |               |                                                                                     |      |                                                                                  |                                             |             |                   |
|-----------|-------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|-------------------|
|           |       |               |                                                                                     |      | <i>141.2110.010.MD</i>                                                           |                                             |             |                   |
| Ch.       | Sheet | № document    | Sign                                                                                | Date | Дослідження режимів роботи<br>електромеханічної системи<br>тунельного ескалатора | <i>Лім</i>                                  | <i>Маса</i> | <i>Масштаб</i>    |
| Develop.  |       | Pashchak M.S. |  |      |                                                                                  | T                                           |             |                   |
| Check.    |       |               |                                                                                     |      |                                                                                  |                                             |             |                   |
| Executiv. |       | Pechenyk M.V. |                                                                                     |      |                                                                                  | <i>Sheet 8</i>                              |             | <i>Sheets 110</i> |
| N. contr. |       |               |                                                                                     |      |                                                                                  | Igor Sikorsky KPI, FEA,<br>AEMS-ED, EP-21mp |             |                   |
| Approv.   |       | Kovbasa S.M.  |                                                                                     |      |                                                                                  |                                             |             |                   |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                                              | <b>12</b> |
| <b>1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ<br/>СТОСОВНО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЕСКАЛАТОРА .....</b> | <b>14</b> |
| <b>1.1 Історія ескалаторобудування.....</b>                                                                    | <b>14</b> |
| <b>1.2 Аналіз конструкцій і режимів роботи ескалаторів(механічні частини<br/>та електроприводи).....</b>       | <b>20</b> |
| 1.2.1 Привід ескалатора.....                                                                                   | 22        |
| 1.2.2 Головний вал .....                                                                                       | 23        |
| 1.2.3 Натяжний пристрій сходового полотна.....                                                                 | 24        |
| 1.2.4 Ланцюг щаблів .....                                                                                      | 25        |
| 1.2.5 Поручень .....                                                                                           | 25        |
| 1.2.6 Типи електродвигунів.....                                                                                | 27        |
| 1.2.7 Режими роботи .....                                                                                      | 28        |
| <b>1.3 Аналіз систем керування асинхронним електроприводом .....</b>                                           | <b>29</b> |
| 1.3.1 Лінійна скалярна робоча характеристика перетворювача частоти .....                                       | 29        |
| 1.3.2 Квадратична скалярна робоча характеристика.....                                                          | 29        |
| 1.3.3 Системи керування з використанням векторно-керуваного<br>асинхронного електродвигуна.....                | 30        |
| 1.3.4 Векторне керування без зворотнього зв'язку .....                                                         | 31        |
| 1.3.5 Векторне керування з зворотнім зв'язком .....                                                            | 31        |
| <b>1.4 Формулювання вимог до електроприводу ескалатора .....</b>                                               | <b>32</b> |
| <b>2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ<br/>СИСТЕМИ.....</b>                                      | <b>35</b> |
| <b>2.1.1 Тяговий розрахунок та вибір електродвигуна ескалатору .....</b>                                       | <b>35</b> |

|                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.2 Розрахунок номінальних даних двигуна .....                                                                 | 39        |
| 2.1.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення .....                                                     | 40        |
| 2.2 Вибір перетворювача частоти .....                                                                            | 44        |
| 2.3 Аналіз розподілу навантаження ескалатора в межах технологічного циклу.....                                   | 45        |
| <b>3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....</b>                                                    | <b>49</b> |
| 3.1. Структурна схема об'єкта регулювання і передавальні функції окремих ланок. Синтез регулятора швидкості..... | 49        |
| 3.2 Розробка системи регулювання швидкості з урахуванням внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю .....      | 52        |
| 3.3 Математична модель асинхронного двигуна.....                                                                 | 54        |
| 3.4 Структура алгоритму непрямого векторного керування містить: ....                                             | 58        |
| <b>4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕСКАЛАТОРА.....</b>              | <b>63</b> |
| 4.1 Розробка моделі для дослідження. ....                                                                        | 63        |
| 4.2 Дослідження характеристик електромеханічної системи. ....                                                    | 65        |
| 4.2.1 Дослідження. Будній день, режим підйому вантажу. ....                                                      | 66        |
| 4.2.2 Дослідження. Будній день, режим спуску вантажу.....                                                        | 69        |
| 4.2.3 Дослідження. Вихідний день, режим підйому вантажу.....                                                     | 73        |
| 4.2.4 Дослідження. Будній день, режим підйому вантажу. ....                                                      | 77        |
| 4.2.5 Дослідження. Будній день, режим підйому вантажу із швидкістю $0.2 \cdot \omega_n$ .....                    | 80        |
| 4.3 Аналіз результатів досліджень. ....                                                                          | 84        |
| <b>5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ.....</b>                                                                           | <b>95</b> |
| 5.1 Опис ідеї проекту.....                                                                                       | 95        |
| 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....                                                                        | 97        |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....</b> | <b>97</b>  |
| <b>5.4 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту.....</b>          | <b>102</b> |
| <b>5.5 Розробка маркетингової програми проекту .....</b>             | <b>104</b> |
| <b>Висновки до розділу 5.....</b>                                    | <b>105</b> |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                | <b>106</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>                           | <b>108</b> |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Ескалатори є ключовими механізмами для переміщення пасажирів з одного рівня на інший, вони відзначаються великою продуктивністю та надійністю, що забезпечує безпеку та комфорт при транспортуванні, при цьому не забруднюючи навколишнє середовище. З появою багатоповерхових комплексів і транспортних вузлів, попит на ескалатори значно зростає.

Останнім часом велика увага приділяється питанням збільшення енергетичної ефективності і рівня експлуатаційної надійності. Це вирішується як за рахунок окремих конструкційних вузлів та елементів. Формування енергоефективних законів керування, використання сучасних керуючих пристроїв в тому числі – використання систем управління з векторним керуванням.

Разом з цим одну із головних моментів впливу на рівень вирішення вказаних завдань впливають вимоги до технологічного процесу, в тому числі і обмеження пов'язані з безпекою транспортування людей. Але для можливості розробки нових раціональних електромеханічних систем потрібно знати як енергетичні так і експлуатаційні характеристики ескалаторів. Тому досить актуальним завданням є дослідження цих характеристик для всіх можливих технологічних циклів роботи тунельних ескалаторів(робота на спуск людей, на підйом людей, характер завантаження в будні робочі дні та святкові і вихідні дні та ін.).

**Мета та задачі дослідження.** Провести дослідження енергетичних характеристик різних режимів роботи ескалатора впродовж технологічних циклів та розробити рекомендації щодо практичного використання результатів досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні види роботи:

1. Виконати аналітичний огляд науково-технічної літератури, конструкцій та режимів роботи ескалатора, та визначити раціональний варіант побудови електромеханічної системи.
2. Виконати розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи тунельного ескалатора.
3. Отримати математичні моделі елементів електромеханічної системи.
4. Розробити модель для дослідження статичних та динамічних режимів роботи ескалатора.
5. Провести дослідження режимів роботи ескалаторів у відповідності до технологічних циклів, провести аналіз отриманих результатів і розробити рекомендації по їх використанню.

**Об'єктом дослідження** магістерської дисертації є процеси, що відбуваються в електромеханічній системі при різних режимах роботи.

**Предметом дослідження** є електромеханічна система з векторно-керованим асинхронним електроприводом ескалатора метрополітену.

**Методи дослідження.** У магістерській дисертації для вирішення поставлених задач були використані методи теорії автоматичного керування, теорії електричних машин та методи математичного моделювання.

**Практична цінність.** Розроблена модель електромеханічної системи та отримані результати досліджень, а також доцільність використання систем електроприводів з векторно-керованими асинхронними електродвигунами, можуть бути використані при підготовці до модернізації та реконструкції тунельних ескалаторів метрополітену.

## **1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ СТОСОВНО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЕСКАЛАТОРА**

Ескалатори є підйомними пристроями, обладнаними рухомими сходами, які дозволяють людям переміщатися вгору і вниз. Сходи з'єднуються за допомогою закритого ланцюга та спеціальних механізмів і можуть рухатися завдяки роботі двигуна та редуктора. Ширина сходів ескалатора може досягати 1 метра, і ця величина залежить від типу та функціональних характеристик самого ескалатора. У верхній та нижній частині сходи переходять в рівні площадки, що дозволяє пасажиром легко виходити на них. Разом із рухом сходинок переміщаються також поручні, які розташовані по боках цього механізму. Ескалатор є однією із найважливіших складових технологічного процесу метрополітену, який разом з метропоїздом створює єдину систему для перевезення пасажирів під землею[1].

### **1.1 Історія ескалаторобудування**

У 1859 році було отримано перший патент на пристрій, схожий на ескалатор, який працював на паровій силі, виданий жителю Массачусетса. 15 березня 1892 року Джесс Рено отримав патент на свої рухомі сходи, або як він їх назвав - похилий ліфт. У 1895 році Рено вперше представив нововведення на Коні-Айленді, штат Нью-Йорк - це були рухомі сходи, які піднімали пасажирів на конвеєрі під кутом 25 градусів, відповідно до його запатентованого дизайну. Вже через два роки цей пристрій був встановлений в нью-йоркському парку Коні-Айленд і працював як атракціон для відвідувачів. Перший ескалатор дуже віддалено був схожий на сучасні механізми, які для нас стали звичні: адже це була гладка рухома доріжка, замість сходів на ескалаторі було встановлено поздовжні рифлі, які рухалися з-під підлоги через проміжки в гребінці[2]. Цікаво, що перший діючий ескалатор був винайдений К. Зеебергером спільно з компанією «Отіс». Уже у 1900 році цей винахід був представлений на виставці в Парижі. Сам ескалатор мав горизонтальні ступені, які виїжджали з-під спеціальної огорожі на вхідний майданчик і опускалися під огорожу вхідної

площадки з іншого боку. Пізніше ескалатор встановили в універсальному магазині «Гімбеля» в Філадельфії, де прослужив до 1938 року[3]. Вперше станцію метро обладнали ескалатором у Лондонському метрополітені. Ним обладнали станцію «Ерлс-корт» в 1911 році. У СРСР перші ескалатори з'явилися у Москві 1935 року. Як неважко здогадатися у столичному метрополітені на чотирьох станціях глибокого залягання.

Першими закордонними ескалаторами СРСР стали механізми від фінської фірми Kone. Але була необхідність створення своїх, радянських, ескалаторів. Із першопрохідців можна виділити Ленінградський завод «Червоний металіст» і завод «Підйомник». Ескалатори з назвою Е-1, що мали висоту 10 м встановили на станції «Охотний ряд». У них не було поручня, що рухався синхронно зі сходами, рука пасажирів ковзала по полірованих дубових перилах. Пізніше їх почали замінювати на більш перспективну конструкцію ескалаторів Н-20 – висотою 12 м і 20м, а також Н-40 – висотою 40 м. У 1951 р. було розроблено ескалатори ЕМ-1, ЕМ-4 і ЕМ-5 висотою 14, 40 і 50 м, а пізніше ЕМ- 5,5 висотою 55 м для Київського метрополітену і ЕЗ-5 висотою 5 м – для будівель. У 1960 р. відбулося відкриття Київського метрополітену. Ескалатори мали каскадне розташування з сумарною висотою підйому до 102,4 м. У 1960-ті роки виробництво тяглових ланцюгів для ескалаторів всіх типів та поверхових ескалаторів було передано в Україну, а саме на Стахановський машинобудівний завод. По призначенню ескалатори можна розподілити на наступні типи:

1. Тунельні ескалатори головним чином застосовуються у метрополітенах або інших спорудах з глибокими тунелями. Вони характеризуються великим пасажиропотоком та значною довжиною, що ставить особливі вимоги до міцності та надійності конструкцій. Кут нахилу сходового полотна таких ескалаторів до горизонту складає  $30^\circ$ , що забезпечує оптимальне співвідношення глибини та висоти сходів. Вони мають ширину сходів приблизно 1000 мм та висоту ступенів 200 мм, а їх висота може досягати 75 метрів. Більшість ескалаторів у метрополітені є ескалаторами загального користування і використовують виготовлені зі сталі сходинок. Існують певні відмінності між

ескалаторами загального користування та так званими компактними ескалаторами[4]. У конструкції цих ескалаторів важливою є можливість великоблочного монтажу, взаємозамінність складових частин, та можливість демонтажу окремих елементів через спеціальні люки чи шахти.

2. Міжповерхові ескалатори встановлюють у бізнес-центрах, адміністративних будівлях та торгово-розважальних комплексах. Вони відрізняються меншою висотою підйому, помірною швидкістю руху та можливістю використання їх для різних цілей, що дозволяє ефективно використовувати площу приміщень. Їх вимоги полягають у мінімальних габаритах та низькому рівні шуму.

3. Траволатори, які є безступінчастими конвеєрами, використовуються для транспортування великогабаритних вантажів або для переміщення людей з обмеженими можливостями. Вони рухаються горизонтально або під кутом до горизонту не більше  $12^\circ$ . З урахуванням цих особливостей, виробництвом ескалаторів та траволаторів займаються відомі компанії, пропонуючи різні рішення для різних потреб. Однак, порівняно з ліфтом, ескалатори мають свої переваги та обмеження, включаючи безперервність пасажиропотоку та вимоги до простору для встановлення[5].

Лідером у виробництві ескалаторів у світі є компанія OTIS. Вона випускає міжповерхові та тунельні типи ескалаторів, що довели свою високу надійність та ефективність в умовах інтенсивного навантаження: публічний ескалатор OTIS 513 NPE і комерційний ескалатор OTIS 506 NCE. Особливість, що характеризує ескалатори OTIS – це подовжене закруглення балюстради, що утворює плавну лінію – slimline. Використання такої форми не тільки надзвичайно виразно з точки зору дизайну, але і забезпечує додаткову безпеку пасажирів.[6] До речі, ескалатори OTIS відзначаються високими стандартами безпеки, які в значній мірі перевищують міжнародні вимоги. В сучасних ескалаторах також впроваджують різноманітні технології для енергозбереження. Деякі з них оснащують двофазною системою постійної швидкості, що дозволяє зменшити споживану енергію на до 30%. Функція гальмування ескалатора при відсутності

пасажирів і автоматичний старт при наближенні до нього допомагає зберігати енергію та запобігає передчасному зносу деталей. Двошвидкісний мотор при обмеженому або повному завантаженні допомагає зменшити витрати енергії на 50%. Сучасні частотні перетворювачі плавно регулюючи швидкість руху ескалатора при появі пасажирів дозволяють зекономити приблизно 60% електроенергії. Управління роботою сучасних ескалаторів стало набагато простіше, наприклад, ескалаторами THYSEN KRUPP можна керувати віддалено за допомогою кнопкової панелі або пульта, а деякі моделі навіть дозволяють керувати ними через мережу Інтернет. Також, оскільки ескалатори експлуатуються вже досить значний проміжок часу, виявляються певні конструкційні недоліки, що знижують експлуатаційний термін частин ескалатора і всієї системи в цілому або заважають експлуатації чи ремонту, пишуться наукові статті.

1) Оновлений підхід до моніторингу та огляду технічного стану приводної групи ескалатору – одного з найважливіших вузлів електромеханічної системи ескалатора. Внаслідок аналізу представлених дослідниками отриманих значень вібрації та визначення певних вібраційних зон приводних груп ескалаторних систем в залежності від діапазону потужності головного електродвигуна, що є найважливішим елементом у приводній групі. Результати дають можливість подальшого формулювання системи діагностичних ознак визначення технічного стану приводної групи. У результаті забезпечується досить швидке виявлення дефектів. Приведений спосіб моніторингу технічного стану приводної групи за рівнями вібрації головного приводу дає можливість покращити загальну організацію робіт із розробки та впровадження дій, що спрямовані на усунення дефектів та оцінку ефективності дій. [7]

2) Задача зменшення динамічних навантажень на тунельний ескалатор з проміжним приводом шляхом призначення його конструктивно-експлуатаційних характеристик на основі формулювання закономірності їх впливу на механічну систему ескалатора. Були розроблені рекомендації для визначення ключових характеристик конструкції та експлуатаційних параметрів

ескалаторів на стадіях їх проектування і подальшої роботи. Ці рекомендації представлені у вигляді спеціально розроблених алгоритмів для оптимального проектування ескалаторів, які використовують етапи моделювання динамічних характеристик машини. Також були розроблені та отримали патент конструктивні рішення для поручневої системи ескалатора. Ці рішення передбачають розміщення функцій підтримки та захисту на поручнях для забезпечення загального рівня продуктивності та надійності ескалатора. [8].

Нововведення для електромеханічних систем ескалатору активно розробляються та патентуються.

Конструкція ескалатору з додатковою напрямною, що допомагає більш рівномірно розподіляти навантаження. Оскільки під час руху ескалатора пасажери розподіляються на ньому нерівномірно, більше заповнюючи праву частину ескалатору. Розроблена конструкція спрямована на уникнення перекосу тягового ланцюга полотна сходинок відносно іншого. Такий результат досягається за рахунок розміщення додаткових напрямних у вигляді двох рейок на похилій ділянці ескалатора, а ролики сходинки монтуються послідовно в напрямку руху ескалатора[9].

Металоконструкція ферми ескалатору, що відрізняється від класичної більш зручним доступом до рухомих частин та різних вузлів, які розташовані всередині металевої конструкції для їхнього обслуговування та заміни. Для такого покращення конструкції верхню частину нижньої області нахилу секції роблять роз'ємною. Один кінець цієї роз'ємної області приєднаний за допомогою шарнірного з'єднання до нероз'ємної нижньої частини, а на іншому кінці створено з'єднувальний вузол, який може взаємодіяти з вузлом на верхній горизонтальній секції. На фундаменті встановлено підйомник, шток якого з'єднаний за допомогою шарнірного з'єднання з роз'ємною областю нахилу секції[ 10].

Удосконалення механізму приводу поручня ескалатора шляхом впровадження нового механізму, який забезпечує практично однакові кути обертання привідних роликів при збільшенні тиску захоплення. Це дозволить

уникнути деформацій у формі "S" на поручні при їх контакті з привідними роликами. Покращення конструкції полягає у наступному: в приводі поручня ескалатора, який складається з корпусу з бічними стінками та змонтованими в них кінцевими підшипниками, ексцентрично встановлені в цих підшипниках два паралельних вали. На кожному з валів закріплено привідний ролик для поручня, утворюючи захоплення між роликами для поручня. Згідно із винаходом, кінцеві підшипники пов'язані між собою, можуть обертатися у протилежних напрямках практично на однакові кути при збільшенні тиску захоплення [11].

Глобальна мережа в системі управління ескалаторами не лише відображає процеси, що відбуваються безпосередньо на ескалаторах, але також оперативно повідомляє про можливі збої та несправності, що значною мірою спрощує обслуговування та ремонт ескалаторів. Іноді ескалатори використовуються на схилах у містах з складним рельєфом як альтернатива фунікулеру[12].

Встановлення ліфтів та ескалаторів у міських центрах впливає на покращення загальної мобільності та вирішення транспортних проблем. Це може бути підкреслено кількома важливими аспектами:

1. Зменшення заторів: ліфти та ескалатори допомагають уникнути тиску та заторів на входах і виходах, що забезпечує плавний та ефективний рух людей.
2. Покращена доступність: ці системи забезпечують рівний доступ для всіх, зокрема для людей похилого віку та з обмеженими можливостями, що дозволяє їм комфортно та самостійно пересуватися в приміщеннях.
3. Економія часу: ліфти та ескалатори зменшують час пересування між поверхами, що підвищує продуктивність, особливо у великих комерційних будівлях.
4. Естетична привабливість: сучасні дизайни ліфтів та ескалаторів можуть зробити будівлі архітектурними шедеврами, підвищуючи візуальну привабливість міських просторів. Ці системи сприяють оптимізації транспортного потоку в містах, створюючи безперебійні маршрути та поліпшуючи загальний досвід для мешканців та відвідувачів. Загалом, підвищення міської мобільності є важливим аспектом для сталого розвитку міст.

Системи ліфтів та ескалаторів є практичними рішеннями для ефективного переміщення вертикально, оптимізації транспортного потоку та поліпшення доступності. Завдяки постійному прогресу в технологіях та дизайні, ці системи продовжують розвиватися, відіграючи все більш важливу роль у створенні ефективних міських середовищ[13].

## 1.2 Аналіз конструкцій і режимів роботи ескалаторів(механічні частини та електроприводи)

Загальний вигляд ескалатора показаний рисунку 1

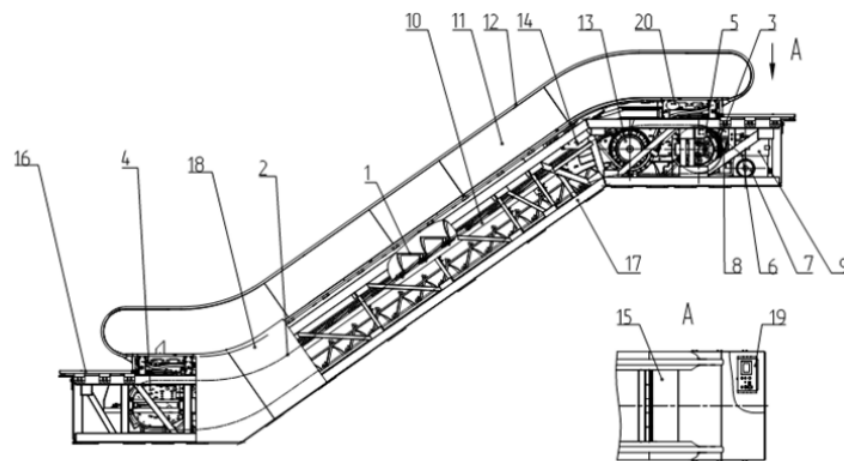


Рисунок 1 – Схема ескалатора

Основне обладнання ескалатора складається з наступних частин:

1.Сходи, 2.Тягові ланцюги, 3.Тягові зірочки, 4.Натяжний пристрій, 5.Головний вал, 6.Приводний ланцюг, 7.Приводні зірочки, 8.Приводні зірочки, 9.Привід, 10.Напрявні, 11.Балюстрада, 12.Поручень, 13.Привід поручня, 14. Натяжний пристрій поручня, 15.Вхідний майданчик, 16.Плити перекриття, 17.Рама, 18.Обшивка, 19.Станція керування, 20.Кнопка-ключ

Ескалатор (рис. 1) являє собою похилий ланцюговий конвеєр, сходове полотно якого утворене ступенями (1), шарнірно закріпленими на тягових

ланцюгах (2) і утворюють замкнуте сходове полотно, при цьому полотно огинає тягові зірочки (3) і натяжний пристрій (4)[14].

Тягові зірки (3) закріплені на головному валі (5) і за допомогою ланцюгової передачі, що складається з приводного ланцюга (6), приводних зірочок (7,8) наводиться в рух приводом (9). Натяжний пристрій (4) здійснює натяг сходового полотна.

Щаблі (палети) переміщуються по напрямних (10), що забезпечують горизонтальне положення настилів сходів на всіх ділянках робочої гілки сходового полотна. Поверхня настилів та сходинок має рифлення. Виступи задніх кромek настилів входять до западин підступників, що забезпечує безпеку пасажирів при їх переміщенні на сходовому полотні.

Щаблі (палети) огорожені балюстрадою (11), що відокремлює пасажирів що рухаються на сходовому полотні від механізмів та металоконструкцій з метою забезпечення їх безпеки. Нижньою частиною балюстради є фартухи-щити, розташовані у зоні переміщення щаблів робочої гілки сходового полотна. Над фартухами встановлюються плінтуси балюстради. На шибках балюстради закріплені направляючі поручня, якими переміщається поручень (12).

Поручневий пристрій, що включає привід поручня (13), натяжний пристрій поручня (14), направляючі поручня забезпечують синхронний рух поручня зі сходовим полотном. Відхилення швидкості руху поручня від швидкості полотна трохи більше 2%.

Гребінки та вхідні майданчики (15) встановлені на нижньому та верхньому входах ескалатора. Гребінки мають виступи, що входять до западини настилів сходів, з метою забезпечення безпечного входу та сходження пасажирів. Над приводним та натяжним відділенням ескалатора встановлені плити перекриття (16).

Ескалатор забезпечений блокувальними пристроями, що відключають двигуни у разі порушення нормальної роботи ескалатора та його складових частин. Усі механізми ескалатора встановлені у рамі (17), бічні сторони якої закриті обшивкою (18).

Ескалатор приводиться у дію автоматизованим електроприводом. Станція керування (19) розташована в приводному відділенні ескалатора. Управління ескалатором здійснюється за допомогою кнопок-ключів (20), розташованих у верхній та нижній частинах ескалатора.

### 1.2.1 Привід ескалатора

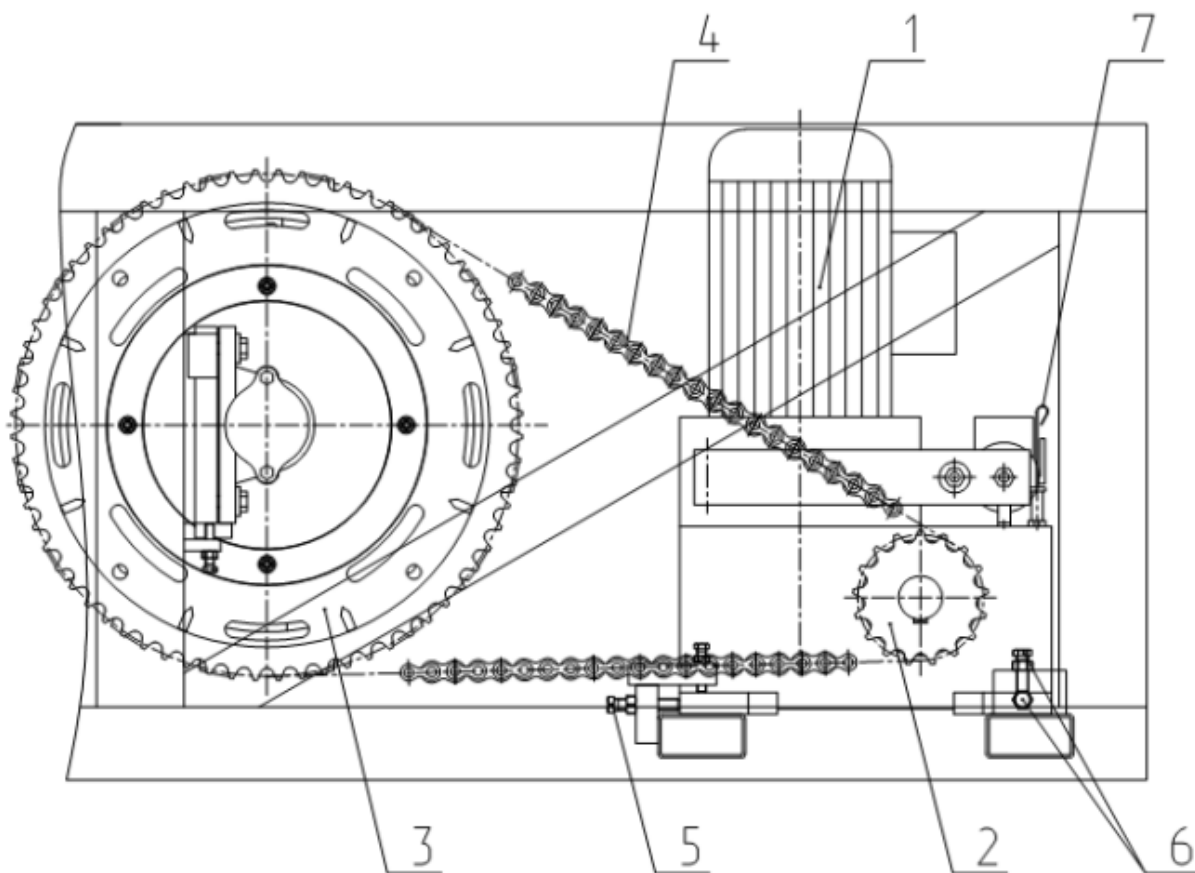


Рисунок 1.2 – Привід ескалатора

Привід розміщується у верхній зоні ескалатора конвеєра пасажирського) у прямці приводного відділення. Привід рис. 1.3) складається з мотор-редуктора із вбудованим гальмівним механізмом 1, зафіксованого на рамі за допомогою болтів 6). На вихідному валу мотор-редуктора встановлена привідна зірочка 2), через яку за допомогою дворядного приводного ланцюга (4) передається обертання на привідну зірочку (3), зафіксовану на головному валу ескалатора.

Натяг приводного ланцюга здійснюється болтом (5). Для контролю рівня олії в редукторі служить щуп (7). Зверху двигуна розташоване електромеханічне стрічкове гальмо. Коли гальмо не застосовується, зазор між гальмівним маховиком та стрічкою гальма має перебувати в межах 0,7 – 1,2 мм. Необхідно впевнитись у справному стані механізму гальма, а також у тому, що при застосування гальма двигун не працює. Гальма має відповідати належний момент сили, а гальмівний шлях має бути відрегульований у межах 0,2 – 0,8 м при роботі без навантаження у низхідному напрямку при швидкості 0,5 м/с.).

### 1.2.2 Головний вал

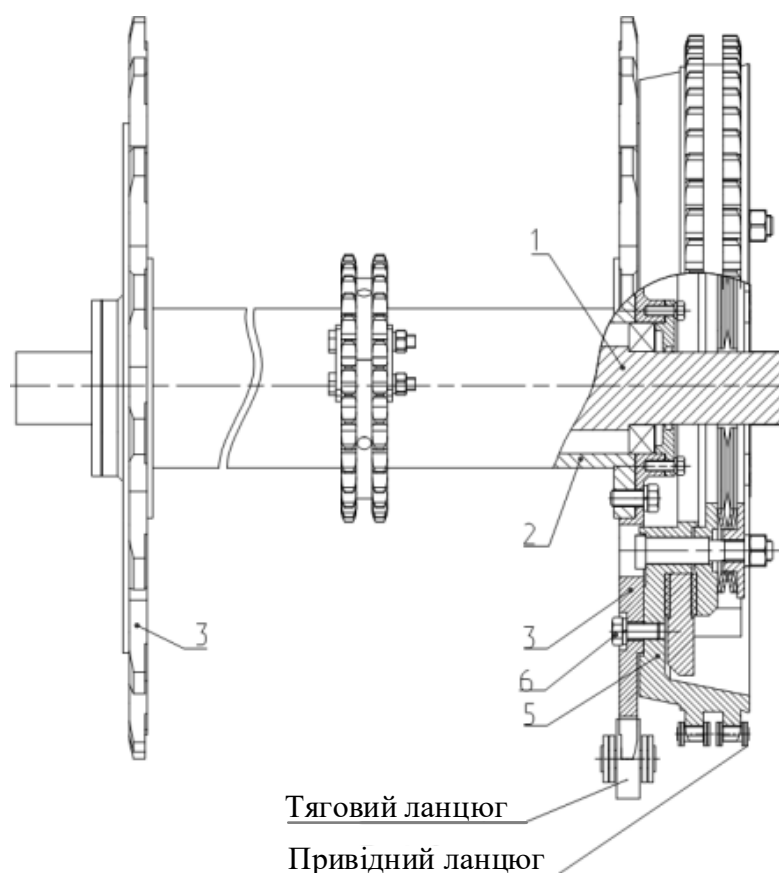


Рисунок 1.3 – Головний вал

Головний вал (рис. 1.3) призначений передачі руху тяговим ланцюгам сходового полотна. Головний вал складається з валу (1), який через підшипники встановлений зовнішній вал (2), до якого приварені фланці. На фланцях

встановлені тягові зірочки (3) і приводна зірочка (5), зафіксовані при допомоги болтів (6). Вал (1) через опори фіксується щодо рами.

### 1.2.3 Натяжний пристрій сходового полотна

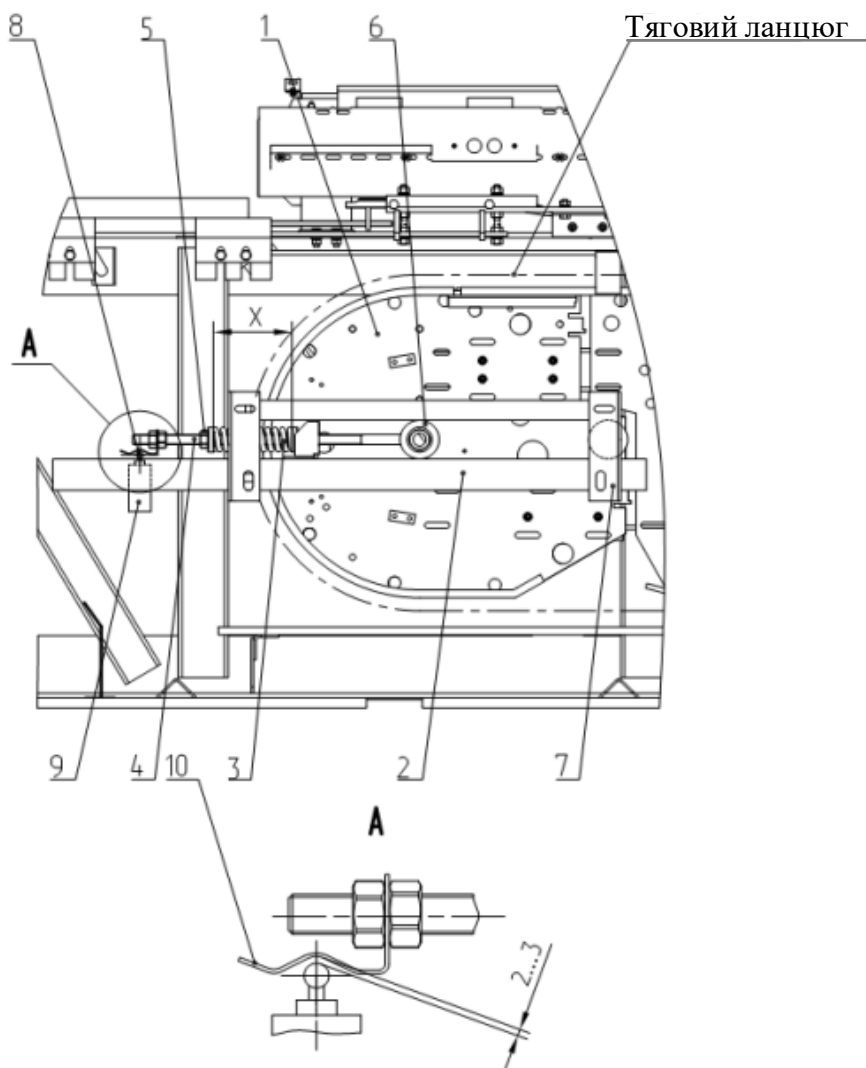


Рисунок 1.4 – Головний вал

Натяжний пристрій рис. 1.4) призначений для натягу тягових ланцюгів ескалатора або конвеєра. Натяжний пристрій складається з двох блоків (1), з'єднаних між собою двома привареними поперечними валами (6). Натяжний пристрій переміщається по напрямних (2), які фіксовані до рами через кронштейни (7). Зусилля натягу тягових ланцюгів задається пружинами (3) через

шпильки (4). Величина стиснення пружини 3 згідно з таблицею (1). Для контролю надмірного розтягування та обриву ланцюга встановлені вимикачі (8).

#### 1.2.4 Ланцюг щаблів

Структура ланцюга:

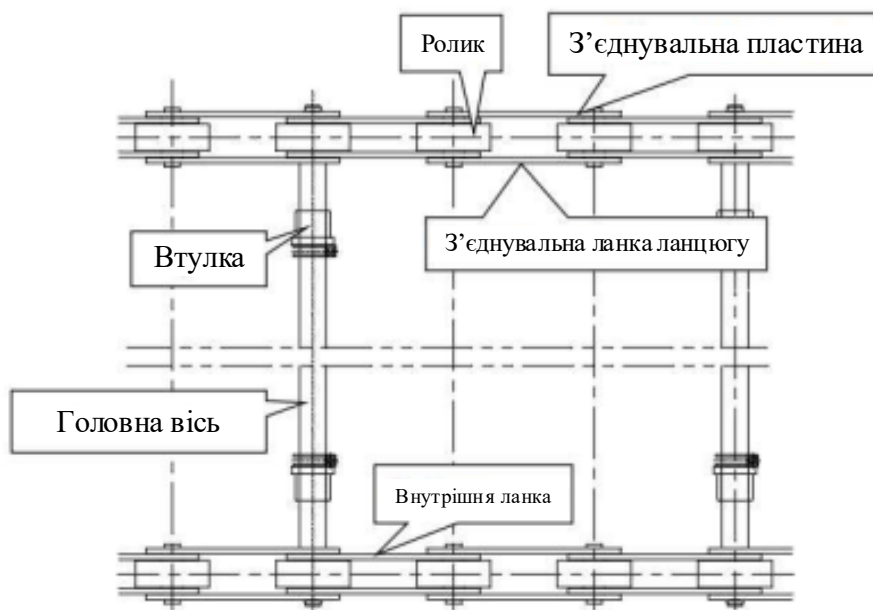


Рисунок 1.5 – Структура ланцюга

#### 1.2.5 Поручень

Поручневий пристрій призначений для приводу поручня, що служить для опори рук пасажирів, що знаходяться на сходовому полотні з метою забезпечення безпеки та зручності пасажирів. Поручневий пристрій рис. 1.6) складається з поручня, приводного пристрою, натяжного пристрою та направляючих траси поручня. Привідний пристрій поручня складається з гумового шківа (1) встановленого на валу, який приводиться в обертання приводним ланцюгом, від головного валу. Для притискання поручня до шківа (1) служить батарея роликів (4), яка підтискається за допомогою пружини (7). Для рівномірного натягу поручня по всій довжині встановлені батареї роликів (5,6).

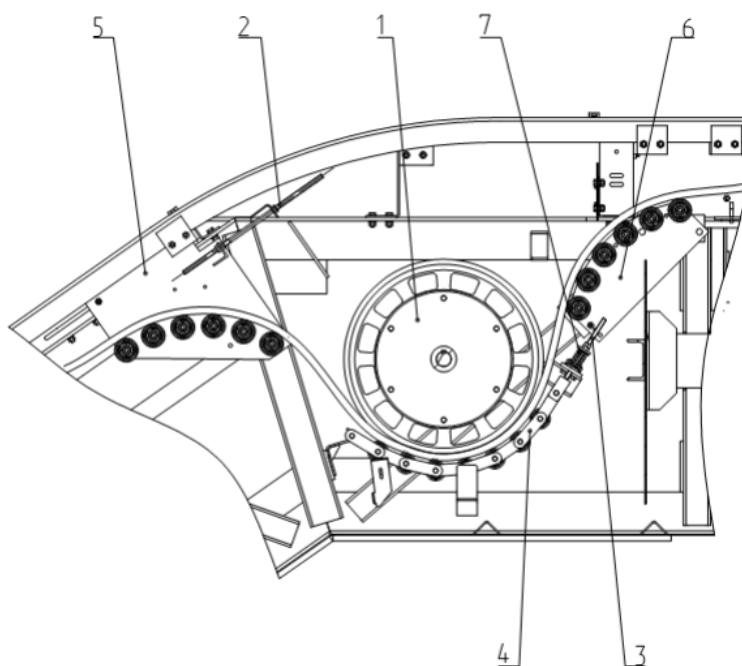


Рисунок 1.6 – Пристрій поручня

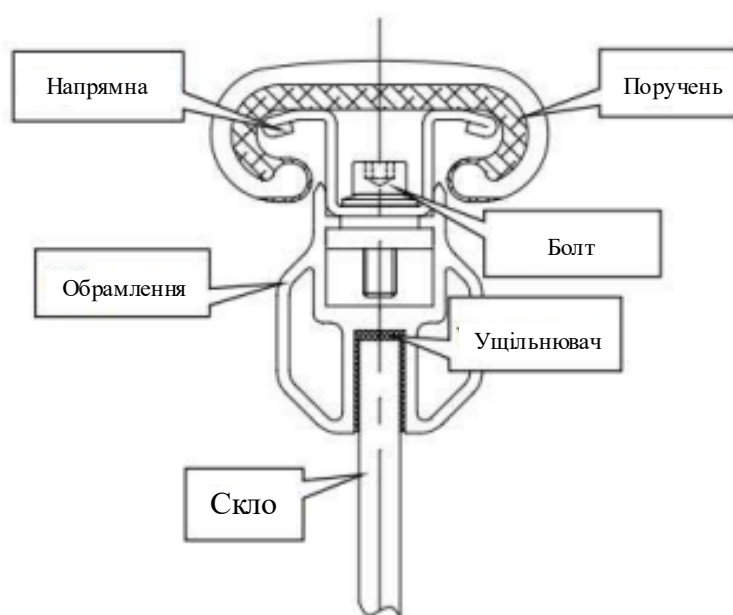


Рисунок 1.7 – Конструкція поручня

### 1.2.6 Типи електродвигунів

Головний привід ескалатора використовується для переміщення сходинок ескалатора з потрібною робочою швидкістю. Усередині цього приводу є встановлені гальма, які призначені для роботи в звичайному режимі та в аварійних ситуаціях. Крім цього, привід має систему електромеханічних пристроїв захисту. У поверхневих ескаляторах також присутні автоматичні пристрої для включення або вимкнення ескалатора. Продуктивність ескалатора залежить від ширини сходинок та швидкості руху. Наприклад, якщо швидкість ескалатора становить 0,5 м/с, то він може перевозити 8000 людей за годину. З підвищенням швидкості до 0,9 м/с, ескалатор зможе перевозити 11 000 людей за годину. Потужність двигуна ескалатора визначається додаванням опору полотна і поручнів[15].

Для головного приводу ескалаторів застосовуються трифазні асинхронні електродвигуни з фазним ротором напругою 380 вольт, а для допоміжного - асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором напругою 380 вольт. Потужність двигунів залежить від довжини дорожньої стрічки в межах від 70 до 200 кіловат. Для станцій малого завантаження з висотою до 20 метрів, як правило, застосовується асинхронний двигун з короткозамкненим ротором потужністю від 12 до 55 кіловат. Для станцій глибокого залягання від 50 метрів можуть використовуватись асинхронні двигуни потужністю 200 кВт. У головних приводах ескалаторів, як правило, використовуються електродвигуни серій АКЕМ, 4АНК і АКЕ, а в допоміжних - серій 4А, АІРМ132, АОФ-51-4.

Електродвигуни з короткозамкненим ротором мають ряд позитивних якостей, які надають їм перевагу перед іншими типами електродвигунів. Їх конструкція простіша, виготовлення дешевше, і вони надійні в експлуатації. Однак електродвигуни з короткозамкненим ротором великої потужності не можуть бути використані через великі струми пуску, які в 5-7 разів перевищують номінальний струм електродвигуна. При пуску такого електродвигуна через споживання великого струму пуску на одному з живильних фідерів може відбутися зниження напруги. Зазвичай електрична апаратура ескалаторів

допускає зниження напруги не більше 15%, і при великих зниженнях напруги немає гарантії нормальної роботи апаратури ескалаторів. З цих причин в головних приводах ескалаторів з великою висотою підйому не використовуються електродвигуни з короткозамкненим ротором, а застосовуються двигуни з фазним ротором.

Електродвигун ескалатора повинен забезпечити не лише запуск ескалатора з розрахунковим навантаженням, але і пуск ескалатора, що працював при підйомі з пасажирями, після його раптової зупинки при розрахунковому заповненні сходової стрічки. У цьому випадку електродвигуну доводиться подолати великі зусилля для переведення сходової стрічки зі статичного стану в рух. Ці зусилля значно більше, ніж ті, які повинен розвивати електродвигун для переміщення вже рухомої сходової стрічки. Виходячи з цих міркувань, електродвигуни для ескалаторів вибираються з великим пусковим моментом, кратність якого, приблизно в два рази більше, в порівнянні з номінальним моментом. Як у вітчизняній так і в закордонній практиці в ескалаторобудуванні в силу його переваг над електродвигуном постійного струму в основному використовується асинхронний електропривод.

### **1.2.7 Режими роботи**

Характерною особливістю електропривода ескалатора являється суттєво змінний характер навантаження. Зниження навантаження вдень та особливо пізно увечері доходить до 5 - 10 % від номінального. В той же час потужність приводного двигуна, згідно з нормативними документами, обирається в 2 рази більшою максимально можливого завантаження ескалатора. У наслідок цього на протязі більшої частини часу електропривод ескалатора працює в режимах значного недовантаження, для яких характерний низький ККД, тобто, є суттєві резерви прямої економії електричної енергії. Переключення релейно-контакторної апаратури, на основі якої виконана система управління більшості ескалаторних установок, що експлуатуються, прямий пуск приводного двигуна який викликає електричні та механічні ударні навантаження, прискорюють знос

обладнання. Електроприводи в ескалаторних установках найчастіше в неперервному режимі роботи. При ускладненні управління ескалатором можливий повторно короткочасний режим та неперервний режим з сповільненим рухом.

### **1.3 Аналіз систем керування асинхронним електроприводом**

Перетворювач частоти регулює момент і швидкість обертання асинхронного електродвигуна, використовуючи один з двох основних методів частотного керування - скалярний або векторний[16]. Розглянемо докладніше особливості цих методів.

#### **1.3.1 Лінійна скалярна робоча характеристика перетворювача частоти**

При роботі асинхронного електродвигуна від скалярного частотного перетворювача напруга на двигуні знижується лінійно зі зменшенням частоти. Це стається через те, що використовується широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), при якій відношення діючої напруги до частоти є константою у всьому діапазоні регулювання. Вольт-частотна (вольт-герцова) робоча характеристика ПЧ буде лінійною, поки напруга не досягне межі, визначеної напругою живлення перетворювача. Скалярне управління не дозволяє двигуну розвивати потрібну потужність на низьких частотах (потужність залежить від напруги), і момент на валу значно падає.

#### **1.3.2 Квадратична скалярна робоча характеристика**

У деяких випадках, наприклад, при роботі перетворювача на потужні вентилятори і насоси, використовують квадратичну вольт-частотну характеристику з пониженим моментом, що дозволяє враховувати механіку процесу, знижувати струми і, відповідно, втрати на низьких частотах. Основний мінус скалярної вольт-частотної характеристики У лінійній і квадратичній вольт-частотній залежності, не зважаючи на їхню простоту і широке поширення, є великий мінус - зниження потужності на валу, а отже, зниження моменту і

швидкості обертання двигуна. При цьому відбувається так зване ковзання, коли частота обертання ротора відстає від частоти обертання електромагнітного поля. Для усунення цього ефекту використовується компенсація ковзання, яка дозволяє коригувати вихідну частоту (оберти двигуна) при збільшенні моменту навантаження. Якщо правильно вибрати значення компенсації, фактична швидкість обертання при великому навантаженні буде наближатися до швидкості обертання при холостому ході. Крім того, в більшості ПЧ з лінійною вольт-частотною характеристикою є функція компенсації моменту на низьких швидкостях. Ця функція реалізується за рахунок підвищення напруги на низьких частотах і при неправильному застосуванні може спричинити перегрів двигуна. Обидва параметри компенсації мають незмінне (встановлене під час налаштування) значення і не залежать від навантаження.

### **1.3.3 Системи керування з використанням векторно-керуваного асинхронного електродвигуна**

Існує безліч завдань, коли потрібно забезпечити задану частоту обертання, і описаний недолік стає дуже актуальним. У таких випадках використовують векторне частотне керування, при якому контролер обчислює напругу, необхідну для підтримки моменту, що забезпечує стабільну частоту. На відміну від скалярного режиму тут відбувається "розумне" керування магнітним потоком ротора.

Векторне керування асинхронним двигуном особливо актуально на низьких частотах - нижче 10 Гц, коли робочий момент двигуна сильно падає. Крім того, цей метод дозволяє підтримувати стабільну швидкість (з передбачуваним лінійним змінням) при розгоні. Це досягається завдяки високому пусковому моменту, аж до того моменту, коли двигун переходить в режим. Важливо відзначити, що векторне керування призводить до збереження електроенергії (у деяких випадках - до 60%), оскільки більшу частину часу частотний перетворювач передає в двигун рівно стільки енергії, скільки необхідно для підтримки заданої швидкості. Розрізняють два види векторного

керування - без датчика швидкості (без зворотного зв'язку, або бездатчикове) і з зворотним зв'язком, коли в якості датчика, як правило, використовується енкодер[17].

#### **1.3.4 Векторне керування без зворотнього зв'язку**

У цьому випадку частотний перетворювач обчислює швидкість обертання двигуна за математичною моделлю на основі раніше введених даних (параметрів двигуна) і даних про миттєві значення струму і напруги. Опираючись на отримані розрахунки, ЧПП приймає рішення про зміну вихідної напруги. Перед включенням векторного бездатчикового режиму необхідно ретельно налаштувати номінальні параметри двигуна: напругу, струм, частоту, швидкість (оберти), потужність, кількість полюсів, а також опір обмоток і індуктивні параметри. Якщо якісь значення невідомі, рекомендується провести автотестування двигуна на холостому ході. Деякі моделі векторних перетворювачів частоти автоматично встановлюють параметри за замовчуванням для стандартного двигуна після введення номінальних значень. Також необхідно визначити межі часових і струмових параметрів векторного керування.

#### **1.3.5 Векторне керування з зворотнім зв'язком**

Цей режим відрізняється більшою точністю управління швидкістю двигуна. Зворотній зв'язок забезпечує енкодер, який з'єднується з частотним перетворювачем через додатковий модуль. Енкодер встановлюється на валу електродвигуна або наступного механізму і передає дані про поточну частоту обертання. На основі отриманої інформації перетворювач змінює напругу, момент і, відповідно, швидкість двигуна. Слід додати, що при великих динамічних навантаженнях (частих змінах моменту) та роботі на понижених швидкостях рекомендується застосовувати примусове охолодження зовнішнім вентилятором.

Підсумовуючи, можна виділити векторне керування, як оптимальне для сучасних електроприводів з кількох причин. По-перше, цей метод дозволяє досягти високої точності та ефективності управління електродвигуном. Векторне керування забезпечує більш точний контроль над напругою та струмом, що дозволяє оптимізувати роботу двигуна з урахуванням різних умов роботи.

Крім того, векторне керування дозволяє зменшити споживання енергії та підвищити ефективність роботи електродвигуна, оскільки може точно регулювати швидкість та обертовий момент двигуна, використовуючи оптимальні режими роботи. В результаті це сприяє економії електроенергії та збільшенню тривалості служби обладнання.

#### **1.4 Формулювання вимог до електроприводу ескалатора**

Формулюючи вимоги безпечної та надійної експлуатації, слід звернутися до ГОСТ Р 54765-2011 «ЕСКАЛАТОРИ І КОНВЕЄРИ ПАСАЖИРСЬКІ»[18]. Туди входять обов'язкові вимоги, що регулюють проектування, виготовлення та експлуатацію цих систем, забезпечуючи безпеку користувачів та надійну роботу обладнання. Нижче приведені вимоги до приводу:

1. Привід повинен рухати лише один ескалатор або пасажирський конвеєр.

2. Привід повинен забезпечувати рух несучого полотна з рекомендованими швидкостями — номінальною (до 0.75 м/с) та ремонтною (до 0.04 м/с) — відповідно до вимог техніки експлуатації ескалаторів[18]. При використанні допоміжного приводу для ремонтної швидкості, його активація має бути виключена при роботі основного приводу.

3. Привід ескалатора/пасажирського конвеєра важкого режиму роботи повинен розраховуватися на безперервну роботу протягом 140 годин/тиждень з еквівалентним навантаженням  $0.63 q_{м.е.}$ , при цьому не менше 3 годин безперервної роботи за будь-який інтервал часу 6 годин з середньогодинним

навантаженням  $0.83 q_{м.е.}$  та пуск ескалатора/пасажирського конвеєра в будь-якому напрямку з навантаженням  $q_{м.е.}$ .

4. Потужність допоміжного приводу має бути достатньою для виконання монтажно-ремонтних операцій, технічного обслуговування та для розгальмовування додаткового гальма (за потреби).

5. Пуск ескалатора/пасажирського конвеєра повинен забезпечувати плавний розгін несучого полотна з прискоренням не більше  $0,75 \text{ м/с}^2$ .

6. На одному з валів приводу (зазвичай швидкохідному) повинне бути працююче гальмо. З'єднання валу робочого гальма з приводними зірочками сходів/пластинами або барабаном стрічки повинні використовувати переважно нефрикційні елементи, такі як вали, шестерні, багаторядні ланцюги або щонайменше два однорядні ланцюги. Використання фрикційних елементів, таких як клинові ремені (за винятком плоских ременів), потребує додаткового гальма. У приводах ескалаторів та пасажирських конвеєрів з кутом нахилу понад  $6^\circ$  важкого режиму роботи застосування фрикційних елементів не допускається.

7. У з'єднаннях, що передають крутний момент, не допускається застосування посадок з гарантованим натягом без додаткового кріплення (шпонками, болтами тощо).

8. Для привідних ланцюгів на ескалаторах або пасажирських конвеєрах важкого режиму має бути запас міцності не менше 7. Для привідних ланцюгів або клинових ременів на ескалаторах або пасажирських конвеєрах нормального режиму має бути запас міцності не менше 5. Запас міцності визначають як відношення розривного зусилля ланцюга/ременя до найбільшого розрахункового натягу при навантаженні  $q_{м.е.}$ . При використанні клинових ременів має бути не менше трьох ременів.

9. Ручний привід ескалатора або пасажирського конвеєра має бути легкодоступним та безпечним у використанні. Використання кривошипних рукояток або штурвалів зі спицями не допускається.

10. Під час активації допоміжного приводу або встановлення ручного приводу, блокування має вимикати основний привід.

### **Висновки до розділу 1**

На основі науково-технічної літератури був проведений аналіз режимів роботи і конструкцій ескалаторів. В результаті порівнювального аналізу ряду систем електроприводів обрана, як найкраща, система з використанням векторно-керованого асинхронного електродвигуна.

Отримані результати дають можливість сформувати структуру електромеханічної системи, яка необхідна для розрахунку і вибору її елементів.

## 2 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1.1 Тяговий розрахунок та вибір електродвигуна ескалатору

Щоб визначити двигун для системи ескалатора, були використані величини що наведені в таблиці 2.1. Розрахунок виконувався згідно методики приведеної у довіднику.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для визначення потужності двигуна

| Параметри                                          | Значення |
|----------------------------------------------------|----------|
| Висота ескалатора, Н                               | 55 м     |
| Нахил поверхні, $\alpha$                           | 30°      |
| Ширина ступені ескалатора, $S_{ш}$                 | 1 м      |
| Глибина опорної плити сходища ескалатора, $S_{ст}$ | 0.4 м    |
| Крок сходищів у полотні, $a_c$                     | 0.450 м  |
| Маса сходища, $m_c$                                | 26 кг    |
| Середня маса одного пасажирів, $m$                 | 69 кг    |
| Погонна маса ланцюга, $m_{л}$                      | 32 кг/м  |
| Діаметр розподільного кола приводної зірочки, D    | 1.7 м    |
| Швидкість руху, v                                  | 0.75 м/с |

Відповідно до рекомендацій з проектування ескалаторів приймаємо передаточне число редуктора  $i=100$  і ККД двигуна 90 % [19]

Радіуса приведення:

$$\rho = \frac{D}{2i_p} = \frac{1.7}{2 \cdot 100} = 0.0085 \text{ м} \quad (2.1)$$

Швидкість обертання двигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = \frac{v}{\rho} = \frac{0.75}{0.0085} = 88.2 \text{ с}^{-1} \quad (2.2)$$

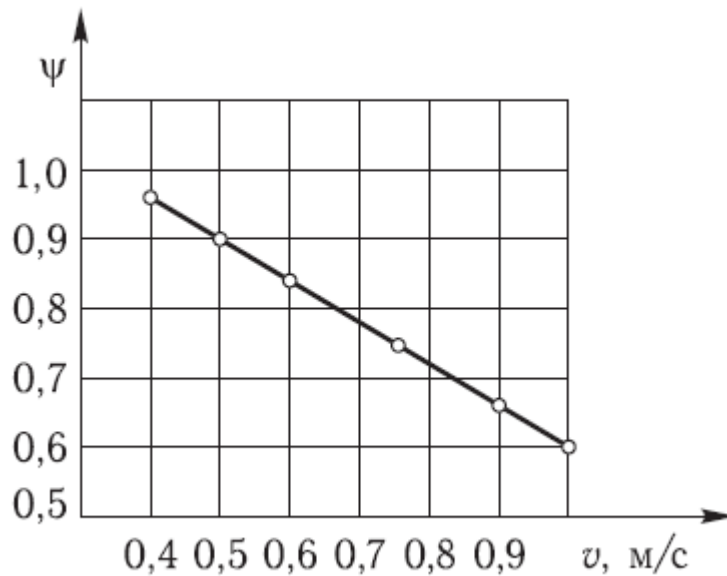


Рисунок 2.1 – Графік залежності коефіцієнта заповнення сходових кроків від швидкості ескалатора

Продуктивність ескалатора:

$$\Pi_r = 3600 \cdot \frac{\psi \cdot z \cdot v}{a_c} = 3600 \cdot \frac{0.75 \cdot 2 \cdot 0.75}{0.405} = 10000 \text{ чол/год}, \quad (2.3)$$

де  $\psi = 0.75$  - коефіцієнт заповнення сходових кроків, а  $z$  – кількість пасажирів на одній ступені ескалатора.

Погонне навантаження від ваги пасажирів:

$$q = \frac{\Pi \cdot m \cdot g}{3600 \cdot v} = \frac{9000 \cdot 69 \cdot 9.8}{3600 \cdot 0.75} = 2254 \text{ Н/м} \quad (2.4)$$

На ескалаторі навантаження на погонний метр буде дорівнювати:

$$F_{\Pi} = q \cdot \sin \alpha = 2254 \cdot 0.5 = 1127 \text{ Н} \quad (2.5)$$

Сумарне навантаження:

$$F_{\Sigma} = q \cdot l = 1127 \cdot 110 = 124 \text{ кН} \quad (2.6)$$

Статичний момент навантаження:

$$M_c = \frac{F \cdot \rho}{\eta} = \frac{124000 \cdot 0.0085}{0.9} = 1171 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.7)$$

Максимальний момент з урахування коефіцієнта запасу:

$$M_{\max} = M_c \cdot k_z = 1171 \cdot 1.15 = 1347 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.8)$$

де  $k$  - коефіцієнт запасу, що враховує динамічні режими роботи системи, що обирається в межах (1.1-1.2)

Звідси потужність двигуна:

$$P_{\text{дв}} = M_{\max} \cdot \omega_{\text{дв}} = 1347 \cdot 88.2 = 118.8 \text{ кВт} \quad (2.9)$$

Розрахункова швидкість обертання:

$$n = \frac{30 \cdot \omega_{\text{дв}}}{\pi} = \frac{30 \cdot 88.2}{3.14} = 842.7 \text{ об / хв} \quad (2.10)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3.14 \cdot 674.4}{30} = 70.6 \text{ рад / с} \quad (2.11)$$

Розрахувавши проміжні параметри, з каталогу [20] можемо обрати асинхронний двигун 4А315М6У3. Електродвигун 4А315М6 У3 потужністю 132 кВт і швидкістю 1000 об/хв знайшов широке застосування в усіх галузях промисловості. З високими показниками надійності електродвигун 4А315М6 є достатньо бюджетним рішенням, оскільки постачається виключно зі складських запасів після ревізійних робіт. Порівнявши 4А315М6 з іншими типами машин з такою ж потужністю і обертаннями, ціна електродвигуна 4А315М6 знаходиться в нижньому ціновому діапазоні і варіюється в межах 82000-110000 грн, залежно від постачальника. Також ціна 4А315М6 залежить від форми оплати та тривалості надання гарантійного строку. Електродвигун 4А315М6 132/1000 застосовується у широкому спектрі електричних установок, наприклад: компресори, вентилятори, насоси або ескалатори[21]. Паспортні дані приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані вибраного двигуна 132кВт 4А315М6У3

|                                                                |                                   |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Номінальна потужність, $P_{2n}$                                | 132 кВт                           |
| Номінальне значення лінійної напруги статора, $U_{1n}$         | 380 В                             |
| Число пар полюсів, $p_n$                                       | 3                                 |
| Момент інерції, $J_d$                                          | $4.5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ |
| Коефіцієнт корисної дії, $\eta$                                | 0.94                              |
| Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$                          | 0.9                               |
| Перевантажувальна здатність, $\lambda$                         | 2.2                               |
| Номінальне ковзання, $s_n$                                     | 0.017                             |
| Критичне ковзання, $s_k$                                       | 0.08                              |
| Номінальна частота напруги статора, $f$                        | 50 Гц                             |
| <b>Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)</b> |                                   |
| Індуктивний опір розсіювання статора, $\overline{x_1}$         | 0.01                              |

|                                                                    |       |
|--------------------------------------------------------------------|-------|
| Активний опір статора, $\overline{R_1}'$                           | 0.023 |
| Приведений індуктивний опір розсіювання ротора, $\overline{x_2}''$ | 0.12  |
| Приведений активний опір ротора, $\overline{R_2}''$                | 0.018 |
| Індуктивний опір намагнічуючого контуру, $\overline{x_\mu}$        | 3.5   |

### 2.1.2 Розрахунок номінальних даних двигуна 4A315M6УЗ

Значення кутової частоти напруги статора:

$$\omega_{0n} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад / с} \quad (2.12)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{3} = 104.7 \text{ рад / с} \quad (2.13)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 104.7 (1 - 0.017) = 103.1 \text{ рад / с} \quad (2.14)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{132000}{103.1} = 1281 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.15)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності  $\lambda = 2.2$  з каталогу):

$$M_k = \lambda \cdot M_n = 2.3 \cdot 1281 = 2817 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.16)$$

Номинальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В} \quad (2.17)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{132000}{3 \cdot 220 \cdot 0.94 \cdot 0.9} = 237.1 \text{ А} \quad (2.18)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} \cdot U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 310.3 \text{ В} \quad (2.19)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} \cdot I_n = \sqrt{2} \cdot 237.1 = 335.2 \text{ А} \quad (2.20)$$

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

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{310.3}{314} = 0.988 \text{ Вб} \quad (2.21)$$

### 2.1.3 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Модель асинхронного двигуна(АД) була отримана для Т-подібної схеми заміщення. Вона показана на рис. 2.1. Однак параметри, приведені у каталозі, відповідають Г-подібній схемі заміщення, що зображена на рис. 2.2. При перерахунку необхідних параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується приведена нижче методика:

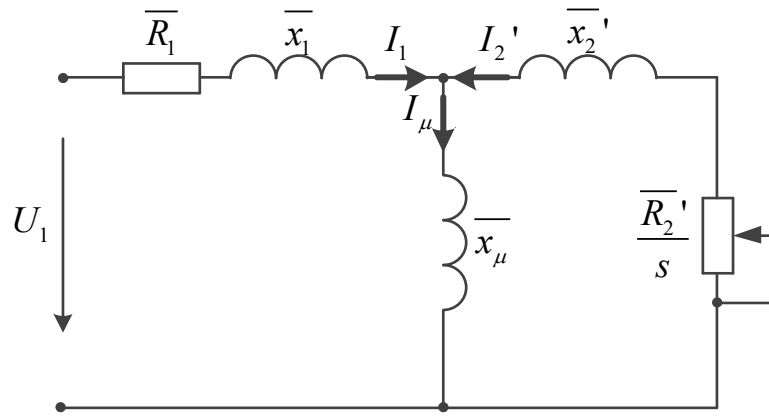


Рисунок 2.2 – Т-подібна схема заміщення АД

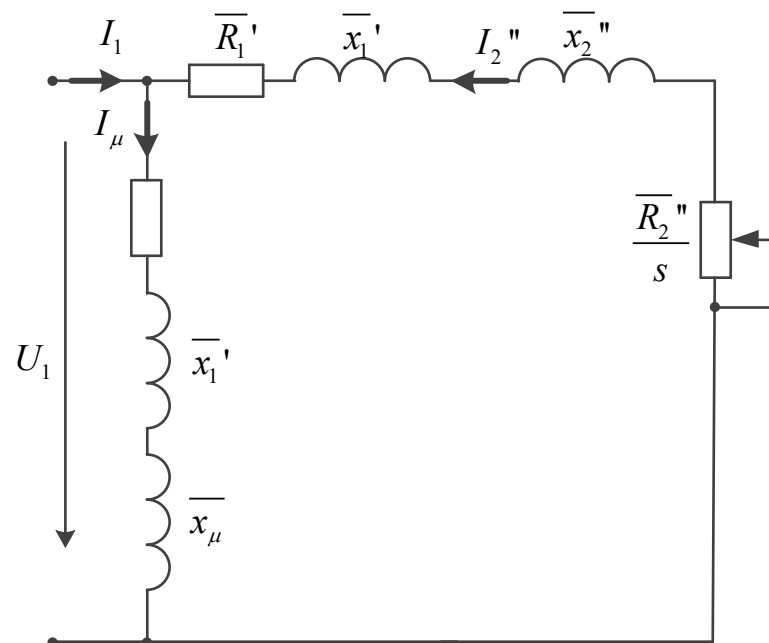


Рисунок 2.3 – Г-подібна схема заміщення АД

Коефіцієнт для перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\overline{x}_\mu + \sqrt{\overline{x}_\mu^2 + 4 \cdot \overline{x}_1' \cdot \overline{x}_\mu}}{2 \cdot \overline{x}_\mu} = \frac{3.5 + \sqrt{(3.5)^2 + 4 \cdot 0.01 \cdot 3.5}}{2 \cdot 3.5} = 1.003 \quad (2.22)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{x_1} = \frac{\overline{x_1}'}{c_1} = \frac{0.01}{1.003} = 0.001 \quad (2.23)$$

$$\overline{R_1} = \frac{\overline{R_1}'}{c_1} = \frac{0.023}{1.003} = 0.0229 \quad (2.24)$$

$$\overline{x_2}' = \frac{\overline{x_2}''}{c^2} = \frac{0.12}{1.003^2} = 0.1193 \quad (2.25)$$

$$\overline{R_2}' = \frac{\overline{R_2}''}{c^2} = \frac{0.018}{1.003^2} = 0.0179 \quad (2.26)$$

Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

$$x_1 = \overline{x_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.001 \cdot \frac{220}{237} = 0.0092 \text{ Ом} \quad (2.27)$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0.0229 \cdot \frac{220}{237} = 0.0212 \text{ Ом} \quad (2.28)$$

$$x_2' = \overline{x_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0.1193 \cdot \frac{220}{237} = 0.1104 \text{ Ом} \quad (2.29)$$

$$R_2 = \overline{R_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0.0179 \cdot \frac{220}{237} = 0.0166 \text{ Ом} \quad (2.30)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 3.5 \cdot \frac{220}{237} = 3.24 \text{ Ом} \quad (2.31)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{0.009}{314} = 0.000029 \text{ Гн} \quad (2.32)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2}{\omega_0} = \frac{0.1104}{314} = 0.00035 \text{ Гн} \quad (2.33)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{3.24}{314} = 0.0103 \text{ Гн} \quad (2.34)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.0103 + 0.00029 = 0.0103 \text{ Гн} \quad (2.35)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.0103 + 0.00035 = 0.0107 \text{ Гн} \quad (2.36)$$

Беручи за основу проведені розрахунки, визначимо значення параметрів  $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$ :

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{0.0166}{0.0107} = 1.55 \text{ Ом / Гн} \quad (2.37)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{0.0212}{0.0103} = 2.05 \text{ Ом / Гн} \quad (2.38)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}\right) = 0.0103 \cdot \left(1 - \frac{(0.0103)^2}{0.0103 \cdot 0.0107}\right) = 0.00036 \text{ Гн} \quad (2.39)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.0103}{0.0107 \cdot 0.00036} = 2619 \text{ 1 / Гн} \quad (2.40)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_m \cdot \beta = \frac{0.0212}{0.00036} + 1.55 \cdot 0.0103 \cdot 2619 = 99.4 \text{ Ом / Гн} \quad (2.41)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.0103}{0.07} = 1.45 \quad (2.42)$$

Таблиця 2.3 – Вирахувані параметри двигуна 132кВт 4А315М6У3

|                        |     |                    |        |
|------------------------|-----|--------------------|--------|
| $P_{2n}, (\text{кВт})$ | 132 | $R_1, (\text{Ом})$ | 0.0212 |
|------------------------|-----|--------------------|--------|

|                                        |       |                                     |         |
|----------------------------------------|-------|-------------------------------------|---------|
| $\omega_{xx}, (\text{рад} / \text{с})$ | 104.7 | $R_2, (\text{Ом})$                  | 0.0166  |
| $\omega_n, (\text{рад} / \text{с})$    | 103.1 | $L_1, (\text{Гн})$                  | 0.0103  |
| $M_n, (\text{Н} \cdot \text{м})$       | 1281  | $L_2, (\text{Гн})$                  | 0.0107  |
| $M_k, (\text{Н} \cdot \text{м})$       | 2817  | $L_m, (\text{Гн})$                  | 0.0103  |
| $\lambda$                              | 2.2   | $\alpha, (\text{Ом} / \text{Гн})$   | 1.55    |
| $I_{na}, (\text{А})$                   | 335.2 | $\alpha_1, (\text{Ом} / \text{Гн})$ | 2.05    |
| $\psi_{1xx}, (\text{Вб})$              | 0.988 | $\sigma, (\text{Гн})$               | 0.00036 |
| $\eta$                                 | 0.94  | $\beta, (1 / \text{Гн})$            | 2619    |
| $\cos \varphi$                         | 0.9   | $\gamma, (\text{Ом} / \text{Гн})$   | 99.4    |
| $J_d, (\text{кг} \cdot \text{м}^2)$    | 4.5   | $\mu_1$                             | 1.45    |

## 2.2 Вибір перетворювача частоти

Перетворювач частоти(ПЧ) - це пристрій, який призначений для зміни вхідної синусоїдальної напруги на вихідну імпульсну напругу зі регулюванням їх частоти і амплітуди. Це досягається за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). При роботі перетворювача частоти в обмотках асинхронного електродвигуна генерується струм синусоїдальної форми. Отже, у випадку плавного збільшення частоти і амплітуди напруги, що подається на статорні обмотки АД, можливо забезпечити плавний пуск та регулювання швидкості електродвигуна.

Керуючись інформацією про характеристики обраного двигуна було обрано ПЧ ABB ACS 550-01-290A-4[22]. Цей перетворювач призначений для керуванням загальнопромисловими асинхронними двигунами та іншим обладнанням, потребуючим постійного та довготривалого крутного моменту(наприклад конвеєри). Може використовувати як скалярний так і

векторний тип керування та має захисти від перенавантаження, перегріву, КЗ та блокування валу. В таблиці 2.4 приведені його характеристики.

Таблиця 2.4 – Параметри ПЧ ABB ACS 550-01-290A-4

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Номінальна напруга мережі, В   | 380...480   |
| Номінальна напруга мережі, Гц  | 50/60       |
| Вихідна напруга, В             | 0/380...480 |
| Вихідний струм навантаження, А | 290         |
| Перевантажувальна здатність, % | 150         |

### **2.3 Аналіз розподілу навантаження ескалатора в межах технологічного циклу.**

Системи метро є важливою складовою глобальних систем транспорту. У великих містах вони забезпечують тисячі, а то й мільйони поїздки щодня. Зокрема, вони відрізняються від інших видів громадського транспорту вищою швидкістю та великою місткістю, привертаючи значний пасажирський попит. Це робить їх важливою ланкою міської мобільності та необхідною складовою життя у великих містах. Розуміння характеру попиту важливо для планування транспортного руху та операторів громадського транспорту для забезпечення відповідного рівня послуг та підвищення надійності.

Аналогом для визначення характеру зміни навантаження тунельного ескалатора київського метрополітену може бути характеристики розподілу навантаження тунельних ескалаторів тайванських ескалаторів. Загальний вид яких наведено на рисунку 2.3.

Для розуміння зміни пасажиропотоку потрібні детальні дані про поїздки. Традиційні методи збору таких даних мають високі витрати та дають неповні, неточні та неоднорідні результати. Однак сучасні системи громадського транспорту часто використовують автоматизовані системи оплати проїзду (AFC) разом з розумними картками. Ці системи пасивно збирають величезну кількість

детальних просторово-часових даних про поїздки, що може збагатити наше розуміння мобільності та відкрити нові можливості для планування та управління громадським транспортом.

Дане дослідження проводилося для Тайбейського метро, яке обслуговує місто Тайбей та міські частини Нового Тайбея, як показано на Місто Тайбей є столицею та економічним, політичним та культурним центром Тайваню, розташованим на півночі головного острова Тайваню і повністю оточеним Новим Тайбеєм. Обидва міста є спеціальними муніципалітетами в адміністративній структурі Тайваню[23].

Рисунок 2.3 показує погодинні дані пасажирського потоку для кожного дня тижня в умовах нормального функціонування. Графіки пасажиропотоку в робочі дні майже однакові. Вони характеризуються двома типовими піками, які відображають ранкові та вечірні піки. Вечірній пік має трошки більший пасажирський потік, ніж ранковий. Після ранкової години пік пасажирського потоку у п'ятницю трохи більший, ніж у інші робочі дні, особливо ввечері. Профілі вихідних днів значно відрізняються. Субота і неділя мають досить схожі графіки, але загальний пасажирський обсяг у суботу трохи вищий, ніж у неділю, і крива в неділю більш плавна.

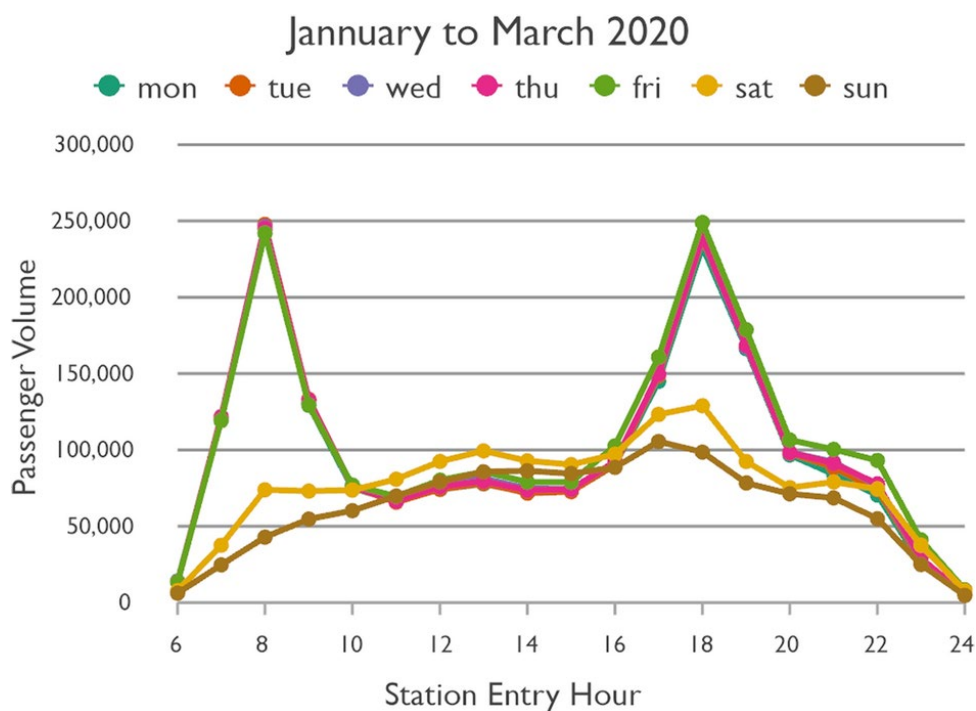


Рисунок 2.4 – Графіки пасажиропотоку для кожного дня тижня

Для спрощення у дослідях буде використовуватись два графіки пасажиропотоку – один для моделювання роботи ескалатору у будній день, інший для вихідного дня, загальний вид яких приведений на рисунках 2.4 і 2.5.

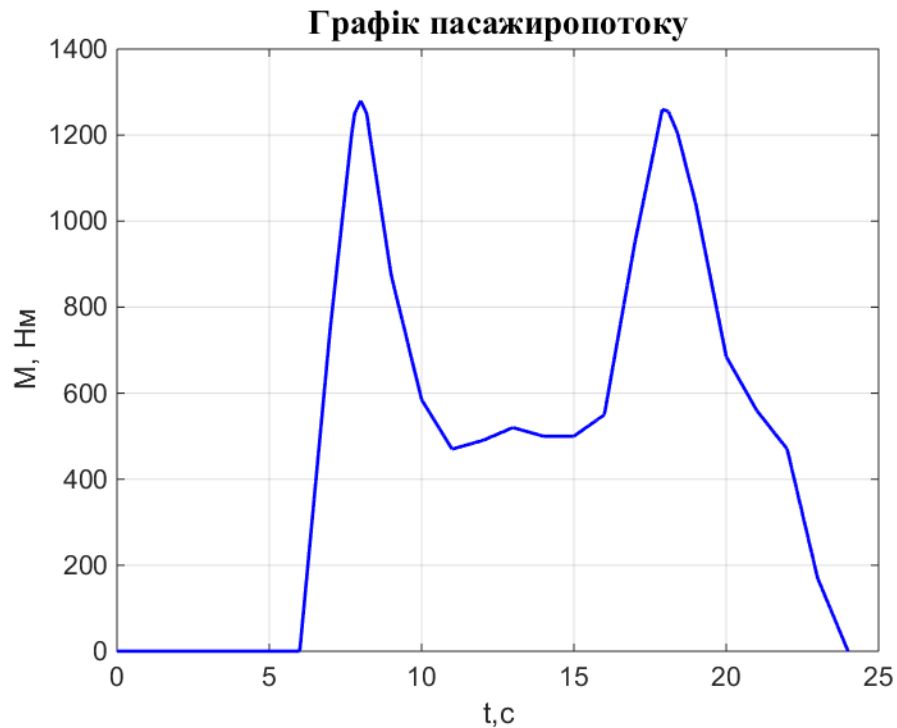


Рисунок 2.5 – Графік пасажиропотоку для будніх днів тижня



Рисунок 2.6 – Графік пасажиропотоку для вихідних днів тижня

Оскільки графік пасажиропотоку в метрополітені в усіх країнах досить схожий, можна використовувати отримані дані для оцінки завантаженості Київського метрополітену. Саме в наведеній статті параметри ескалатору метрополітену близькі до досліджуваного в роботі транспортного механізму.

### **Висновки до розділу 2**

Проведено тяговий розрахунок, на основі якого було обрано двигун електродвигун 132кВт 4А315М6У3. Обрано перетворювач частоти ПЧ АВВ АСS 550-01-290А-4 який оптимально підходить для експлуатації у обраному технологічному процесі. Проаналізовано денний розподіл навантаження ескалатора в межах технологічного циклу. Обрано оптимальні для моделювання графіки навантаження. Отримані результати дозволяють розробити в подальшому математичний опис елементів електромеханічної системи.

### 3 РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1. Структурна схема об'єкта регулювання і передавальні функції окремих ланок. Синтез регулятора швидкості.

За умови ненасиченості магнітного ланцюга двигуна, симетричності фаз і т.д. найчастіше використовують еквівалентну двофазну модель двигуна у векторній формі. Але найбільш спрощену модель можна отримати при лінеаризації робочої ділянки механічної характеристики. При цьому передатна функція регульованого двигуна може бути записана у вигляді аперіодичної ланки:

$$W(p) = \frac{M_d}{\omega_0 - \omega} = \frac{\beta}{T_e \cdot p + 1}, \text{ де}$$

$\beta$  - модуль жорсткості;

$T_e$  - електромагнітна стала часу двигуна.

В цьому випадку вихідна координата – момент на валу двигуна, іншими словами, двигун буде розглядатися як джерело моменту. Тут момент інерції двигуна можна віднести до передавального пристрою ЕП. Це дає змогу зручно узгодити математичну моделі двигуна і технологічний об'єкт, особливо якщо цей об'єкт – багатомасовий ЕМС.

У випадку доповнення передаточної функції двигуна ланкою, що пов'язує керуючим впливом, то на виході отримаємо структурну схему асинхронного двигуна. А у випадку доповнення цієї схеми передатною функцією перетворювача частоти(ПЧ), яку можна представити у вигляді:

$$W_v(p) = \frac{K_v}{T_\mu \cdot p + 1}$$

То в результаті буде отримана структурна схема об'єкта регулювання контуру швидкості, а саме (Рисунок 3.1).

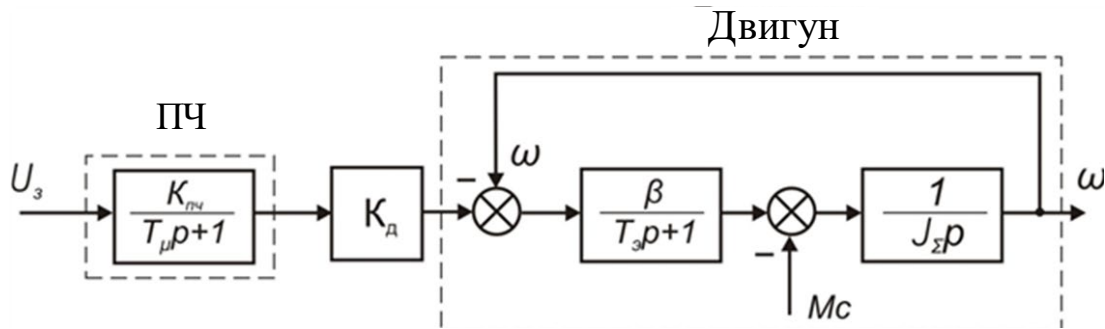


Рисунок 3.1 – Структурна схема об'єкту регулювання

Нижче приведені розрахунки параметрів передатних функцій структурної схеми.

Передатна функція ПЧ :

$$W_v(p) = \frac{K_v}{T_\mu \cdot p + 1} = \frac{5}{0.01 \cdot p + 1}, \text{ де}$$

$$K_v = \frac{f_H}{U_3} = \frac{50}{10} = 5 - \text{коефіцієнт підсилення ПЧ}$$

$T_\mu = 0.01$  - постійна часу ПЧ.

Інші параметри схеми:

$\omega_{xx}$  - номінальна швидкість ідеального холостого ходу;

$P_n$  - число пар полюсів обмотки статора;

$T_e$  - електромагнітна стала часу двигуна;

$\omega_n$  - номінальна швидкість двигуна;

$M_n$  - номінальний момент двигуна;

$\beta_k$  - модуль статичної жорсткості;

$J_M$  - момент інерції механізму;

$J_\Sigma$  - сумарний момент інерції;

$T_M$  - Електромеханічна постійна двигуна;

$M_c$  - момент навантаження;

$K_d$  - коефіцієнт передачі двигуна.

Приведені вище параметри можна визначити по наступних співвідношеннях, параметри  $\omega_{xx}$   $\omega_n$  та  $M_n$  розраховані у попередніх пунктах:

Так як кількісьбть обертів двигуна  $n=1000$  то к-ть пар полюсів  $p=3$

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0n} \cdot s_K} = \frac{1}{314 \cdot 0.08} = 3.98 \quad (3.1)$$

$$\beta = \frac{M_n}{\omega_{xx} - \omega_n} = \frac{1280.6}{104.7 - 103.1} = 800.4 \text{ Нм} \cdot \text{с} \quad (3.2)$$

Згідно вирахованих раніше величин обрахуємо деякі параметри :

$$J_\Sigma = J_d + J_M \quad (3.3)$$

$$m_1 = \frac{\left( \frac{m_c \cdot g}{a_c} \right) + (2 \cdot m_{\pi} \cdot g)}{g} \cdot 1 = \left( \frac{m_c}{a_c} + 2 \cdot m_{\pi} \right) \cdot 1 =$$

$$= \left( \frac{26}{0.45} + 2 \cdot 32 \right) \cdot 1 = 121.8 \cdot 110 = 13398 \text{ кг} \quad (3.4)$$

$$m_v = \frac{F_\Sigma}{g} = \frac{124000}{9.8} = 12653 \text{ кг} \quad (3.5)$$

$$m_\Sigma = m_1 + m_v = 13398 + 12653 = 26051 \text{ кг} \quad (3.6)$$

$$J_M' = m_\Sigma \cdot \rho^2 = 26051 \cdot 0.0085^2 = 1.88 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.7)$$

$$J_\Sigma = J_d + J_M' = 4.5 + 1.88 = 6.38 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3.8)$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{6.38}{800.4} = 7.9 \cdot 10^{-3} \text{ с} \quad (3.9)$$

$$M_C = 1.7 \cdot M_H = 1.7 \cdot 1280.6 = 2054.6 \text{ Нм} \quad (3.10)$$

$$K_d = \frac{2 \cdot \pi}{p_n} = \frac{2 \cdot 3.14}{3} = 2.1 \quad (3.11)$$

### 3.2 Створення системи регулювання швидкості з внутрішнім зворотнім зв'язком за швидкістю

Для отримання потрібних динамічних властивостей використовується регулюючий контур із зворотним зв'язком(33) по швидкості.

Коефіцієнт 33 по швидкості:

$$K_\omega = \frac{U_z}{1.3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1.3 \cdot 103.1} = 0.07 \quad (3.12)$$

Таким чином, структурна схема регулювання (Рисунок 3.2) буде мати такий вигляд:

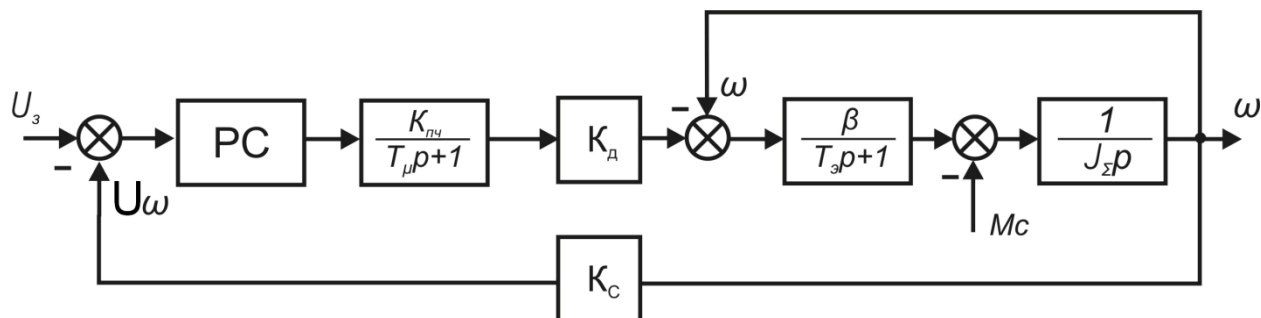


Рисунок 3.2 – Структурна схема частотного регулювання

Передатна функція асинхронного двигуна буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} W_d(p) &= \frac{\frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_e \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_e \cdot p + 1)}} = \frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot T_e \cdot p^2 + J_\Sigma \cdot p + \beta} \\ &= \frac{K_d}{T_M \cdot T_e \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \frac{2.1}{7.9 \cdot 10^{-3} \cdot 3.98 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Структурна схема для регулювання контуру швидкості (Рисунок 3.3) буде мати наступний вигляд.

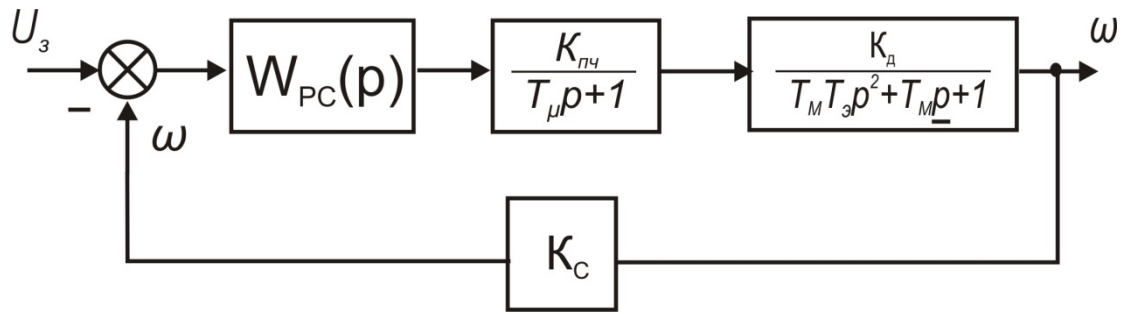


Рисунок 3.3 – Структурна схема регулювання контуру швидкості

Отже передатна функція об'єкта регулювання за швидкістю буде:

$$W_o(p) = \frac{K_v \cdot K_d}{(T_\mu \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot T_e \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1)} = \frac{10.5}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (7.9 \cdot 10^{-3} \cdot 3.98 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)} \quad (3.14)$$

Регулятор швидкості необхідно обирати з виходячи з наступних міркувань. Нехай передатна функція регулюючого об'єкта має вигляд:

$$W_o(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots K_n}{\prod_{i=1}^m (T_i \cdot p + 1)}, \text{ де } T_i - \text{постійна часу об'єкта регулювання.}$$

Використовуючи співвідношення:  $X_i \cdot W_i \cdot \frac{1}{W_i} = X_i$ ,

де  $i$  - передатна функція  $i$  змінна  $i$ -тої ланки.

Можливо компенсувати постійні часу, виключивши їх з регулюючого контуру. Також можна виключити всі коефіцієнти з цього контуру регулювання всі коефіцієнти  $K_1 \cdot K_2 \dots K_n$  і ввести інтегральний елемент з постійним часом, щоб позбутися статичних помилок.

Отже, вихідний регулюючий контур можна замінити на інший, який має загальний коефіцієнт посилення, рівний одиниці (зворотний зв'язок є одиничним). Він має астатизм першого порядку та високу швидкодію завдяки постійних часу, які залишилися не скомпенсованими.

$$W_K(p) = W_d(p) \cdot W_r(p) = \frac{1}{T_o p \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)}$$

де  $i$  - число постійних, що компенсовані регулятором.

Передавальна функція регулятора:

$$\begin{aligned} W_r(p) &= \frac{W_K(p)}{W_d(p)} = \frac{T_M \cdot T_e \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \\ &= \frac{7.9 \cdot 10^{-3} \cdot 3.98 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 7.9 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{0.012 \cdot p}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

де

$$T_U = a_c \cdot K_\omega \cdot K_v \cdot K_d \cdot T_M = 2 \cdot 0.07 \cdot 5 \cdot 2.1 \cdot 7.9 \cdot 10^{-3} = 0.012 \text{ с} \quad (3.16)$$

$a$  - коефіцієнт демпфування. Приведене значення відповідає перехідному процесу, оптимальному за швидкодією.

Підставляючи значення, отримаємо:

$$W_r(p) = 0.0106 \cdot p + 0.246 + \frac{1}{0.035p}. \quad (3.17)$$

### 3.3 Математична модель асинхронного двигуна.

Математична модель асинхронного двигуна(АД) у рівняннях простору та стану виражається наступним чином:

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.18)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \cdot (M - M_c) \quad (3.19)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість (рад/с);

$J$  – момент інерції двигуна (кг/м<sup>2</sup>);

$M$  – момент двигуна ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ );

$M_c$  – статичний момент навантаження на валу двигуна ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ );

$\theta$  – кут повороту вала двигуна.

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}) \quad (3.20)$$

де  $\psi_{2a}, \psi_{2b}$  – компоненти вектора потокозчеплення ротора (Вб);

$i_{1a}, i_{1b}$  – два компоненти вектору струму статора (А)

$$\dot{i}_{1a} = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \psi_{2b} \omega + \frac{1}{\sigma} u_{1a} \quad (3.21)$$

$$\dot{i}_{1b} = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \psi_{2a} \omega + \frac{1}{\sigma} u_{1b} \quad (3.22)$$

$$\dot{\psi}_{2a} = -\alpha \psi_{2a} - p_n \psi_{2b} \omega + \alpha L_m i_{1a} \quad (3.23)$$

$$\dot{\psi}_{2b} = -\alpha \psi_{2b} + p_n \psi_{2a} \omega + \alpha L_m i_{1b} \quad (3.24)$$

де  $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$ ,  $\beta = \frac{L_m^2}{L_2 \sigma}$ ,  $\sigma = L_1 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right)$ ,  $\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta$  – коефіцієнти, що

враховують параметри двигуна;

$R_1$  і  $R_2$  – активні опори обмоток статора і ротора;

$L_1$  і  $L_2$  – індуктивні опори обмоток статора і ротора;

$L_m$  – індуктивний опір взаємоіндукції обмоток статора і ротора;

$p_n$  – число пар полюсів.

Модель короткозамкненого асинхронного двигуна в синхронній системі координат, записана через вектори струму ротора та потокозчеплення статора виглядає наступним чином.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= R_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_1}{dt} + \omega_k \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1 \\ \mathbf{u}_2 &= R_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_2}{dt} + (\omega_k - \omega) \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_1 &= L_1 \mathbf{i}_1 + L_m \mathbf{i}_2 \\ \boldsymbol{\psi}_2 &= L_m \mathbf{i}_1 + L_2 \mathbf{i}_2, \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{M} = \frac{3}{2} L_m \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 \quad (3.27)$$

Для виключення струму статора з рівнянь (3.26) використовується вираз:

$$\mathbf{i}_1 = L_1^{-1} (\boldsymbol{\psi}_1 - L_m \mathbf{i}_2) \quad (3.28)$$

який отримується з (3.22).

Підстановка рівняння (3.28) в (3.25) дає наступний результат:

$$\dot{\boldsymbol{\psi}}_1 = -\alpha_1 \boldsymbol{\psi}_1 - \omega_0 \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1 + \alpha_1 L_m \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1, \quad (3.29)$$

де  $\alpha_1 = R_1/L_1$ .

Після перетворень другого рівняння в (3.29) отримаємо

$$\dot{\mathbf{i}}_2 = -\gamma_1 \mathbf{i}_2 - \omega_2 \mathbf{J} \mathbf{i}_2 + \alpha_1 \beta_1 \boldsymbol{\psi}_1 + \beta_1 p_n \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1 + \frac{1}{\sigma_1} \mathbf{u}_2 - \beta_1 \mathbf{u}_1 \quad (3.30)$$

$$\text{де } \sigma_1 = L_2 \left( 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \sigma_1}, \quad \gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 L_m \beta_1.$$

Рівняння для моменту отримується внаслідок підстановки (3.28) в (3.27)

$$\begin{aligned}
M &= \frac{3}{2} L_m p_n (\mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\boldsymbol{\psi}_1 - L_m \mathbf{i}_2)^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n \boldsymbol{\psi}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2 = \\
&= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q})
\end{aligned} \tag{3.31}$$

У випадку записання динамічної моделі АД у скалярному вигляді з урахуванням (3.29), (3.30), (3.31) вона буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\psi_{1q} i_{2d} - \psi_{1d} i_{2q}) \\
\dot{\psi}_{1d} &= -\alpha_1 \psi_{1d} + \omega_0 \psi_{1q} + \alpha_1 L_m i_{2d} + u_{1d} \\
\dot{\psi}_{1q} &= -\alpha_1 \psi_{1q} - \omega_0 \psi_{1d} + \alpha_1 L_m i_{2q} + u_{1q} \\
\dot{i}_{2d} &= -\gamma_1 i_{2d} + \omega_2 i_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \psi_{1q} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2d} - \beta_1 u_{1d} \\
\dot{i}_{2q} &= -\gamma_1 i_{2q} - \omega_2 i_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \psi_{1d} + \frac{1}{\sigma_1} u_{2q} - \beta_1 u_{1q}.
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Алгоритми, що описують векторне керування АД, як правило, проектують та записують в синхронній системі координат (d – q), яка обертово рухається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю  $\omega_0$ , як зображено на рисунку 3.5.

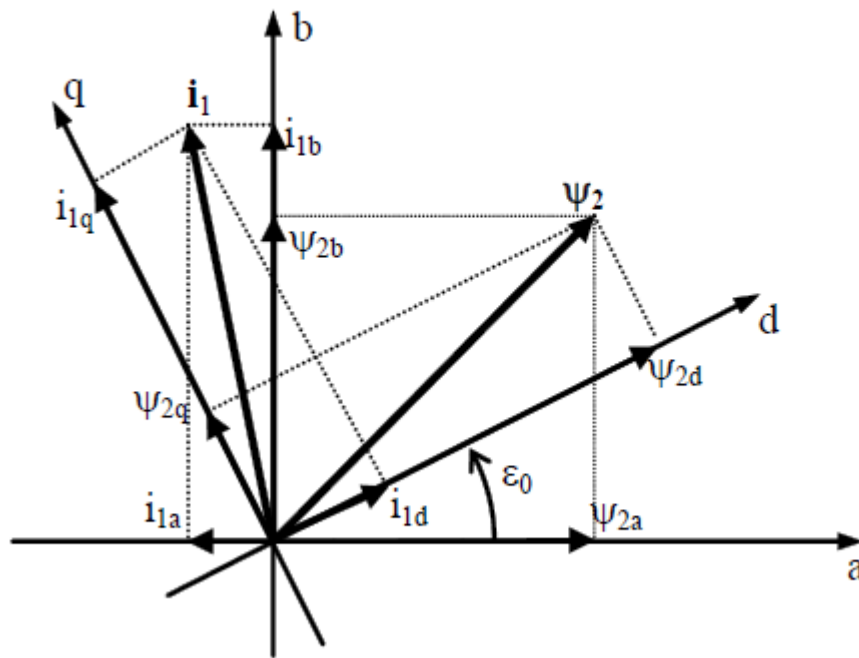


Рисунок 3.5 – Розташування векторів асинхронного двигуна

### 3.4 Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

1. Розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення:

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.33)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (3.34)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi, \quad (3.35)$$

де  $\psi^*$ ,  $\dot{\psi}^*$ ,  $\ddot{\psi}^*$  – задані величини модуля вектора потокозчеплення ротора і його перша і друга похідні відповідно,  $\phi$  – робастифікуючий зв'язок. У стандартному випадку значення  $\phi = 0$ .

2. Регулятор струму по осі (d):

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left( \gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.36)$$

де  $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$  – похибка при відпрацюванні струму по осі (d),  $u_{1d}$  – складова вектора напруги статора по осі (d),  $(k_i, k_{ii}) > 0$  – коефіцієнти складових регуляторів струму – пропорційної та інтегральної.

3. Регулятор кутової швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^*), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[ -k_\omega (-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \dot{\omega}^* + v \omega^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \quad (3.38)$$

де  $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$  – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно,  $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$  – похибка при відпрацюванні кутової швидкості,  $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$  – коефіцієнти складових регулятора кутової швидкості – пропорційної та інтегральної.

4. Регулятор струму по осі (q) (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma (\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{qd} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.39)$$

де  $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$  – похибка відпрацювання струму по осі (q),  $u_{1q}$  – компонента вектора напруги статора по осі (q). На основі отриманої моделі

електромеханічної системи та алгоритму векторного керування розробляються структури окремих елементів і системи в цілому для дослідження статичних і динамічних характеристик електромеханічної системи ескалатора.

Відштовхуючись від формул п.3.3, побудовано структурну схему непрямого векторного керування, яка зображена на рис.3.6.

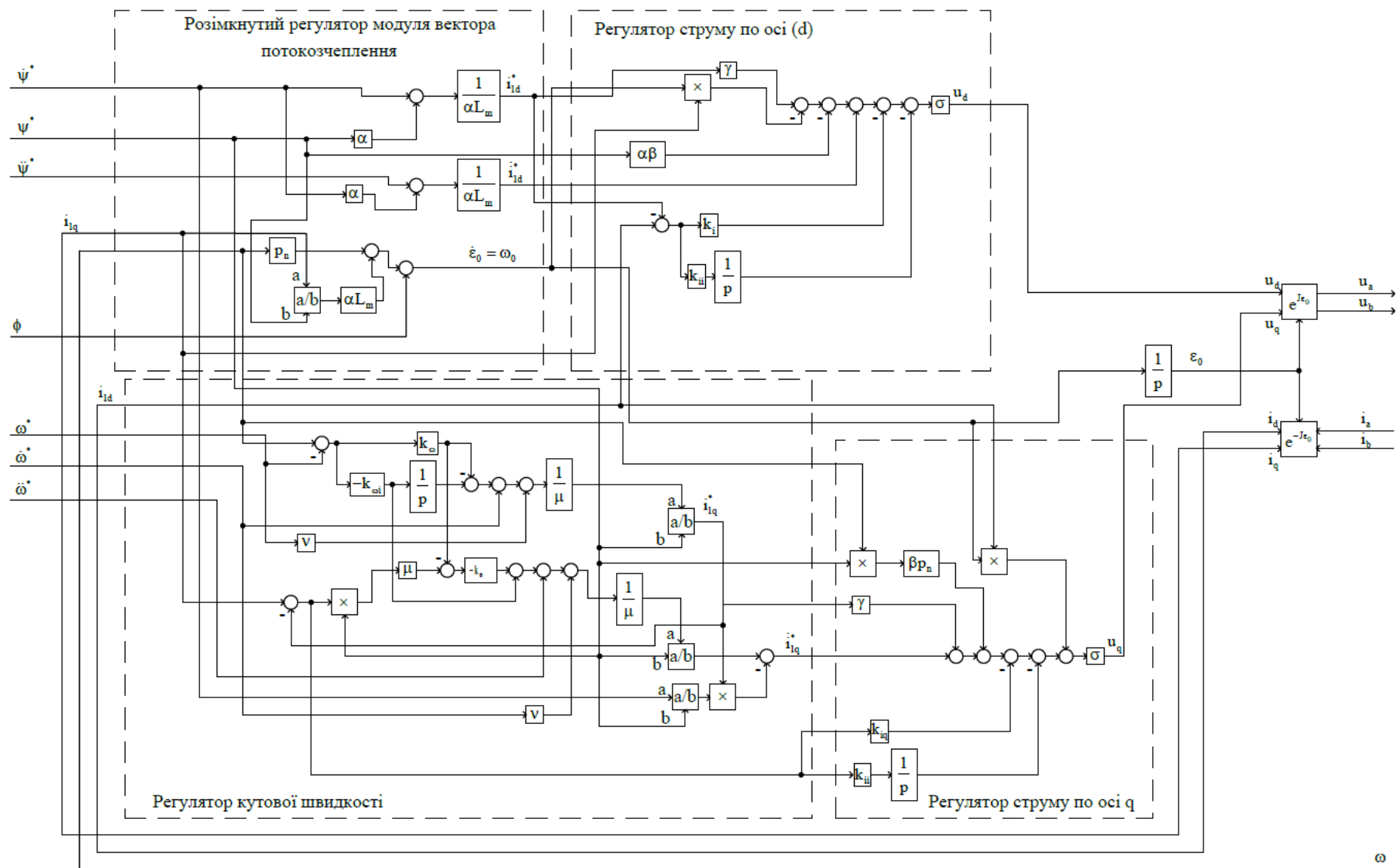


Рисунок 3.6 – Структурна схема алгоритму непрямого векторного керування

### **Висновки до розділу 3**

Було проведено розрахунок та вибір елементів системи керування. Були отримані математичні моделі, що в дозволять розробити схему для дослідження статичних та динамічних характеристик.

Отримані результати дають можливість отримати в межах пакету прикладних програм «MATLAB» Simulink модель для дослідження статичних та динамічних характеристик електромеханічної системи ескалатору.

## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕСКАЛАТОРА

### 4.1 Розробка моделі для дослідження.

Беручи за основу наведений у попередньому пункті опис системи керування асинхронним двигуном було зібрано модель електромеханічної системи з використанням пакету прикладних програм MATLAB Simulink. Схема моделі зображена на рисунку 4.1

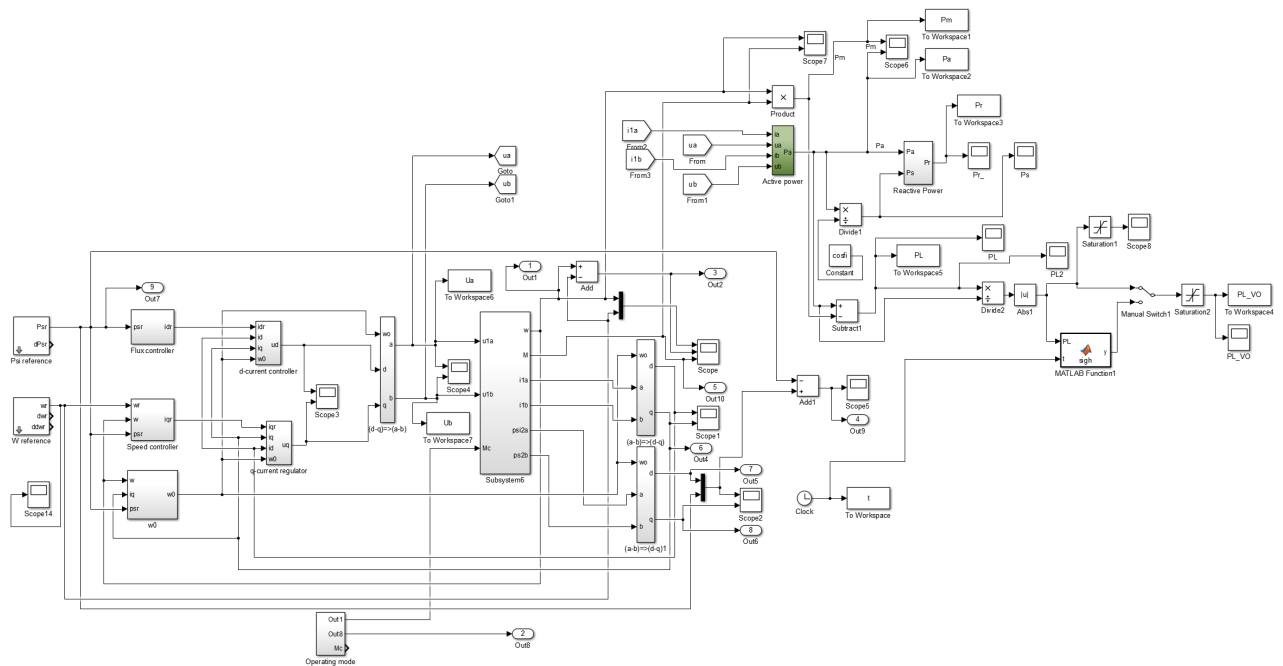


Рисунок 4.1 – загальна модель електромеханічної системи ескалатора в межах пакету прикладних MATLAB Simulink

Електромеханічна система складається з блоку АМ – асинхронного двигуна в двофазній системі статора (a-b), Operating modes – задавача статичного навантаження відносно вибраного режиму роботи, Reactive power – розрахунок реактивної потужності, Active Power – розрахунок активної потужності також в моделі присутні блоки для задавання нульової швидкості( $w_0$ ), регулятор потоку(flux controller), регулятор швидкості(speed controller) та регулятори струму по осях d і q(d-current controller, q current regulator).

На рисунку 4.2 зображена підсистема АМ.

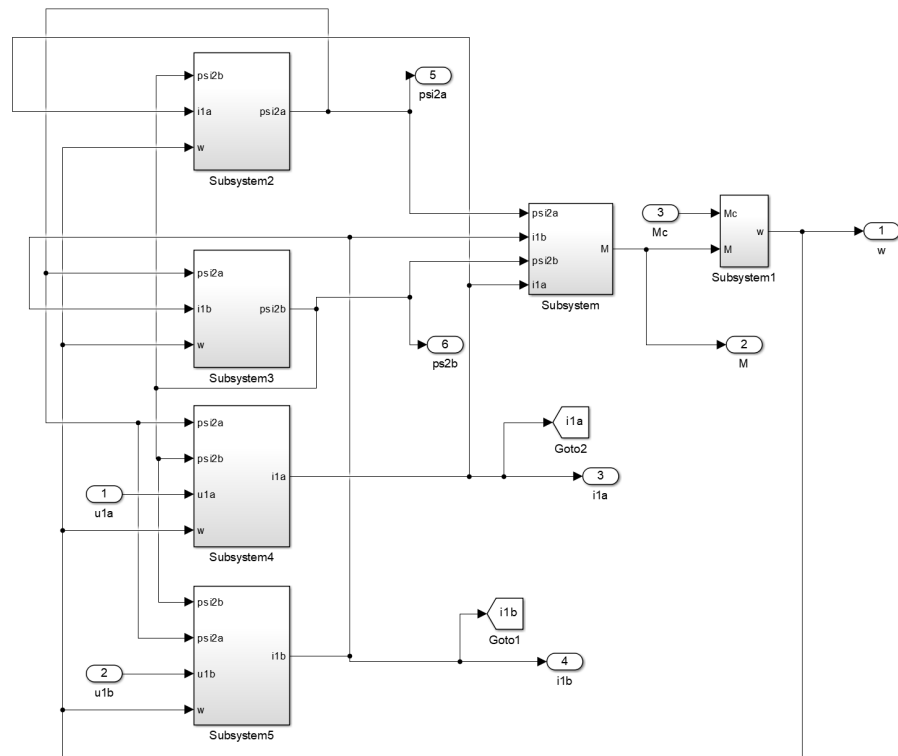


Рисунок 4.2 – Підсистема АМ

На рисунку 4.3 зображена підсистема задавача статичного навантаження. За формування сигналу що імітує навантаження в вихідний та будній день відповідають блоки weekend та weekday. Блок Gain відповідає за напряму руху ескалатора.

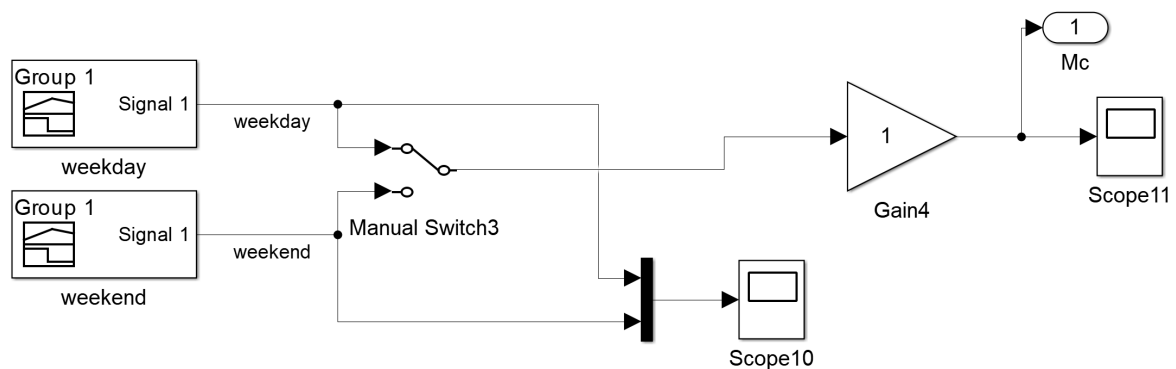


Рисунок 4.3 – Підсистема Operating modes

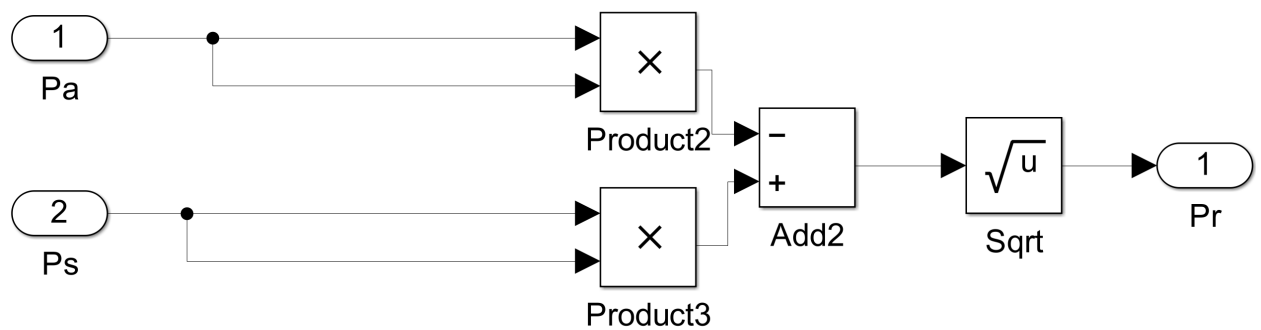


Рисунок 4.4 – Підсистема Reactive power

На рисунку 4.4 зображена підсистема розрахунку реактивної потужності навантаження.

#### 4.2 Дослідження характеристик електромеханічної системи.

Програма досліджень:

Відповідно до технологічних циклів досліджуються характер зміни таких величин: швидкості( $\omega$ ), статичного моменту( $M_c$ ), моменту на валу двигуна( $M$ ), похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ), струму(компоненти  $i_q$ ,  $i_d$ ), потокозчеплення( $\psi$ ), напруги(компоненти  $u_a$ ,  $u_b$ ), механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей, втрати активної потужності( $\Delta P_a$ ) та втрати активної потужності у відносних одиницях  $\Delta P_a(\%) = \frac{P_a - P_m}{P_a}$ .

Графіки перехідних процесів цих величин зображено на графіках у кожному з п'яти розділів, що відповідають різним режимам роботи. Аналіз результатів фіксується для характерних точок технологічного циклу: 5с, 8с, 15с, 18с, 23с.

Дослідження проводились для п'яти режимів роботи:

- рух вгору у будній день при  $\omega_n$
- рух вниз у будній день при  $\omega_n$

- рух вгору у вихідний день при  $\omega_n$
- рух вниз у вихідний день при  $\omega_n$
- рух вгору при швидкості при  $0.2 \cdot \omega_n$

Режими роботи у вихідні та будні дні відрізняються величиною і характером статичного навантаження, який відповідає пасажиропотоку відповідно в будній та вихідний день. Останній режим роботи моделювався при русі вгору у будній день та зниженій швидкості, що відповідає значенню  $0.2 \cdot \omega_n$ .

#### 4.2.1 Дослідження. Будній день, режим підйому вантажу.

Результати досліджень наведено на рисунках 4.1 – 4.5 і таблиці 4.1

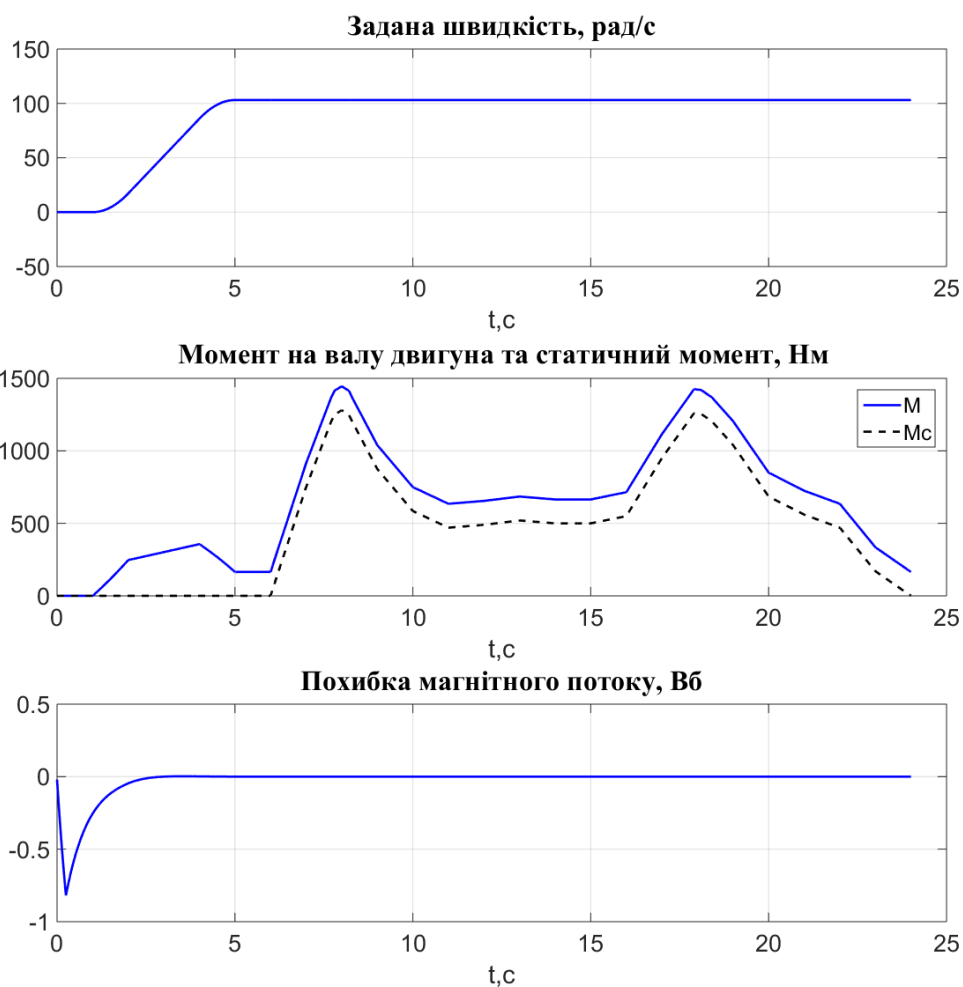


Рисунок 4.5 – Перехідні процеси швидкості( $\omega$ ), моменту( $M, M_c$ ) та похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ) при русі вгору у будній день

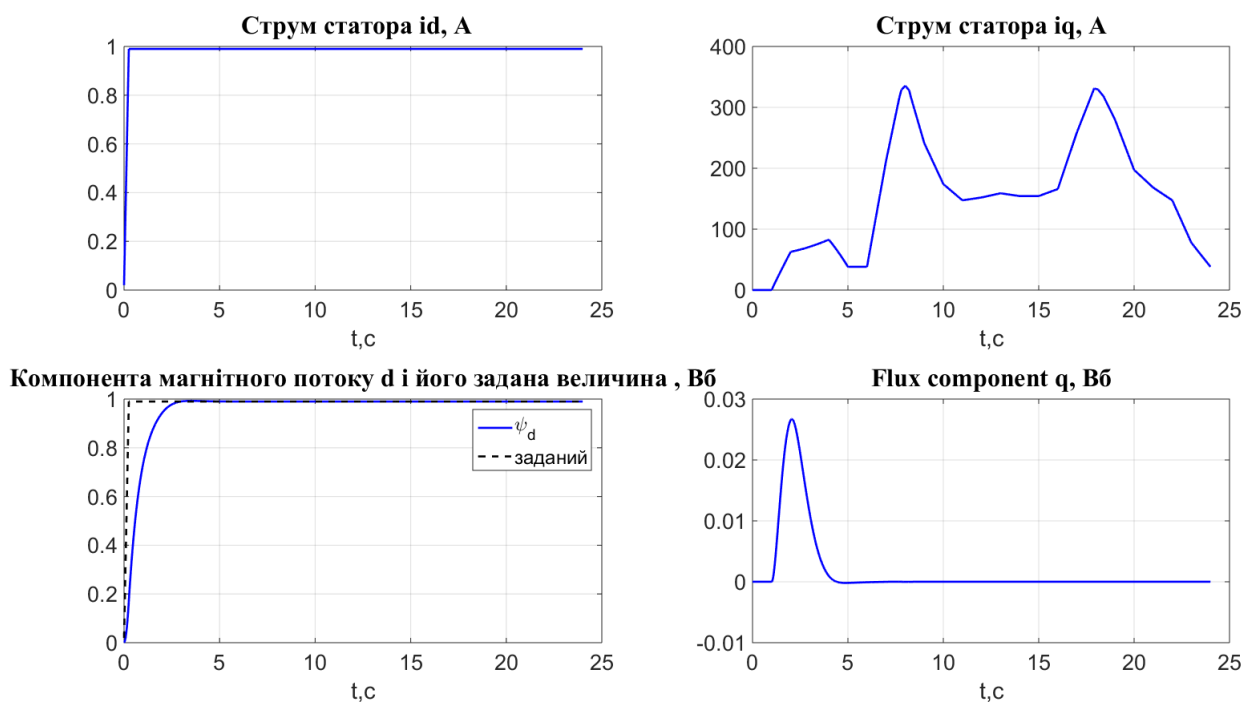


Рисунок 4.6 – Перехідні процеси струму( $i_d, i_q$ ) та потокозчеплення( $\psi$ ) при русі вгору у будній день

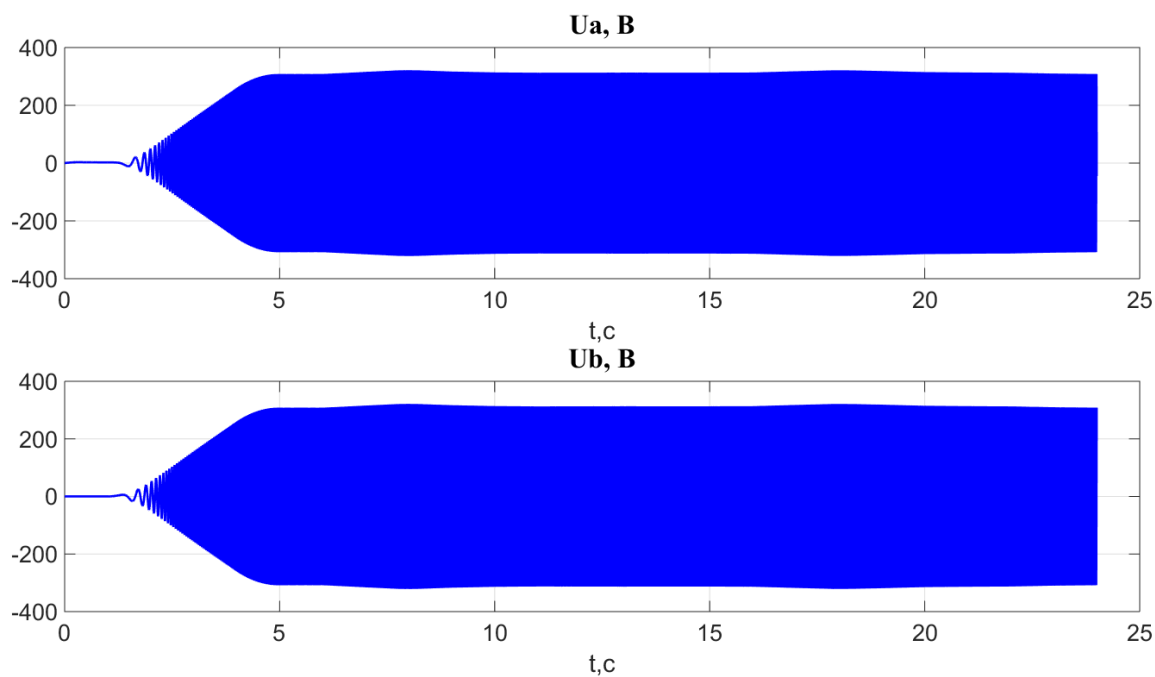


Рисунок 4.7 – Перехідні процеси напруги( $U_a, U_b$ ) при русі вгору у будній день

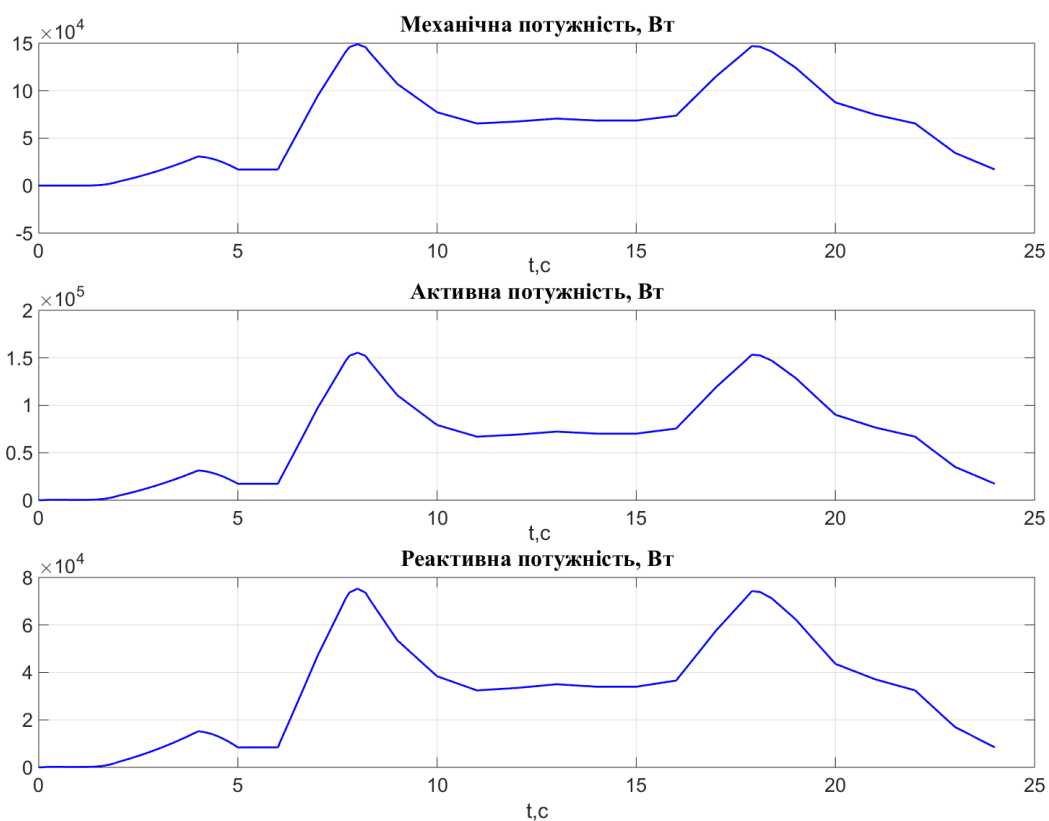


Рисунок 4.8 – Перехідні процеси механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей при русі вгору у будній день

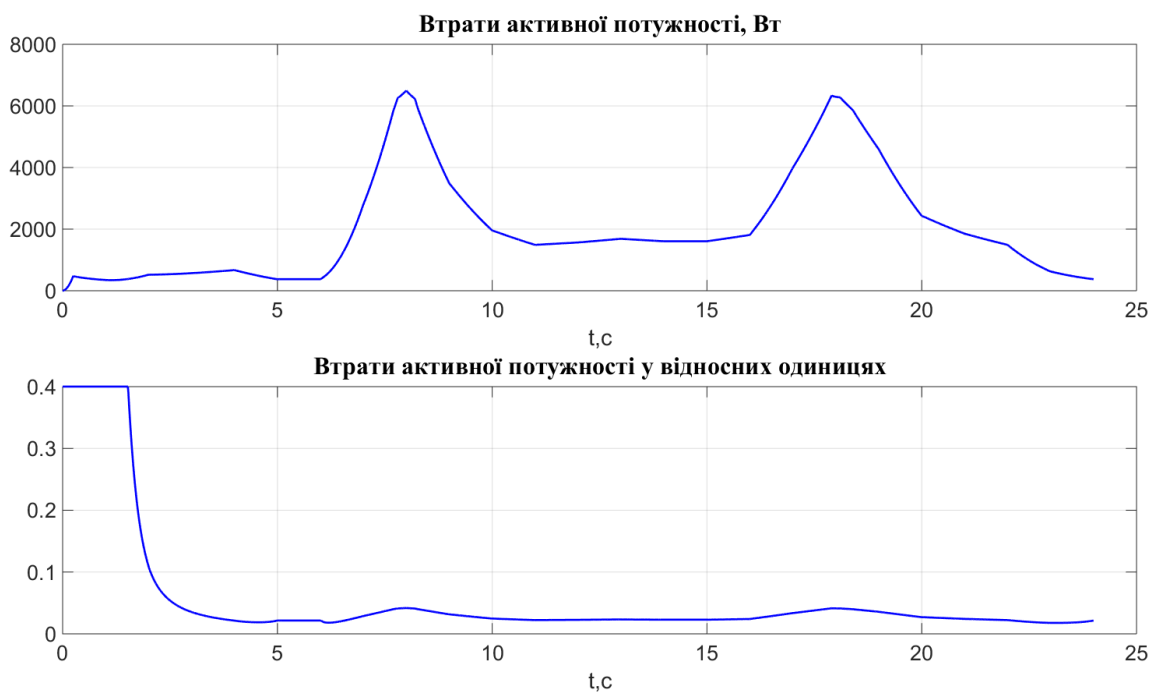


Рисунок 4.9 – Графік перехідних процесів втрат активної потужності( $\Delta P_a$ ) та ( $\Delta P_a(\%)$ ) при русі вгору у будній день

Для можливості порівняння результатів моделювання систематизуємо реперні точки в таблиці.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання режиму руху вгору в будній день

| <b>Підйом вгору в будній день</b> |       |              |                  |        |        |       |       |       |       |      |
|-----------------------------------|-------|--------------|------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
|                                   | $P_r$ | $\Delta P_a$ | $\Delta P_a(\%)$ | $P_m$  | $P_a$  | $U_a$ | $U_b$ | $I_d$ | $I_q$ | $M$  |
| Холостий хід(5)                   | 8349  | 372.6        | 0.0216           | 17000  | 17220  | 308.5 | 308.4 | 0.99  | 38.2  | 164  |
| Максимальне навантаження(8)       | 75300 | 6495         | 0.0418           | 149000 | 155500 | 321.6 | 321.6 | 0.99  | 335   | 1445 |
| Середнє навантаження(15)          | 33970 | 1606         | 0.0229           | 68580  | 70200  | 313.2 | 303.8 | 0.99  | 156   | 668  |
| Максимальне навантаження (18)     | 74030 | 6296         | 0.0418           | 146600 | 152900 | 321.3 | 321.3 | 0.99  | 330   | 1425 |
| Мінімальне навантаження(23)       | 16860 | 635.6        | 0.018            | 34320  | 35730  | 310   | 310   | 0.99  | 78    | 336  |

За технологічний цикл момент на валу двигуна змінювався з 164 Нм під час холостого ходу до значення 1445 Нм під час ранкового піку. Споживання активної потужності змінювалось з 17220 Вт до 155500 Вт. Механічна потужність на холостому ході мала значення 17000 Вт а при максимальному навантаженні збільшилась до значення 149000. Реактивна потужність збільшилась із 8349 ВАР до 75300 ВАР. При цьому втрати активної потужності при холостому ході дорівнювали 373 Вт а при максимальному навантаженні збільшились до 6495 Вт. У відсотках це склало 2.16 та 4.18 відносно активної потужності при холостому ході та при максимальному навантаженні відповідно.

#### 4.2.2 Дослідження. Будній день, режим спуску вантажу.

Результати досліджень наведено на рисунках 4.6 – 4.10 і таблиці 4.2

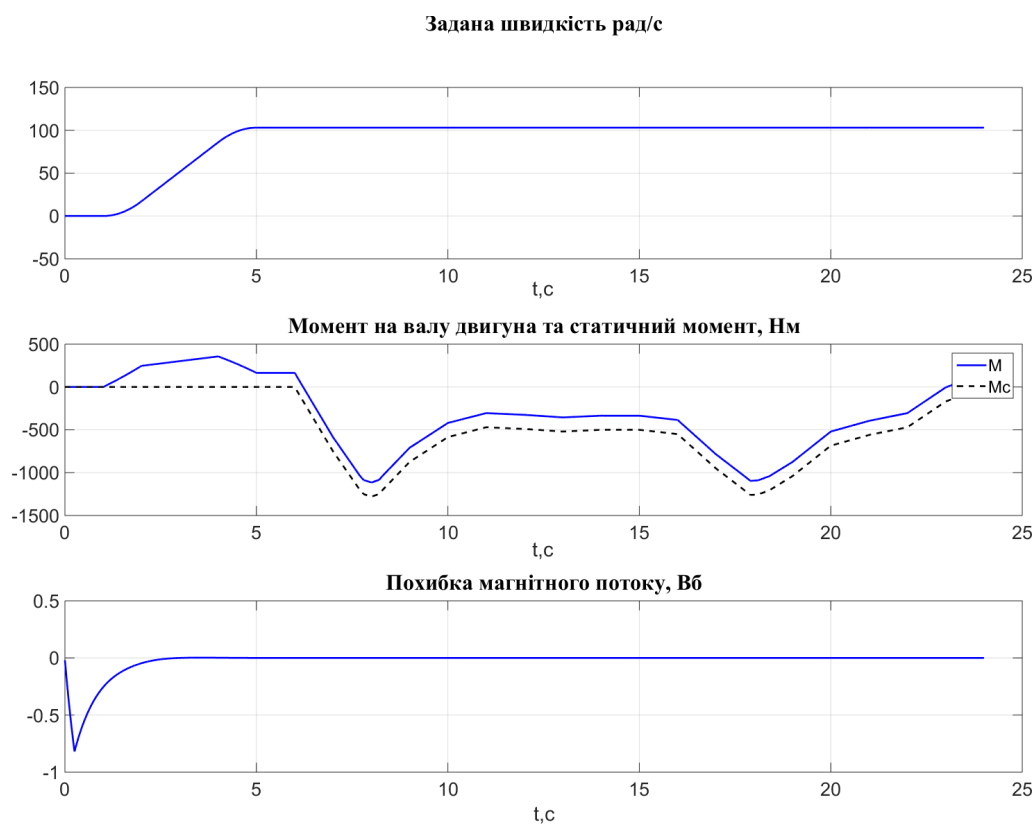


Рисунок 4.10 – Перехідні процеси швидкості( $\omega$ ), моменту( $M$ ,  $M_c$ ) та похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ) при русі вниз у будній день

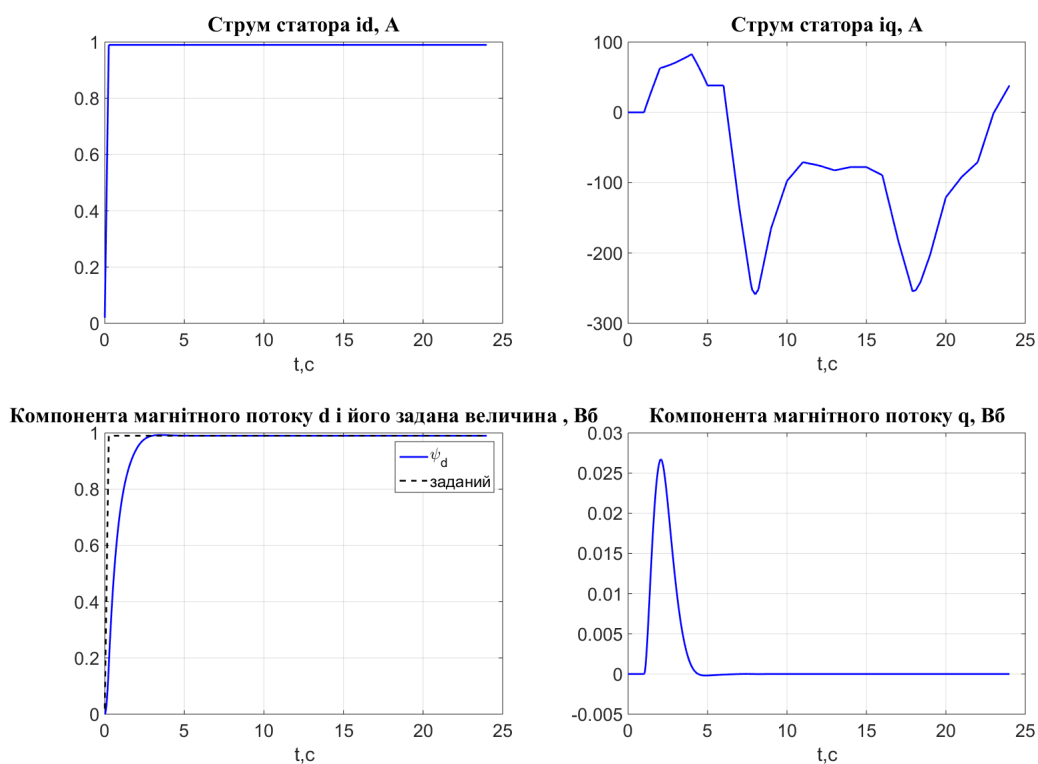


Рисунок 4.11 – Перехідні процеси струму( $i_d$ ,  $i_q$ ) та потокозчеплення( $\psi$ ) при русі вниз у будній день

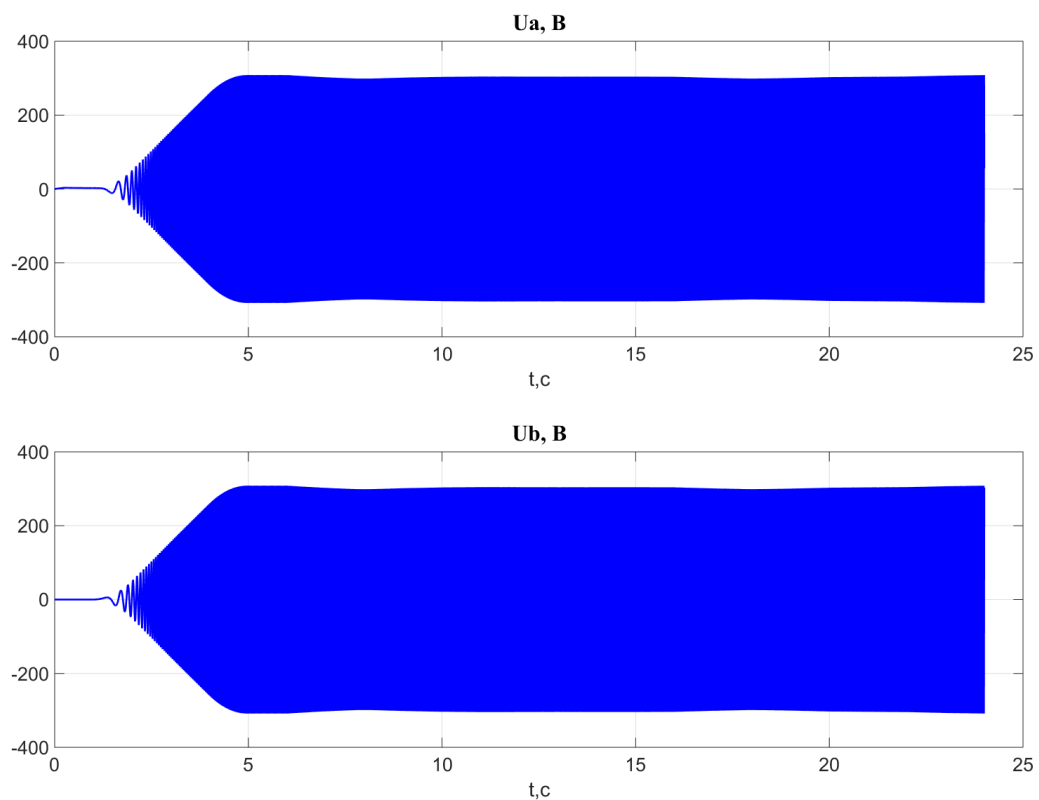


Рисунок 4.12 – Перехідні процеси напруги( $U_a$ ,  $U_b$ ) при русі вниз у будній день

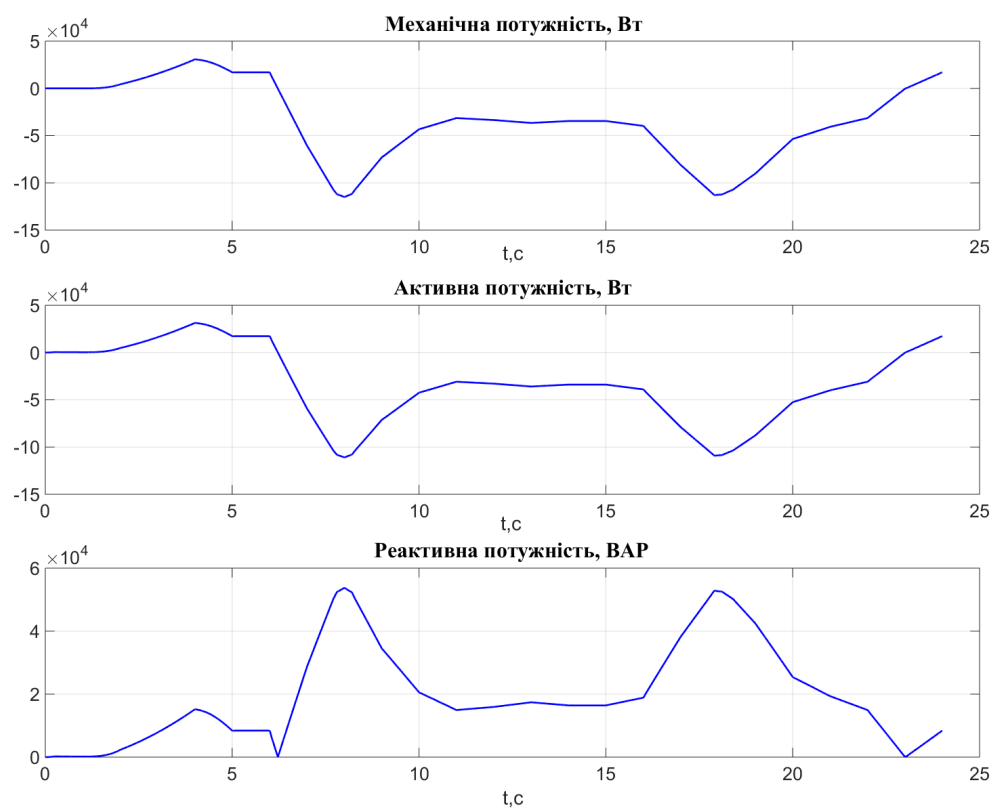


Рисунок 4.13 – Перехідні процеси механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей при русі вниз у будній день

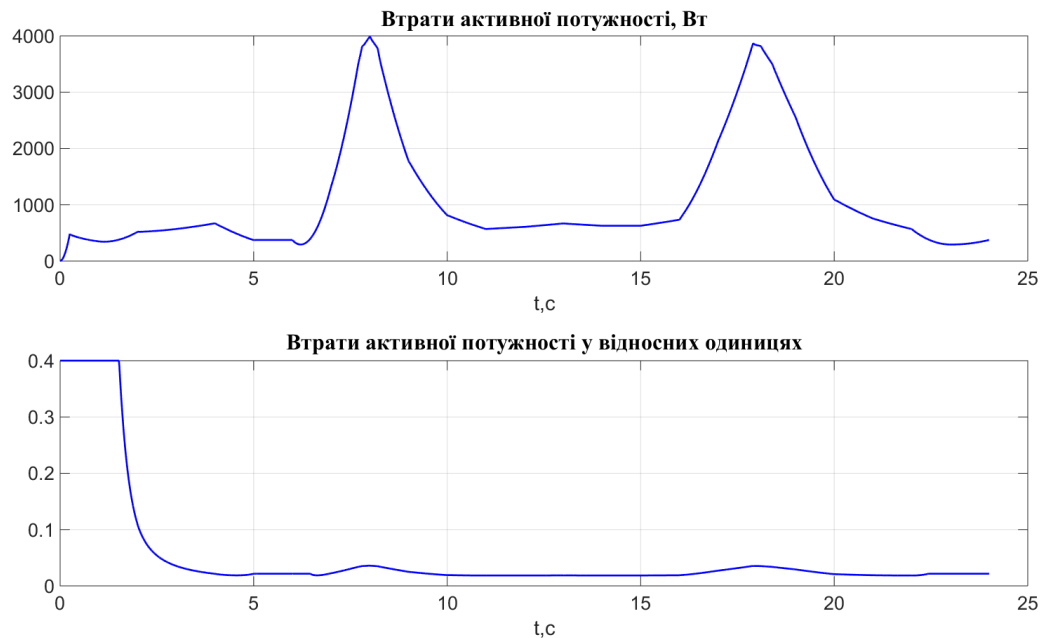


Рисунок 4.14 – Графік перехідних процесів втрат активної потужності( $\Delta P_a$ ) та ( $\Delta P_a(\%)$ ) при русі вниз у будній день

Таблиця 4.2 – Результати моделювання режиму підйому вниз в будній день

| Спуск вниз у будній день      |       |              |                  |         |         |       |       |       |       |        |
|-------------------------------|-------|--------------|------------------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                               | $P_r$ | $\Delta P_a$ | $\Delta P_a(\%)$ | $P_m$   | $P_a$   | $U_a$ | $U_b$ | $I_d$ | $I_q$ | $M$    |
| Холостий хід(5)               | 8344  | 372.4        | 0.022            | 16860   | 17380   | 308.5 | 300   | 0.99  | 38.3  | 163.7  |
| Максимальне навантаження(8)   | 53660 | 3989         | 0.036            | -114800 | -110800 | 299   | 296   | 0.99  | -259  | -1116  |
| Середнє навантаження(15)      | 16420 | 627          | 0.018            | -34540  | -33910  | 300   | 294   | 0.99  | -77.8 | -337.8 |
| Максимальне навантаження (18) | 51870 | 3834         | 0.035            | -113100 | -109100 | 299   | 299   | 0.99  | -251  | -1093  |
| Мінімальне навантаження(23)   | 1033  | 294          | 0.0216           | -340    | 143     | 306.8 | 307   | 0.99  | -2.75 | -27.4  |

За технологічний цикл момент на валу двигуна змінювався з 163.7 Нм під час холостого ходу до значення -1116 Нм під час ранкового піку. Споживання активної потужності змінювалось з 17380 Вт до -110800 Вт. Механічна потужність на холостому ході мала значення 16860 Вт а при

максимальному навантаженні збільшилась до значення -114800. Реактивна потужність збільшилась із 8344 VAR до 53660 VAR. При цьому втрати активної потужності при холостому ході дорівнювали 372.4 Вт а при максимальному навантаженні збільшились до 3989 Вт. У відсотках це склало 2.2 та 3.6 відносно активної потужності при холостому ході та при максимальному навантаженні відповідно.

#### 4.2.3 Дослідження. Вихідний день, режим підйому вантажу.

Результати досліджень наведено на рисунках 4.11 – 4.15 і таблиці 4.3

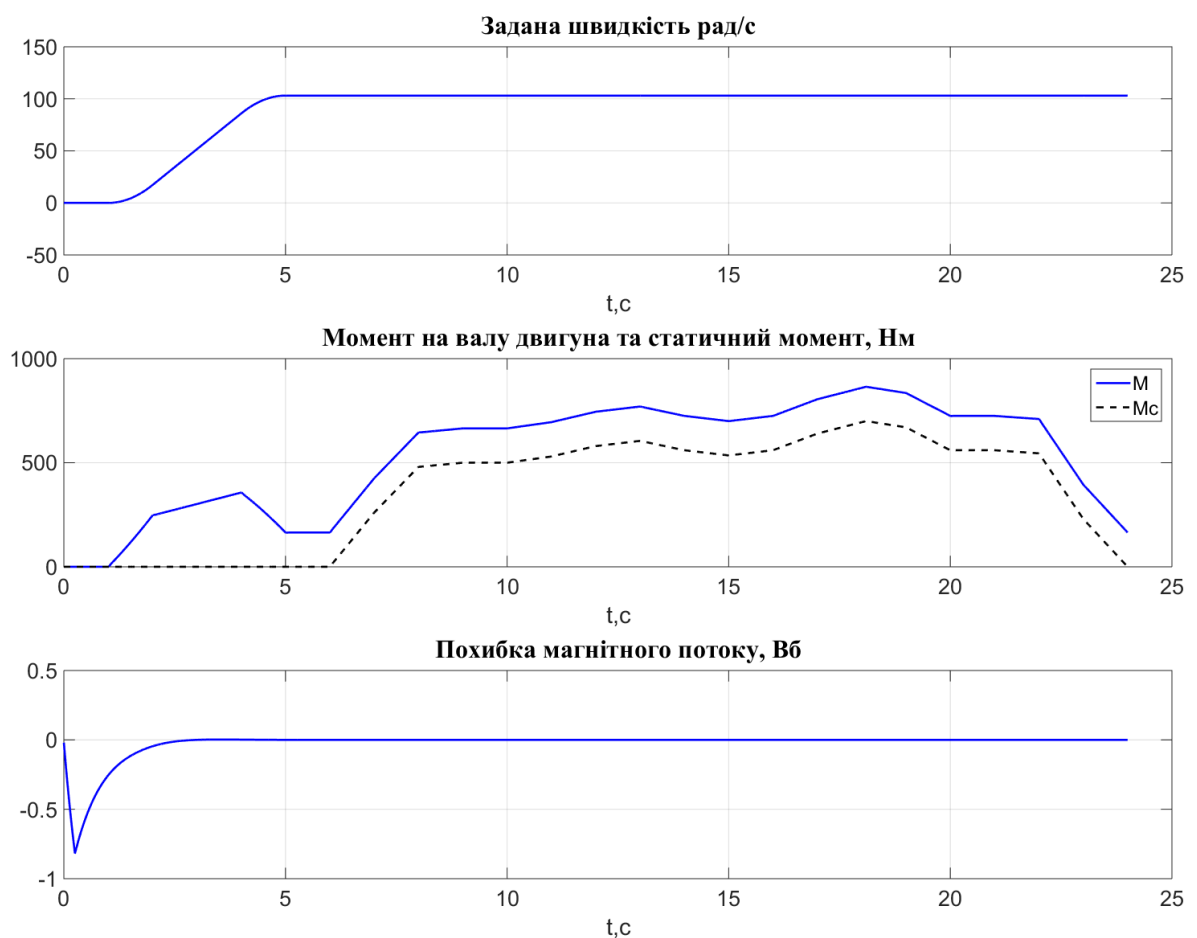


Рисунок 4.15 – Перехідні процеси швидкості( $\omega$ ), моменту( $M$ ,  $M_c$ ) та похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ) при русі вверх у вихідний день

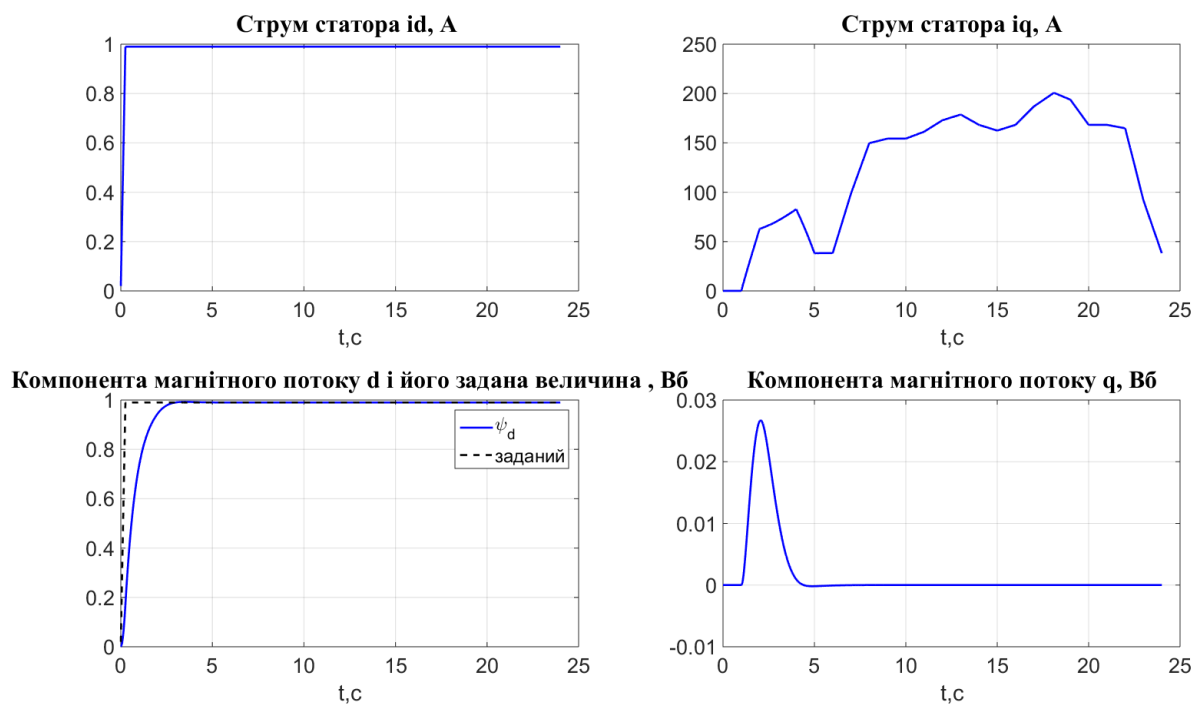


Рисунок 4.16 – Перехідні процеси струму( $i_d$ ,  $i_q$ ) та потокозчеплення( $\psi$ ) при русі вгору у вихідний день

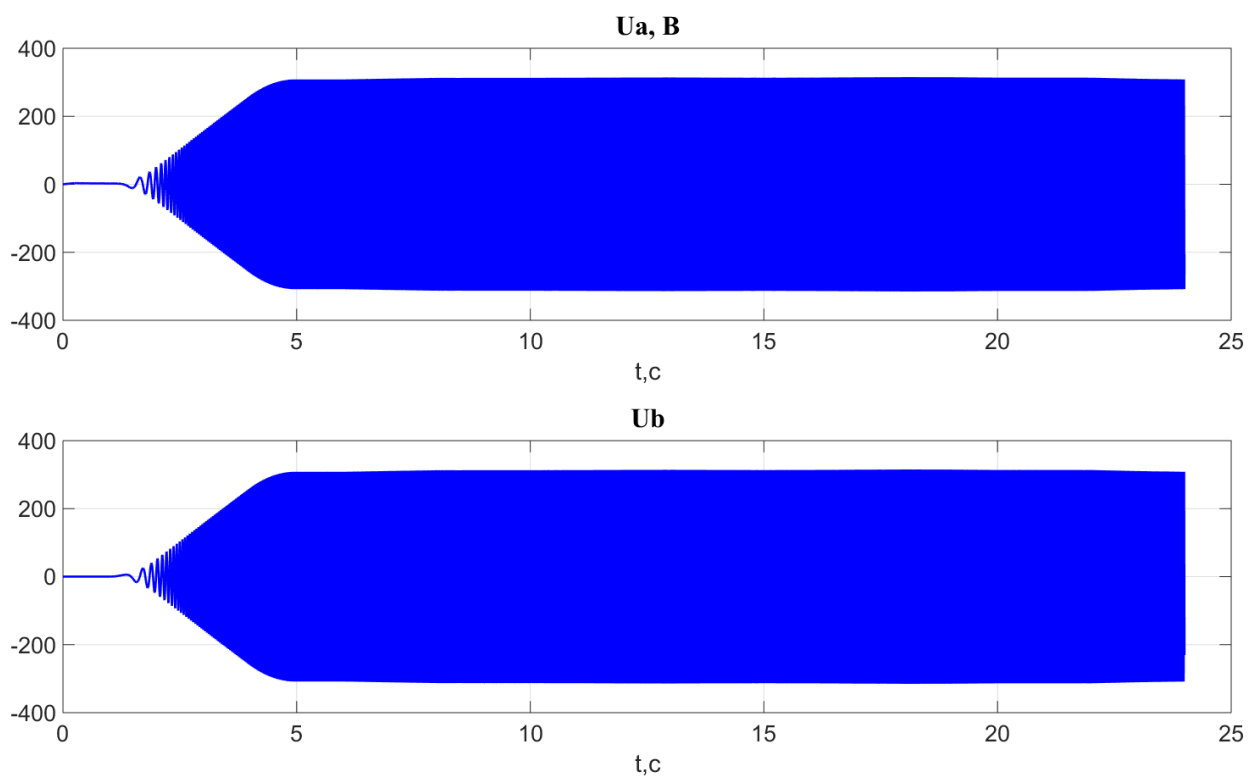


Рисунок 4.17 – Перехідні процеси напруги( $U_a$ ,  $U_b$ ) при русі вгору у вихідний день

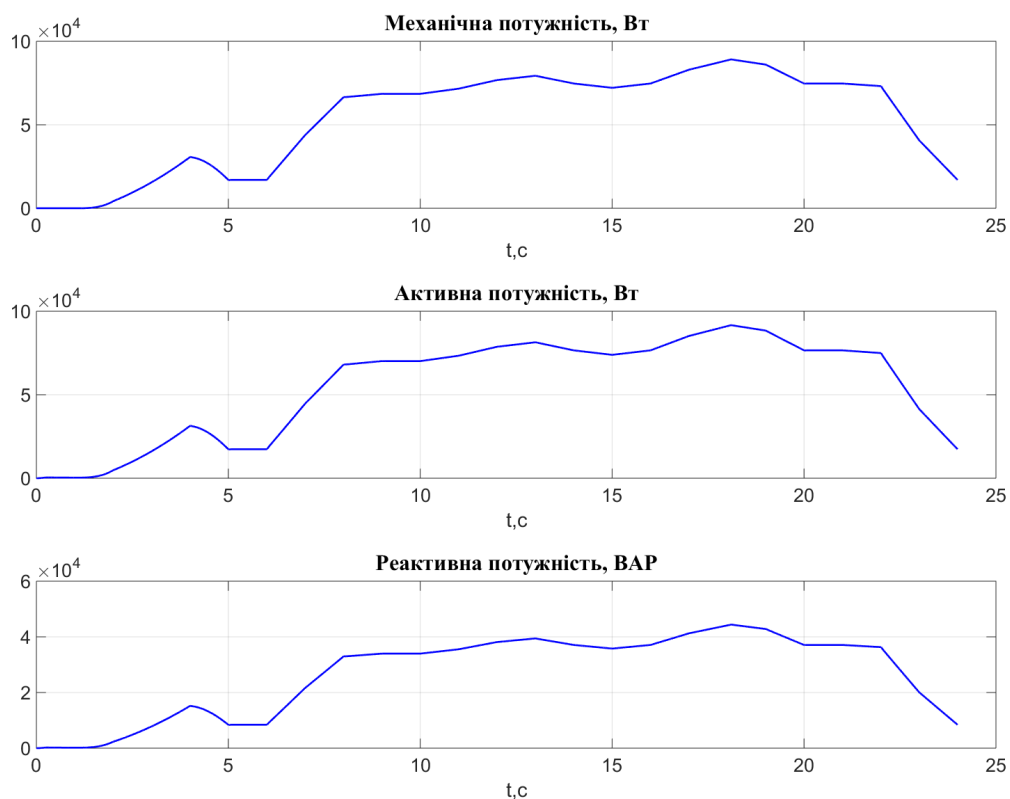


Рисунок 4.18 – Перехідні процеси механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей при русі вгору у вихідний день



Рисунок 4.19 – Графік перехідних процесів втрат активної потужності( $\Delta P_a$ ) та ( $\Delta P_a(\%)$ ) при русі вгору у вихідний день

Таблиця 4.3 – Результати моделювання режиму руху вгору у вихідний день

| Підйом вгору в вихідний день  |       |             |                 |       |       |       |       |      |      |     |
|-------------------------------|-------|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|
|                               | Pr    | $\Delta Pa$ | $\Delta Pa(\%)$ | Pm    | Pa    | Ua    | Ub    | Id   | Iq   | M   |
| Холостий хід(5)               | 8339  | 373.3       | 0.021           | 16870 | 17280 | 304.4 | 308.5 | 0.99 | 38.3 | 164 |
| Максимальне навантаження(8)   | 32970 | 1532        | 0.0225          | 66610 | 67770 | 313   | 313   | 0.99 | 150  | 646 |
| Середнє навантаження(15)      | 35820 | 1747        | 0.0237          | 72150 | 73880 | 304.2 | 340.5 | 0.99 | 163  | 700 |
| Максимальне навантаження (18) | 44110 | 2515        | 0.0272          | 88590 | 91400 | 315   | 315   | 0.99 | 201  | 862 |
| Мінімальне навантаження(23)   | 20410 | 1016        | 0.0239          | 40950 | 42200 | 310   | 310.5 | 0.99 | 90.1 | 404 |

За технологічний цикл момент на валу двигуна змінювався з 164 Нм під час холостого ходу до значення 862 Нм під час вечірнього піку. Споживання активної потужності змінювалось з 17280 Вт до 91400 Вт. Механічна потужність на холостому ході мала значення 16870 Вт а при максимальному навантаженні збільшилась до значення 88590. Реактивна потужність збільшилась із 8339 ВАР до 44110 ВАР. При цьому втрати активної потужності при холостому ході дорівнювали 373.3 Вт а при максимальному навантаженні збільшились до 2515 Вт. У відсотках це склало 2.1 та 2.7 відносно активної потужності при холостому ході та при максимальному навантаженні відповідно.

#### 4.2.4 Дослідження. Вихідний день, режим спуску вантажу.

Результати досліджень наведено на рисунках 4.16 – 4.20 і таблиці 4.4.

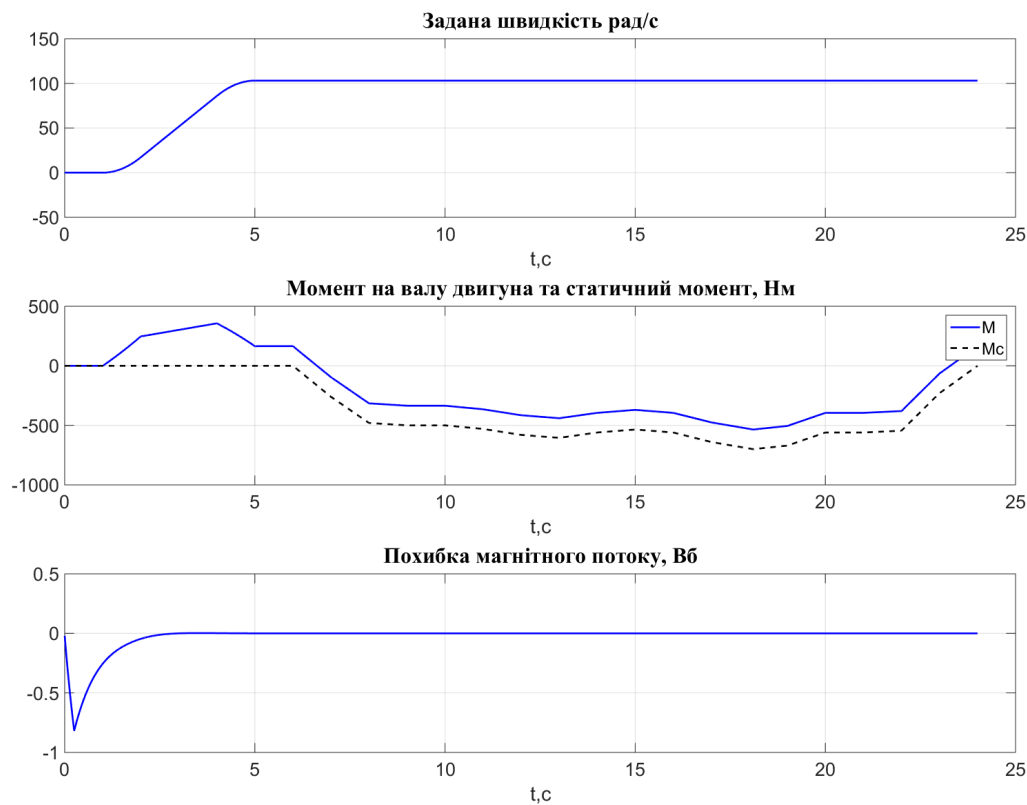


Рисунок 4.20 – Перехідні процеси швидкості( $\omega$ ), моменту( $M$ ,  $M_c$ ) та похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ) при русі вниз у вихідний день

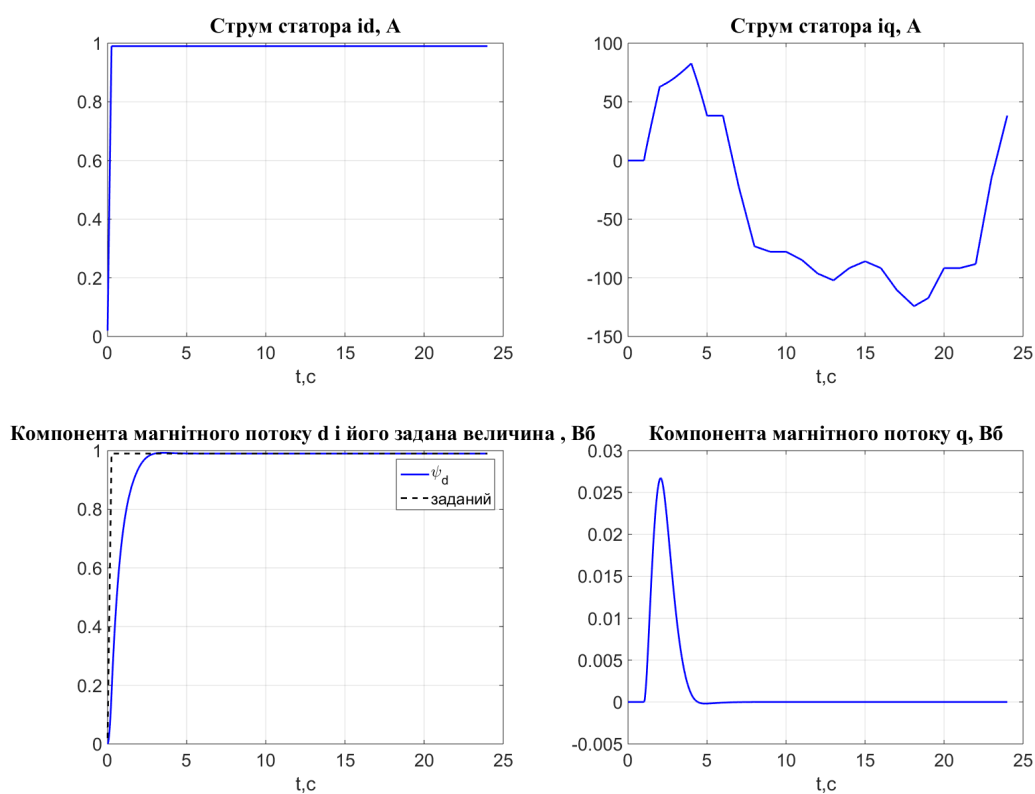


Рисунок 4.21 – Перехідні процеси струму( $i_d$ ,  $i_q$ ) та потокозчеплення( $\psi$ ) при русі вниз у вихідний день

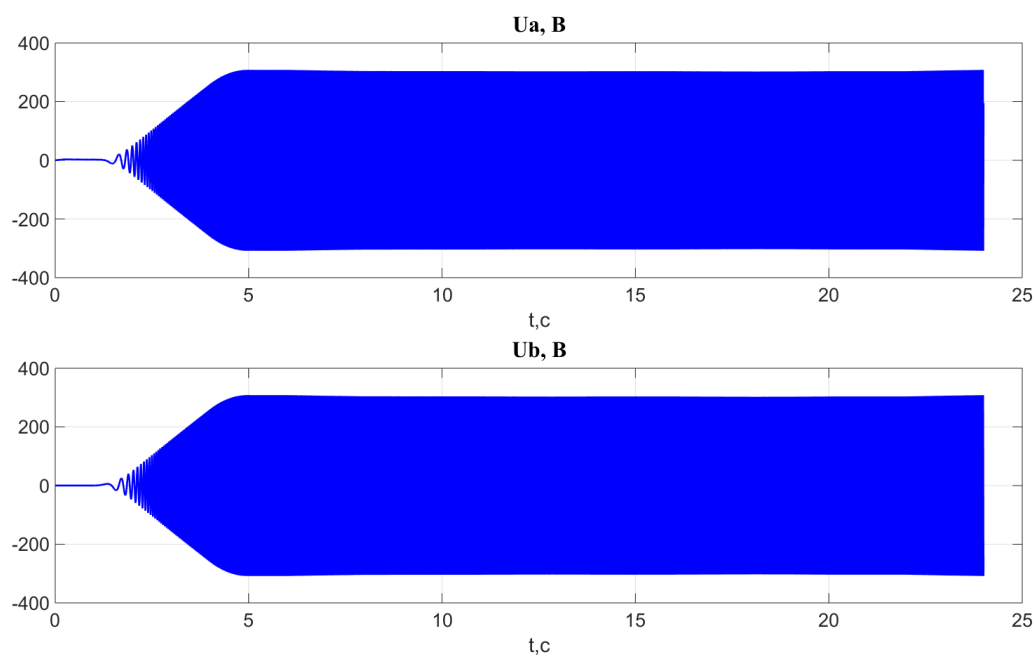


Рисунок 4.22 – Перехідні процеси напруги( $U_a$ ,  $U_b$ ) при русі вниз у вихідний день

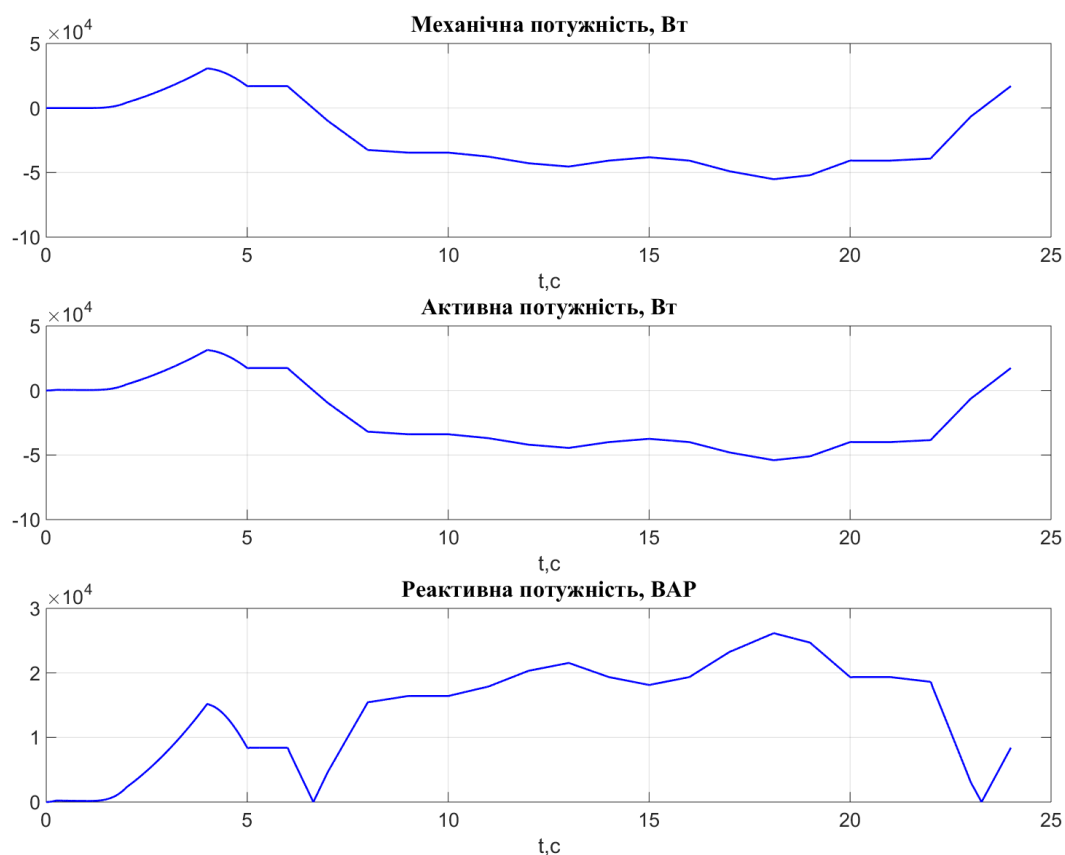


Рисунок 4.23 – Перехідні процеси механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей при русі вниз у вихідний день

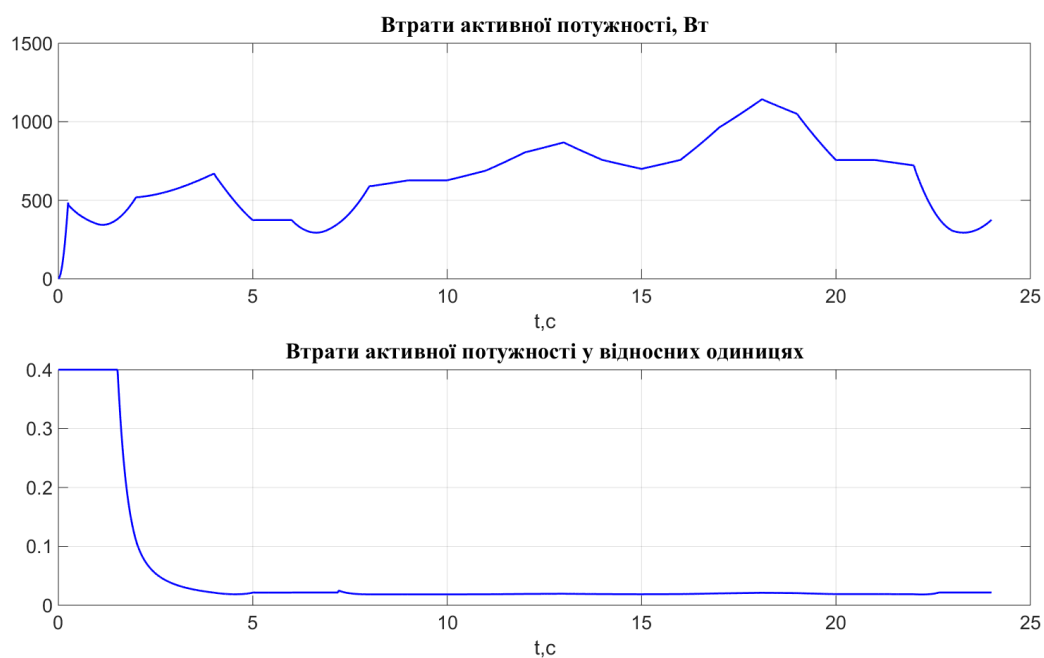


Рисунок 4.24 – Графік перехідних процесів втрат активної потужності( $\Delta P_a$ ) та ( $\Delta P_a(\%)$ ) при русі вниз у вихідний день

Таблиця 4.4 – Результати моделювання режиму руху вниз у вихідний день

| Спуск вниз у вихідний день    |       |             |                 |        |        |       |     |      |       |      |
|-------------------------------|-------|-------------|-----------------|--------|--------|-------|-----|------|-------|------|
|                               | Pr    | $\Delta Pa$ | $\Delta Pa(\%)$ | Pm     | Pa     | Ua    | Ub  | Id   | Iq    | M    |
| Холостий хід(5)               | 8344  | 374         | 0.022           | 16910  | 17380  | 309   | 304 | 0.99 | 38.3  | 165  |
| Максимальне навантаження(8)   | 15320 | 592         | 0.0186          | -32630 | -31440 | 304.4 | 302 | 0.99 | -72.7 | -312 |
| Середнє навантаження(15)      | 18160 | 701         | 0.0187          | -38170 | -37540 | 298   | 287 | 0.99 | -86   | -370 |
| Максимальне навантаження (18) | 26050 | 1138        | 0.021           | -54960 | -53630 | 303   | 303 | 0.99 | -123  | -535 |
| Мінімальне навантаження(23)   | 1937  | 306         | 0.0216          | -7109  | -6303  | 306   | 306 | 0.99 | -13.3 | -74  |

За технологічний цикл момент на валу двигуна змінювався з 165 Нм під час холостого ходу до значення -535 Нм під час вечірнього піку. Споживання активної потужності змінювалось з 17380 Вт до -53630 Вт. Механічна потужність на холостому ході мала значення 16910 Вт а при максимальному навантаженні збільшилась до значення -54960. Реактивна потужність збільшилась із 8344 ВАР до 26050 ВАР. При цьому втрати активної потужності при холостому ході дорівнювали 374 Вт а при максимальному навантаженні збільшились до 1138 Вт. У відсотках це склало 2.2 та 2.1 відносно активної потужності при холостому ході та при максимальному навантаженні відповідно.

#### 4.2.5 Дослідження. Будній день, режим підйому вантажу із швидкістю $0.2 \cdot \omega_n$ .

Результати досліджень наведено на рисунках 4.21 – 4.25 і таблиці 4.5

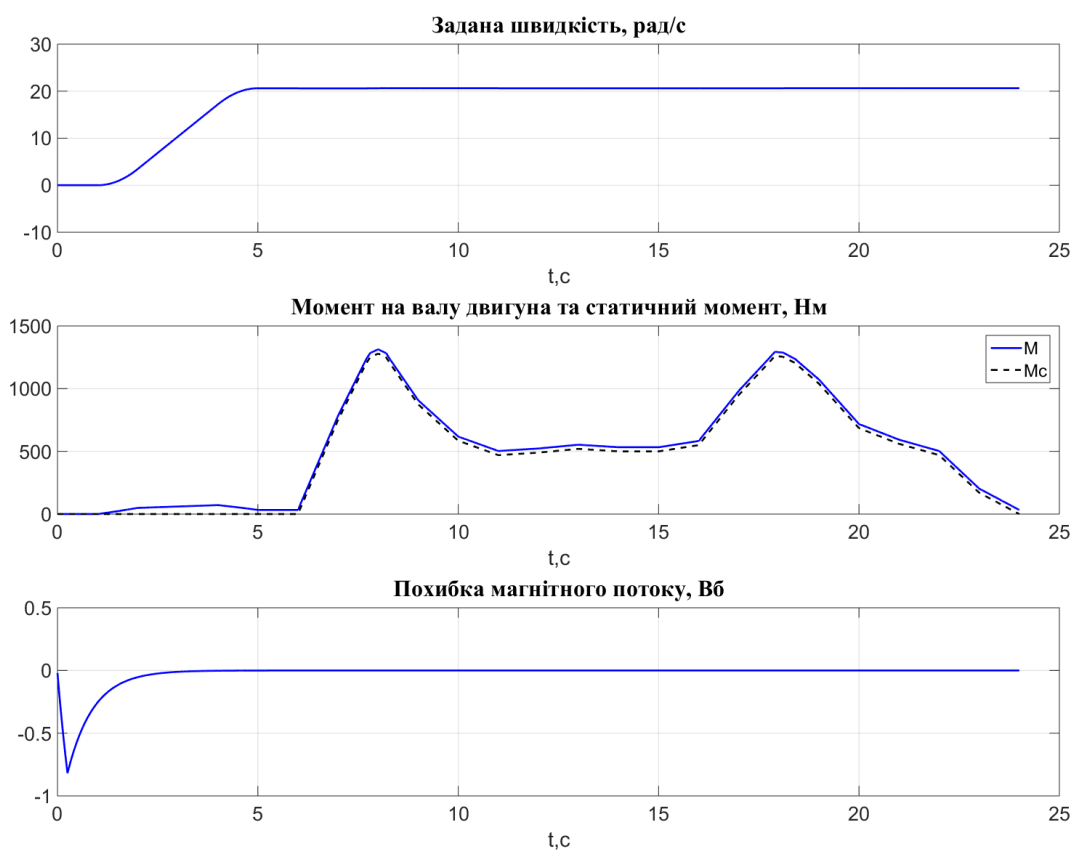


Рисунок 4.25 – Перехідні процеси швидкості( $\omega$ ), моменту( $M$ ,  $M_c$ ) та похибки потокозчеплення( $\Delta\psi$ ) при русі вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

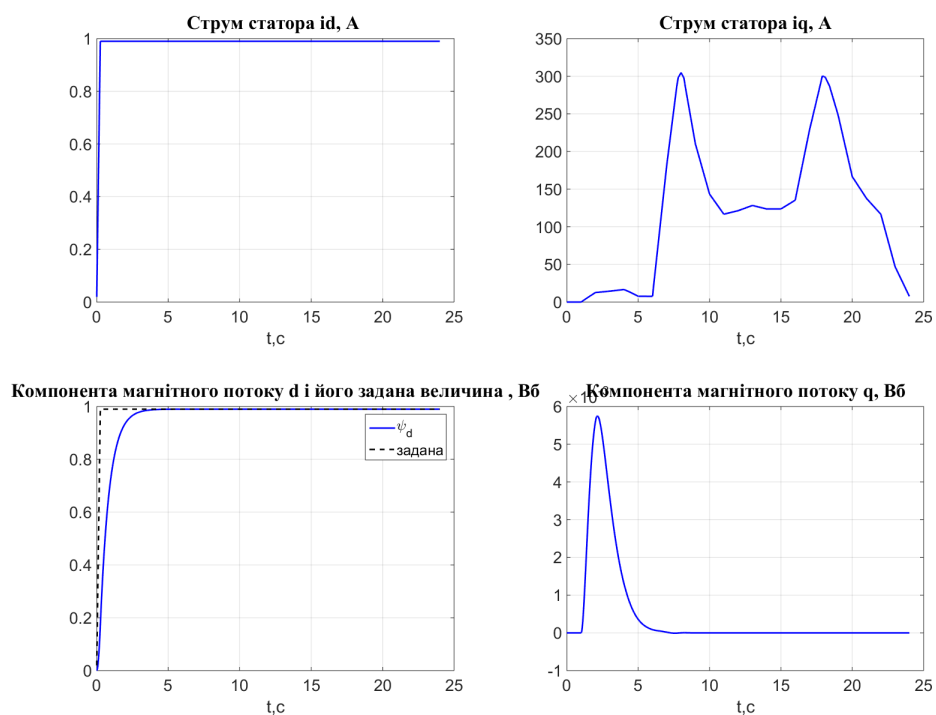


Рисунок 4.26 – Перехідні процеси струму( $i_d$ ,  $i_q$ ) та потокозчеплення( $\psi$ ) при русі вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

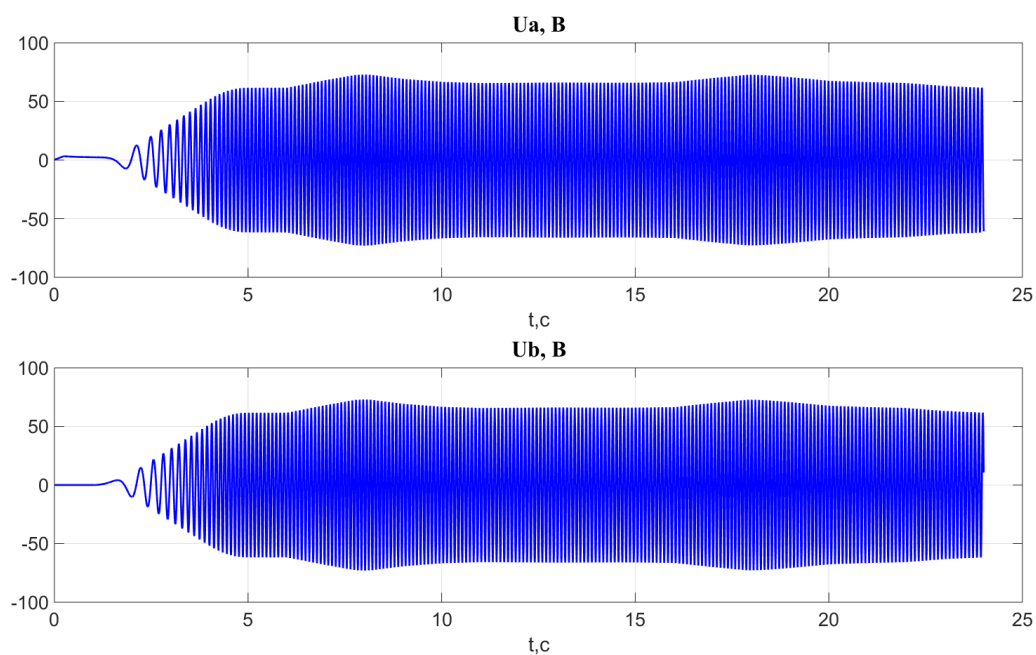


Рисунок 4.27 – Перехідні процеси напруги( $U_a, U_b$ ) при русі вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

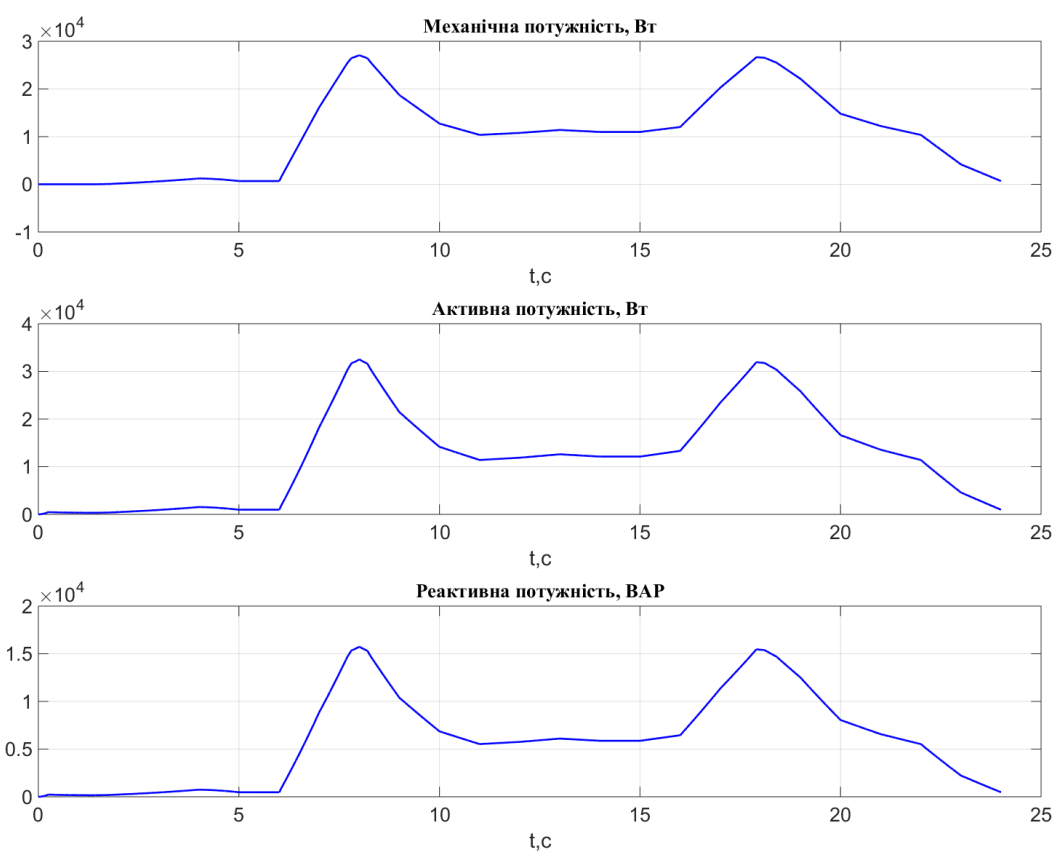


Рисунок 4.28 – Перехідні процеси механічної( $P_m$ ), активної( $P_a$ ) та реактивної( $P_r$ ) потужностей при русі вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

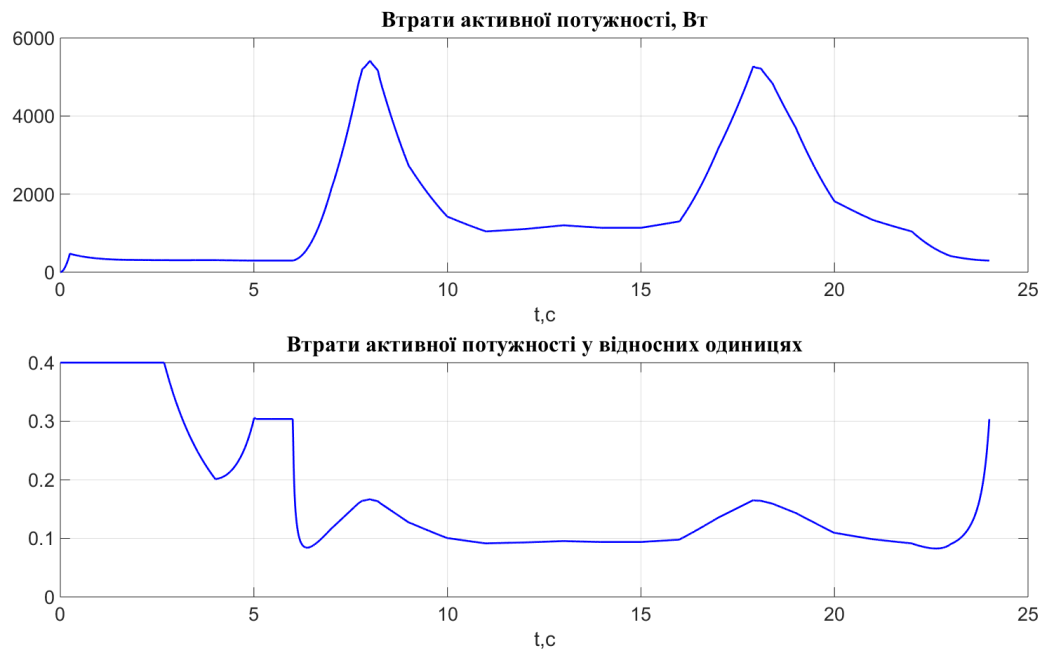


Рисунок 4.29 – Графік перехідних процесів втрат активної потужності( $\Delta P_a$ ) та ( $\Delta P_a(\%)$ ) при русі вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

Таблиця 4.5 – Результати моделювання режиму руху вгору у будній день зі швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

| Підйом вгору в будній день при швидкості $0.2 \cdot \omega_n$ |       |              |                  |       |       |      |      |      |       |       |
|---------------------------------------------------------------|-------|--------------|------------------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
|                                                               | Pr    | $\Delta P_a$ | $\Delta P_a(\%)$ | Pm    | Pa    | Ua   | Ub   | Id   | Iq    | M     |
| Холостий хід(5)                                               | 470   | 297          | 0.3              | 692   | 977   | 62   | 62   | 0.99 | 7.7   | 33    |
| Максимальне навантаження(8)                                   | 15660 | 5416         | 0.17             | 27020 | 32270 | 72   | 73   | 0.99 | 303.8 | 1309  |
| Середнє навантаження(15)                                      | 5872  | 1136         | 0.094            | 10990 | 12120 | 65   | 66   | 0.99 | 123.6 | 538   |
| Максимальне навантаження_(18)                                 | 15430 | 5215         | 0.17             | 26660 | 31870 | 73   | 73   | 0.99 | 298.5 | 1295  |
| Мінімальне навантаження(23)                                   | 2288  | 405          | 0.09             | 3994  | 4779  | 62.5 | 63.2 | 0.99 | 48.24 | 205.3 |

За технологічний цикл момент на валу двигуна змінювався з 33 Нм під час холостого ходу до значення 1309 Нм під час ранкового піку. Споживання активної потужності змінювалось з 977 Вт до 32270 Вт. Механічна потужність на холостому ході мала значення 692 Вт а при максимальному навантаженні збільшилась до значення 27020. Реактивна потужність збільшилась із 470 ВАР до 15660 ВАР. При цьому втрати активної потужності при холостому ходу

дорівнювали 297 Вт а при максимальному навантаженні збільшились до 5416 Вт. У відсотках це склало 30 та 17 відносно активної потужності при холостому ході та при максимальному навантаженні відповідно.

### **Результати дослідження втрат активної потужності впродовж добового циклу роботи тунельного ескалатору**

Результати приведені в таблиці 4.6

Таблиця 4.6 – Втрати сумарної активної потужності за технологічний добовий цикл

| Режим роботи                                         | Сумарна активна потужність за добу, Вт | Сумарна механічна потужність за добу, Вт | Втрати активної потужності за добу, Вт | Втрати активної потужності за добу у В.О. |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| Будній день, підйом вантажу при $\omega_n$           | 1642500                                | 1593600                                  | 48900                                  | 0.030                                     |
| Будній день, спуск вантажу при $\omega_n$            | -803860                                | -829740                                  | 25880                                  | 0.032                                     |
| Вихідний день, підйом вантажу при $\omega_n$         | 1344100                                | 1311000                                  | 33100                                  | 0.025                                     |
| Вихідний день, спуск вантажу при $\omega_n$          | -531700                                | -547140                                  | 15440                                  | 0.029                                     |
| Будній день, підйом вантажу при $0.2 \cdot \omega_n$ | 295010                                 | 257610                                   | 37400                                  | 0.127                                     |

За технологічний добовий цикл сумарне значення активної потужності змінюються в межах від 1642500 Вт до 295010Вт. Сумарна механічна потужність змінюється від 1593600 до 257610. Сумарні втрати активної потужності змінюються від 48900Вт до 15440Вт, що складає 3% та 2.9% відповідно.

### **4.3 Порівнювальний аналіз результатів досліджень.**

Для зручності аналізу прийнято наступні позначення зарактеристик перехідних процесів у відповідності до технологічних циклів:

1 – підйом в будній день з швидкістю

2 – спуск в будній день

3 – підйом у вихідний день

4 – спуск у вихідний день

5 – підйом в будній день з швидкістю  $0.2 \cdot \omega_n$

Результати аналізу надані на рисунках 4.26 – 4.33.

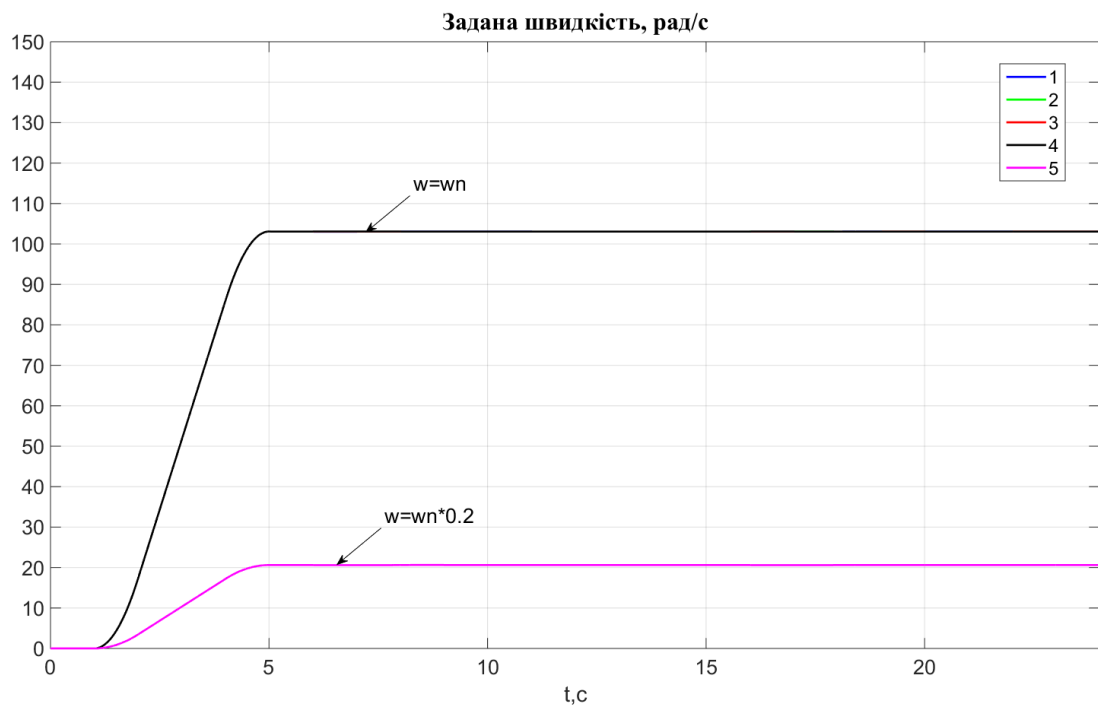


Рисунок 4.30 – Порівняння графіків перехідних процесів швидкості при різних режимах роботи

З графіку перехідного процесу швидкості можна зробити висновок що при векторному керуванні двигун буде відпрацьовувати задану швидкість навіть в нижньому діапазоні і при значному навантаженні.

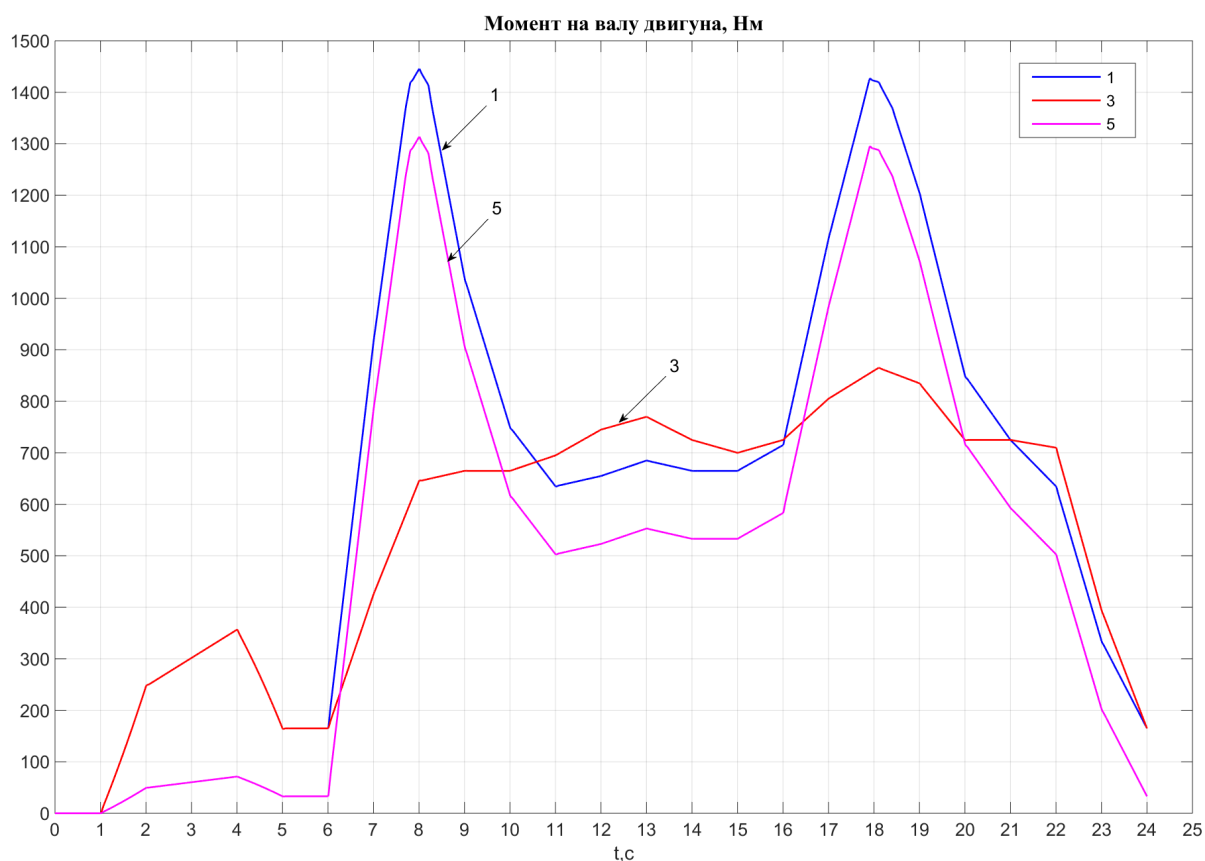


Рисунок 4.31 – Порівняння графіків перехідних процесів моменту на валу двигуна при різних режимах роботи у випадку руху ескалатора вгору



Рисунок 4.32 – Порівняння графіків перехідних процесів моменту на валу двигуна при різних режимах роботи у випадку руху ескалатора вниз

З графіків перехідних процесів моменту на валу двигуна можна зробити висновок що різниця між значенням моменту у вихідні і будні дні становить приблизно 55% під час ранкового піку та 40% під час вечірнього. При середньому пасажиропотоку різниця між значеннями складає приблизно 5%, але значення моменту у вихідний день перевищує значення у будній день, що зумовлено зайнятістю людей(зазвичай у будні дні більшість громадян в 15:00 знаходяться на роботі та не користуються метрополітенем, а у вихідні дні пасажиропоток в такий час більший отже і більша завантаженість ескалатору). В 23:00 різниця навантаження збільшується приблизно до 15%. При режимі підйому вантажу зі зниженою швидкістю різниця в навантаженні в час пік складає 9%. Також зменшився момент двигуна пропорційно зниженню швидкості при розгоні та роботі на холостому ходу.

У режимі спуску вантажу двигун, при появі навантаження, переходить в генераторний режим. Момент на валу міняє знак і різниця між значенням моменту в будній та вихідний днями під час ранкового піку сягає 70%, при вечірньому часу пік різниця зменшується до 50%. При середньому пасажиропотоку ситуація така ж як і у випадку руху вгору – значення моменту на валу двигуна більше у режимі руху вихідного дня, проте різниця збільшилась до 10% відносно руху вгору.

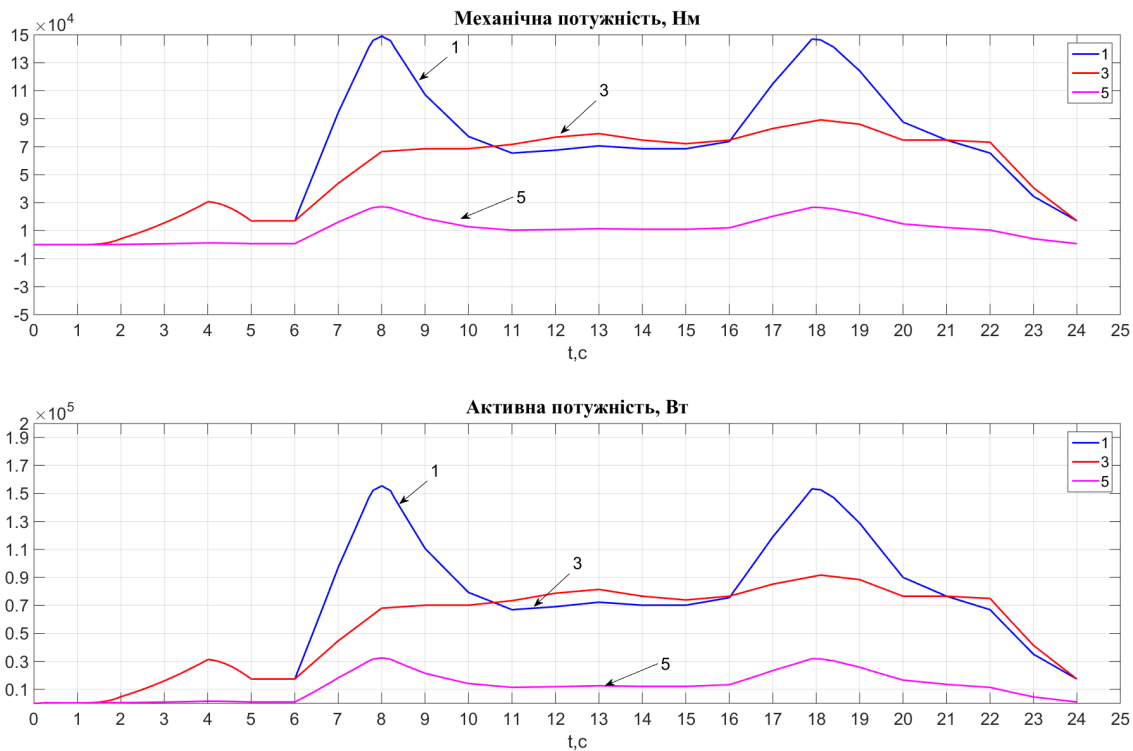


Рисунок 4.33 – Порівняння графіків перехідних процесів механічної та активної потужностей при різних режимах роботи у випадку руху вгору

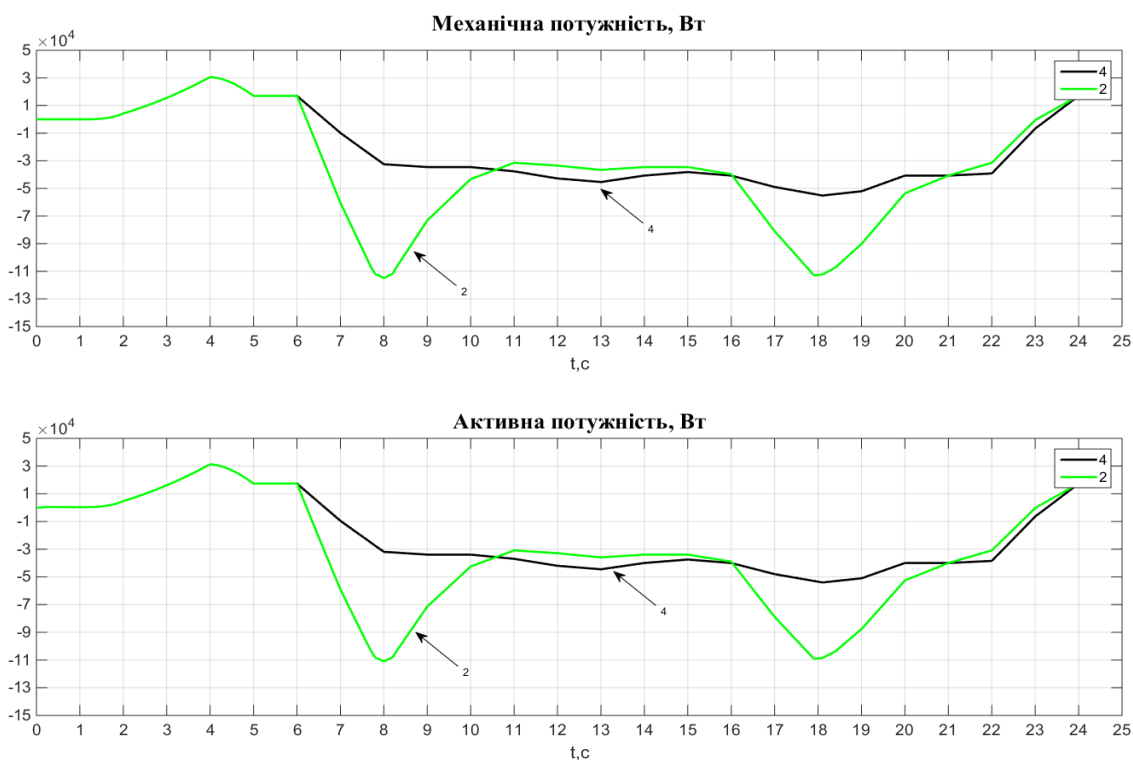


Рисунок 4.34 – Порівняння графіків перехідних процесів механічної та активної потужностей при різних режимах роботи у випадку руху ескалатора

З графіків перехідних процесів механічної потужності видно, що значення механічної та активної потужності у режимі роботи у будній день майже завжди, крім проміжку часу з 10:30 до 16 (під час середнього навантаження), більше. Різниця між значенням активної потужності буднім та вихідним днями, під час руху вниз, у ранковий час пік становить 45%, у вечірній – 40%. Під час зниження навантаження до середнього значення різниця зменшується до 6% але вже на користь режиму, що моделює роботу у вихідний день. У випадку зміни напрямку руху вниз – різниця під час пік збільшується, 70% під час ранкового піку та 60% під час вечірнього. При зниженні навантаження до середнього аналогічно до режиму руху вгору різниця зменшується до 10%. При мінімальному навантаженні різниця становить 16% при русі вгору та 95% під час руху вниз. Такий результат зумовлений зниженням навантаження при генераторному режимі двигуна. У режимі зниженої швидкості механічна потужність у часи пік зменшується на 80% при середньому та мінімальному навантаженні на 85% та майже 90% відповідно.

Проаналізувавши графіки перехідних процесів активної потужності можна зробити висновок що різниця в процентному співвідношенні між активними потужностями під час різних режимів роботи повторює різницю між механічними потужностями.

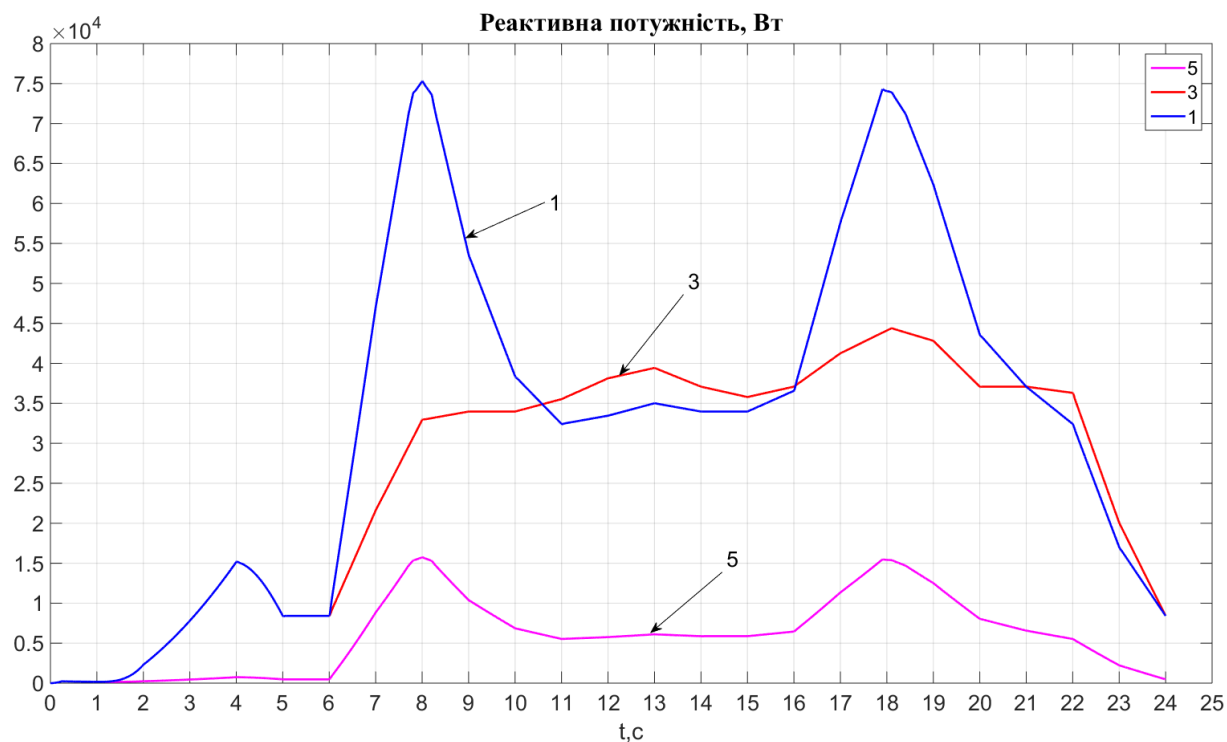


Рисунок 4.35 – Порівняння графіків перехідних процесів реактивної потужності при різних режимах роботи у випадку руху ескалатора вгору

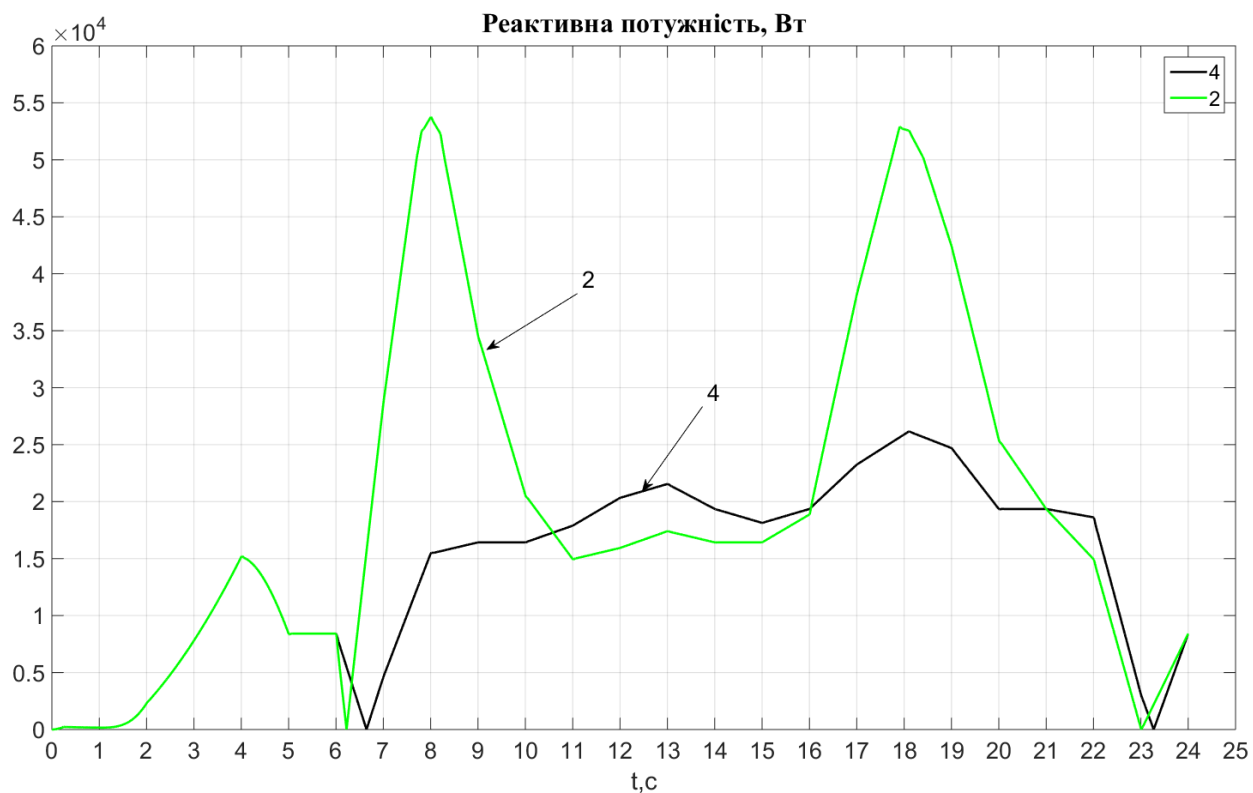


Рисунок 4.36 – Порівняння графіків перехідних процесів реактивної потужності при різних режимах роботи у випадку руху ескалатора вниз

З графіків перехідних процесів реактивної потужності видно, що значення реактивної потужності у режимі роботи у будній день майже завжди, крім проміжку часу з 10:30 до 16 (під час середнього навантаження), більше. У час пік при режимі роботи у будній день на спуск вантажу зменшується на 55% та 40% у ранковий та вечірній відповідно. У випадку зміни напрямку руху, у будній день різниця між потужностями буде становити 30%, у вихідний на 80% та 65% відповідно. При роботі на зниженій швидкості різниця становить 80%.

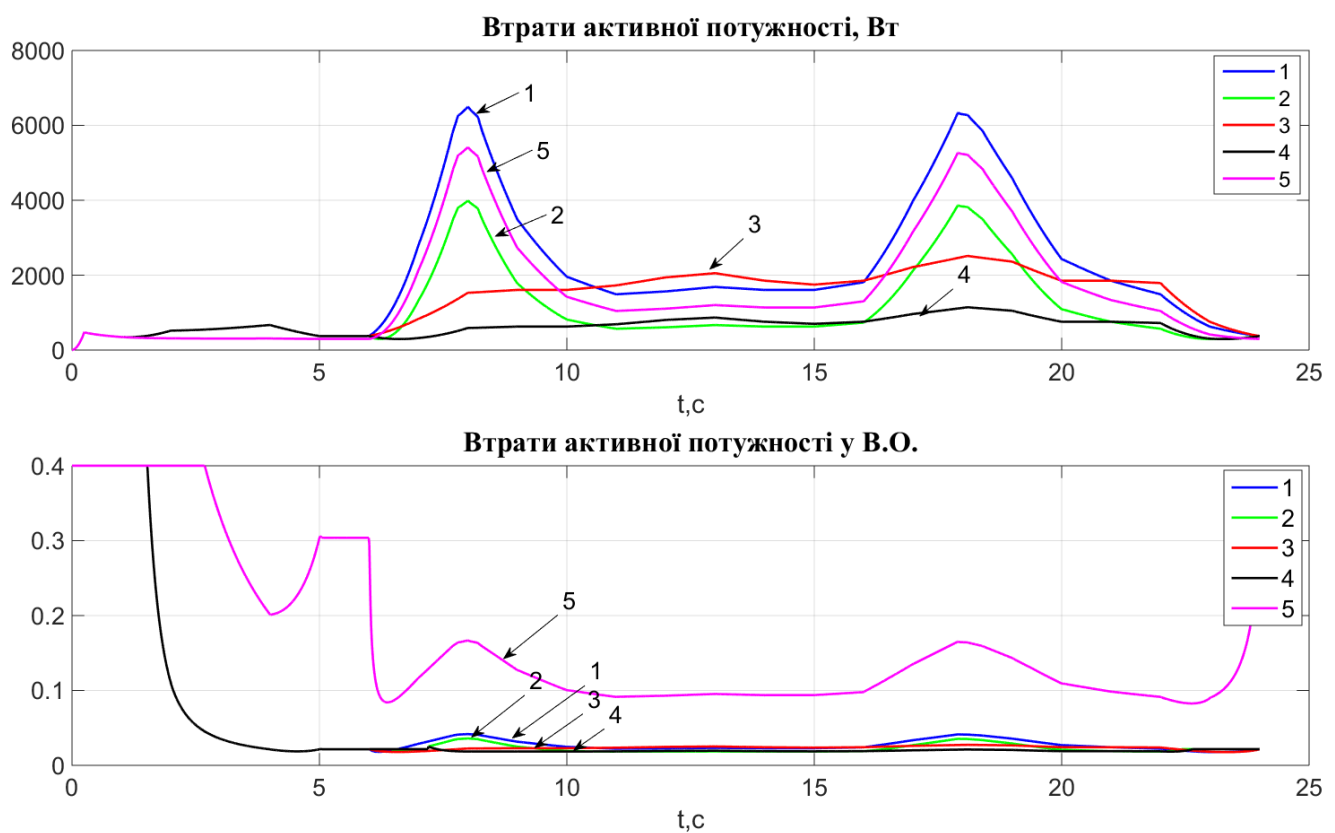


Рисунок 4.37 – Порівняння графіків перехідних процесів втрат активної потужності у абсолютних і відносних одиницях при різних режимах роботи

З графіків перехідних процесів втрат активної потужності видно, що значення механічної та активної потужності у режимі роботи у будній день майже завжди, крім проміжку часу з 10:30 до 16 (під час середнього навантаження), більше. При холостому ході та номінальній швидкості втрати однакові, однак у режимі при зменшеній швидкості втрати зменшуються на

20% від значення при режимі з номінальною швидкістю. У час пік під час зміни напрямку руху вниз втрати зменшуються на 17%, а під час зменшення швидкості при русі вгору на 40%. У режимі підйому у вихідні дні втрати зменшуються на 75% та 60% під час ранкового та вечірнього піків. У режимі спуску на 91% та 80% відповідно.

Під час зниженого пасажиропотоку в 15:00 найбільші втрати під час режиму підйому у вихідний день на 60% більше чим під час спуску. Під час підйому в будній день втрати менше на 10%, під час спуску на 65%. Під час роботи в режимі зниження швидкості втрати зменшуються 35%.

Аналізуючи графіки втрат активної потужності у відносних одиницях, беручи до уваги значення втрат за добу, можна зробити наступні висновки:

- При режимі роботи у будній день на підйом втрати активної потужності становлять  $\Delta P_a$  3% від загальної активної потужності.
- При режимі роботи у будній день на спуск втрати активної потужності становлять  $\Delta P_a$  3.2% від загальної активної потужності.
- При режимі роботи у вихідний день на підйом втрати активної потужності становлять  $\Delta P_a$  2.5% від загальної активної потужності.
- При режимі роботи у вихідний день на спуск втрати активної потужності становлять  $\Delta P_a$  2.9% від загальної активної потужності.
- При режимі роботи у будній день на підйом у випадку зниження швидкості до  $0.2 \cdot \omega_n$ , втрати активної потужності становлять  $\Delta P_a$  12.7% від загальної активної потужності.

## **Висновок до розділу 5**

З отриманих результатів можна зробити висновки:

При режимі підйому вгору у будній день значення моменту змінюється з 164 Нм до 1445 Нм у ранковий час пік. Активна потужність змінюється з 17220 Вт до 155500 Вт. Механічна потужність змінюється з 170000 Вт до 149000 Вт. Значення реактивної потужності змінюється з

8449 ВАР до 75300 ВАР. Втрати активної потужності змінюються з 372.6Вт до 6495 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.16% та 4.18% відповідно.

При режимі спуску вниз у будній день значення моменту змінюється з 163.7 Нм до -1116 Нм у ранковий час пік. Активна потужність змінюється з 17380 Вт до -110800 Вт. Механічна потужність змінюється з 16860Вт до -114800 Вт. Значення реактивної потужності змінюється з 8344 ВАР до 53660 ВАР. Втрати активної потужності змінюються з 372.4 Вт до 3989 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.2% та 3.6 відповідно.

При режимі підйому вгору у вихідний день значення моменту змінюється з 164 Нм до 862 Нм у вечірній час пік. Активна потужність змінюється з 17280 Вт до 91400 Вт. Механічна потужність змінюється з 16870 Вт до 88590 Вт. Значення реактивної потужності змінюється з 8339 ВАР до 44100 ВАР. Втрати активної потужності змінюються з 373.3Вт до 2515 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.1% та 2.7 відповідно.

При режимі спуску вниз у вихідний день значення моменту змінюється з 165 Нм до -535 Нм у ранковий час пік. Активна потужність змінюється з 17380 Вт до -53630 Вт. Механічна потужність змінюється з 16910 Вт до -54960 Вт. Значення реактивної потужності змінюється з 8449 ВАР до 75300 ВАР. Втрати активної потужності змінюються з 374 Вт до 6495 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.2% та 2.1 відповідно.

При режимі підйому вгору у будній день при зниженій швидкості  $0.2 \cdot \omega_n$  значення моменту змінюється з 33 Нм до 1309 Нм у ранковий час пік. Активна потужність змінюється з 977 Вт до 32270 Вт. Механічна потужність змінюється з 697 Вт до 27020 Вт. Значення реактивної потужності змінюється з 470 ВАР до 15660 ВАР. Втрати активної потужності змінюються з 297 Вт до 5416 Вт, що у процентному

співвідношенні до споживаної активної потужності становить 30% та 17% відповідно.

Отримані результати дають можливість оцінити рівень енергетичних характеристик та втрат активної потужності і сформулювати перспективні напрямки з підвищення енергоефективності функціонування ескалаторів метрополітену. В тому числі і при регулюванні швидкості руху тягового елемента.

## 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту

Зі зростанням, міста стають все більш вертикальними, вони розширюються під землю завдяки залізничним тунелям та над землею у вигляді високих будівель, що формують силует міста. Міста стають не тільки ширшими і вищими, а й глибшими. - ескалатори невід'ємна частина сучасного міста. Питання людського потоку у великих містах ставляться не тільки до того, як люди пересуваються горизонтально залізницями та автомобільними дорогами, добираючись до центру і назад. Сюди також входить і вертикальне переміщення. Це ліфти та ескалатори, які люди, які добираються на роботу і додому, використовують щодня для того, щоб потрапити з-під землі на поверхню. Ескалатори відіграють дуже важливу роль у мобільності сучасних міст – вони перевозять значні пасажиропотоки протягом дня. Важливу роль ескалатори відіграють при перевезенні пасажирів метрополітену. Так, Київське метро перевозить щодня до мільйона пасажирів, а в таких величезних містах, як Шанхай це число зростає до 8 мільйонів. Отже надійні, комфортні та безпечні ескалатори – одна із складових інфраструктури сучасного міста.

Проте, у деяких станціях київського метрополітену, застарілі ескалатори, які були встановлені ще у радянські часи та потребують заміни. Завершення їхнього експлуатаційного строку ставить під загрозу безпеку та нормальне функціонування системи перевезення пасажирів. Тому заміна застарілих механізмів на більш сучасні стає важливим кроком для забезпечення безпеки та зручності пересування мешканців міста.

Мета цього розділу – пропозиція виробництва сучасного та заміни старого електромеханічного обладнання, що використовується в КП «Київський метрополітен», в якого спливає експлуатаційний строк, на нове, більш комфортне та безпечне для пасажирів. Цей розділ формулює маркетингові аспекти створення такого стартап-проекту. Ідея проекту, його переваги та недоліки наведені у таблицях 5.1 – 5.2.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї проекту

| Зміст ідеї                                                                                                                                              | Напрямки застосування                                                                             | Вигоди для користувача                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Виробництво та заміна застарілих, радянських електромеханічних систем в КП «Київський метрополітен», на нові, більш надійні, комфортабельні та безпечні | 1. Нові електромеханічні системи для покращення перевезення пасажирів та експлуатації ескалатора. | Більш комфортний та безпечний режим роботи для пасажирів. Менш затратна та більш надійна експлуатація. |
|                                                                                                                                                         | 2. Рекуперація енергії у випадку руху ескалатора вниз.                                            | Зменшення витрат на електроенергію                                                                     |

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко-економічні характеристики ідеї                    | (потенційні) товари/концепції конкурентів |            |            |            | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|-------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------------|------------|--------------------|------------------------|--------------------|
|       |                                                           | Мій проект                                | Конкурент1 | Конкурент2 | Конкурент3 |                    |                        |                    |
| 1.    | Можливість переміщення пасажирів регулюючи продуктивність | +                                         | -          | -          | -          |                    | +                      |                    |
| 2.    | Енергоефективність керування                              | +                                         | +          | -          | -          |                    |                        | +                  |
| 3.    | Масо-габаритні показники                                  | +                                         | -          | +          | -          |                    |                        | +                  |
| 4.    | Собівартість експлуатації                                 | +                                         | -          | -          | +          |                    | +                      |                    |

Беручи до уваги переваги та недоліки потенційного продукту наведені вище, можливо дати оцінку його конкурентоспроможності на ринку.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Можливість реалізації даного продукту, продемонструє аудит технологій, що використовуватимуться для створення товару та реалізації ідеї проекту. Результати аудиту представлені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна можливість здійснення ідеї проекту

| № п/п                                                                                                                                                                                                                | Ідея проекту                                                                     | Технології її реалізації                                           | Наявність технологій | Доступність технологій |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| 1.                                                                                                                                                                                                                   | Розробляння математичної моделі під дослідження конкретного випадку експлуатації | Реалізація моделі в середовищі прикладних програм Matlab Simulink. | Наявна               | Доступна               |
| 2.                                                                                                                                                                                                                   | Налагодження та подальша експлуатація електромеханічної системи                  | Інструкції для самостійного налагодження та експлуатації.          | Необхідно розробити  | Доступна               |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Створення математичної моделі для подальшого дослідження та оптимізації. Для реалізації проекту електромеханічної системи ескалятора таке рішення є наявним та доступним. |                                                                                  |                                                                    |                      |                        |

## 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Необхідно провести аналіз ринкових можливості запуску проекту. Результати аналізу представлені в таблицях 5.4 – 5.13.

Таблиця 5.4 – Характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № п/п | Показники стану ринку (найменування)                     | Характеристика |
|-------|----------------------------------------------------------|----------------|
| 1     | Кількість головних гравців, од                           | 4              |
| 2     | Загальний обсяг продаж, од/рік                           | 8-10           |
| 3     | Динаміка ринку (якісна оцінка)                           | Зростає        |
| 4     | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Немає          |
| 5     | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації      | Немає          |
| 6     | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %  | ARR=20%        |

Беручи до уваги попередню характеристику можна зробити висновок, що вихід на ринок не має суттєвих труднощів. Державні структури, що відповідають за інфраструктуру можуть проявити інтерес до продукту.

Характеристика потенційних клієнтів приведена в таблиці 5.5

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № п/п | Потреба, що формує ринок                               | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)                                                                  | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару                                                                       |
|-------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Необхідність в оновленні застарілого парку ескалаторів | Будь-яке комунальне підприємство, що займається метрополітеном адже це невід’ємна частина будь-якого міста. | Відмінність відсутня.                                             | Товар має справно працювати. Конструкція повинна бути дешевою та надійною. Монтаж та налаштування |

Фактори, що можуть негативно вплинути на успішність стартап проекту наведені в таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Фактори загроз для стартап проекту

| № п/п | Фактор              | Зміст загрози                                                     | Можлива реакція компанії                                                    |
|-------|---------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Ринкова конкуренція | Великі міжнародні компаній на ринку                               | Маркетингові заходи, підвищення сервісу                                     |
| 2.    | Технічні складнощі  | Досить високі масо-габаритні характеристики товару                | Пошук можливостей для використання менших деталей конструкції.              |
| 3.    | Технічний прогрес   | Досить швидкий розвиток технологій і відповідно старіння продукту | Моніторинг новинок на ринку. Оновлення продукту за першої можливості        |
| 4.    | Фінансовий аспект   | Обмежені ресурси на реалізацію стартапу та подальше виробництво   | Залучання додаткових інвесторів, ефективний фінансовий аудит та планування. |

Фактори, що можуть позитивно вплинути на успіх стартап проекту наведені в таблиці 5.7

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей для стартап проекту

| № п/п | Фактор                                    | Зміст можливості                                 | Можлива реакція компанії                                                         |
|-------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Зростання потреб потенційних користувачів | Збільшення кількості ескалаторів у метрополітені | Розширення рекламних заходів, надання безкоштовного обслуговування на певний час |

|    |                                     |                                                          |                                                                  |
|----|-------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 2. | Інтерес з боку закордонних компаній | Потреба в дешевих та надійних електромеханічних системах | Налагодження співпраці з закордонними партнерами.                |
| 3. | Економічний фактор                  | Оптимізація та здешевлення виробничих процесів           | Використання зекономлених коштів на розширення штату/виробництва |

Аналіз економічної конкуренції представлений в таблиці 5.8

Таблиця 5.8 – Аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища          | В чому проявляється дана характеристика                            | Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)            |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Тип конкуренції: олігополія                | Є щонайменше 4 компанії, що певним чином присутні на ринку України | Проблеми при входженні на ринок. Якісна рекламна кампанія, створення кращих умов для користувачів |
| 2. Рівень конкурентної боротьби: національна  | Боротьба за клієнтів в межах України                               | Впровадження бонусів для державних замовників                                                     |
| 3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева   | Застосування для перевезення пасажирів                             | Покращення характеристик електромеханічної системи                                                |
| 4. За характером конкурентних переваг: цінова | Змагання за клієнта в основі якого лежить цінова політика компаній | Впровадження гнучкої цінової політики                                                             |

Аналіз конкуренції за М. Портером представлений в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі                                                        | Потенційні конкуренти                                                           | Постачальники                                                                             | Клієнти                                                          | Товари-замінники                                              |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                  | Навести перелік прямих конкурентів                                               | Визначити бар'єри входження в ринок                                             | Визначити фактори сили постачальників                                                     | Визначити фактори сили споживачів                                | Фактори загроз з боку замінників                              |
| Висновки:        | На ринку існують 4 конкуренти. Пропонується схожа проте досить дорога продукція. | Можливість входу на ринок є, проте конкуренцію можуть створювати інші компанії. | Постачальників комплектуючих на ринку досить багато тому досить легко знайти альтернативу | Клієнти роблять вибір оцінюючи якість, ціну та відомість бренду. | Аналоги від конкурентів з меншою ціною і більшим функціоналом |

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності                      | Обґрунтування                                                                        |
|-------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Використання сучасних технологій у роботі продукту | Значущість полягає в широкому спектрі галузей виробництва, де може використовуватися |
| 2.    | Взаємодія з партнерами                             | Тісний контакт та співпраця з партнерами та потенційними клієнтами                   |
| 3.    | Низька собівартість                                | Робить товар більш привабливим для кінцевого споживача                               |

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим товаром |    |    |   |    |    |    |
|-------|-------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|----|----|---|----|----|----|
|       |                               |           | -3                                                                | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1     | Універсальність               | 17        |                                                                   |    | +  |   |    |    |    |

|   |                     |    |  |   |  |  |  |  |  |
|---|---------------------|----|--|---|--|--|--|--|--|
| 2 | Низька собівартість | 18 |  | + |  |  |  |  |  |
|---|---------------------|----|--|---|--|--|--|--|--|

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

|                                                                                                                                |                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Сильні сторони: досить низька собівартість, опціональність підбору характеристик товару, сервіс                                | Слабкі сторони: необхідність залучення досить кваліфікованих працівників |
| Можливості: розширення виробництва, здешевлення виробництва, створення більш широкого спектру асортименту продукції та послуг. | Загрози: досить високий рівень конкуренції                               |

#### 5.4 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту

Результати розробки ринкової стратегії проекту приведені у таблицях 5.13-5.16.

Таблиця 5.13 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| № п/п | Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів          | Готовність споживачів сприйняти продукт | Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту) | Інтенсивність конкуренції в сегменті                                         | Простота входу у сегмент                                                             |
|-------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Для комунальних або приватних підприємств в метрополітену | Повна готовність                        | Середній                                            | Існують 4 конкуренти. Але продукція відрізняється за своїми характеристиками | Можливість виходу досить висока оскільки електромеханічна система має певні переваги |

Які цільові групи обрано: У результаті аналізу потенційних груп споживачів було обрано основну цільову групу – комунальні або приватні підприємства, що відповідають за модернізацію та ремонт метрополітену.

Таблиця 5.14 – Визначення базової стратегії розвитку

| № п/п | Обрана альтернатива розвитку проекту       | Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|-------|--------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1.    | Вдосконалення продукту та його виробництва | Агресивний маркетинг      | Висока якість сервісу, низька собівартість                             | Стратегія спеціалізації   |

Базова стратегія конкурентної поведінки представлена в таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| № п/п | Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
|-------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1.    | Ні                                     | Пошук нових споживачів та забирати у конкурентів.                              | Так, з подальшим здешевленням продукту                                      | Концентрований маркетинг         |

Таблиця 5.16 – Визначення стратегії позиціонування

| № п/п | Вимоги до товару цільової аудиторії                             | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових) |
|-------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Доступність, дешевизна, простота в налаштуванні та експлуатації | Стратегія спеціалізації   | Високі                                                       | Дешевизна, якісний сервіс, відкритість до співпраці                                      |

### 5.5 Розробка маркетингової програми проекту

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту представлено у таблицях 5.17-5.21.

Таблиця 5.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба                                   | Вигода, яку пропонує товар              | Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити) |
|-------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Необхідність використання у метрополітені | Дешево оновлення застарілого обладнання | Цінова політика, хороший сервіс                                              |

Таблиця 5.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару                    | Сутність та складові                                                                                                                                                                                                  |      |                |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|
| I. Товар за задумом             | Сучасна електромеханічна система тунельного ескалятора на базі асинхронного електродвигуна, що використовує непряме векторне керування.                                                                               |      |                |
| II. Товар у реальному виконанні | Властивості/характеристики                                                                                                                                                                                            | М/Нм | Вр/Тх /Тл/Е/Ор |
|                                 | 1. Врахування пропускної здатності та особливостей використання при проектуванні системи.<br>2. Розрахунок потужності двигуна.<br>3. Енергоефективний алгоритм керування двигуном.<br>4. Додаткові спеціальні функції | -    | -              |
|                                 | Марка: електромеханічна система ескалятора на базі асинхронного електродвигуна з непрямым векторним керуванням.                                                                                                       |      |                |
| III. Товар із підкріпленням     | Безкоштовна наладка ескалятора при монтуванні                                                                                                                                                                         |      |                |
|                                 | Надання гарантійного та сервісного обслуговування                                                                                                                                                                     |      |                |

За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: паролі та ключі доступу

Таблиця 5.19 – Формування системи збуту

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту                            | Оптимальна система збуту            |
|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.    | Надання доступу до електромеханічної системи        | Комерційна торгівля                                   | Напрямую та при необхідності через посередників | Власна та при необхідності залучена |

Таблиця 5.20 – Концепція маркетингових комунікацій

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування        | Завдання рекламного повідомлення | Концепція рекламного звернення |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1.    | Зменшення витрат                      | Веб-сайт, месенджери, мобільний зв'язок                | Низька собівартість, висока надійність та безпека | Порівняння з конкурентами        | На офіційному сайті            |

### Висновки до розділу 5

1. Було розроблено стартап-проект по впровадженню на ринок електромеханічної системи ескалятора.
2. Було проведено технологічний аудит ідеї та аналіз можливостей ринку для запуску проекту. Також було розроблено стратегію та програму маркетингу.
3. Оцінені позитивні та негативні фактори, які можуть повпливати на успішність проекту.
4. Проаналізовано потенційних конкурентів, партнерів та споживачів для впроваджуваного товару.

## ВИСНОВКИ

Для досягнення поставленої мети всі види робіт виконано в повному обсязі.

1. На основі аналітичного огляду науково-технічної літератури та режимів роботи механізму сформульовані вимоги до електроприводу тунельного ескалятора та визначено, як найбільш раціональна, система частотного керування при використанні векторно-керованого асинхронного двигуна.
2. Виконано розрахунок та вибір елементів електромеханічної системи ескалятора. Проведено тяговий розрахунок, розраховано номінальні параметри двигуна та проаналізовано розподіл навантаження ескалятора в межах технологічного циклу. На основі розрахунку обрано двигун 132кВт 4А315М6У3 та перетворювач частоти АВВ АСS 550-01-290А-4.
3. На основі отриманих математичних моделей елементів електромеханічної системи розроблена модель та проведені дослідження статичних та електромеханічних характеристик тунельного ескалятора.
4. Результати проведених досліджень показали:

При режимі підйому вгору у будній день втрати активної потужності змінюються з 372.6Вт до 6495 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.16% та 4.18% відповідно.

При режимі спуску вниз у будній день втрати активної потужності змінюються з 372.4 Вт до 3989 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.2% та 3.6 відповідно.

При режимі підйому вгору у вихідний день втрати активної потужності змінюються з 373.3Вт до 2515 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.1% та 2.7 відповідно.

При режимі спуску вниз у вихідний день втрати активної потужності змінюються з 374 Вт до 6495 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 2.2% та 2.1 відповідно.

При режимі підйому вгору у будній день при зниженій швидкості  $0.2 \cdot \omega_n$  втрати активної потужності змінюються з 297 Вт до 5416 Вт, що у процентному співвідношенні до споживаної активної потужності становить 30% та 17% відповідно.

Сумарні втрати за добовий технологічний цикл варіюються з 48900Вт для режиму підйому в будній день до 15440 для режиму спуску у вихідний день, що складає від 3% до 2.9% від затраченої активної потужності.

5. Дослідження також показали, що використання векторно-керованих асинхронних двигунів для системи автоматичного управління технологічних циклом ескалаторів забезпечує сталий режим роботи на малих швидкостях, що може бути корисно при вирішенні питань підвищення енергоефективності ескалаторів за рахунок регулювання швидкості руху транспортної системи.
6. Розроблено стартап-проект, який визначає можливості подальшої практичної реалізації результатів досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bellis M. The Escalator Was Once an Amusement Park Ride. *ThoughtCo*. URL: <https://www.thoughtco.com/history-of-escalator-4072151> (дата звернення: 09.01.2024).
2. Винахід ескалятора - Винахідник і раціоналізатор. *Винахідник і раціоналізатор*. URL: <https://vir.uan.ua/invention-escalator/> (дата звернення: 09.01.2024).
3. Ескалатори. Пасажирські конвеєри: навчальний посібник / Г. Г. Кожушко. Єкатеринбург: Видавництво АМБ, 2016. - 142 с. : іл.
4. Ескалатори | Київський метрополітен. *Київський метрополітен | Неспинний рух задля розвитку міста*. URL: <http://www.metro.kyiv.ua/node/129> (дата звернення: 09.01.2024).
5. Траволатори – CITI ЛІФТ. URL: <https://citylift.com.ua/travolator.html> (дата звернення: 09.01.2024).
6. Otis Escalators | Moving Walks | Otis USA. *OTIS*. URL: <https://www.otis.com/uk/ua/products-services/products/escalators-and-moving-walks> (дата звернення: 09.01.2024).
7. Определение уровней вибрации главных приводов тоннельных эскалаторов. *КиберЛенинка* (*Open Access*). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-urovney-vibratsii-glavnyh-privodov-tonnelnyh-eskalatorov/viewer> (дата звернення: 09.01.2024).
8. Загора О. В. ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТУНЕЛЬНОГО ЕСКАЛАТОРА З ПРОМІЖНИМ РОЗМІЩЕННЯМ ПРИВОДУ. *ela.kpi*. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15372/1/Zakora\\_diss.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15372/1/Zakora_diss.pdf) (дата звернення: 09.01.2024).
9. Ескалатор – UA 954. *База патентів України*. URL: <https://uapatents.com/3-954-eskalator.html> (дата звернення: 09.01.2024).

10. Металоконструкція ескалатора – UA 981. *База патентів України*. URL: <https://uapatents.com/4-981-metalokonstrukciya-eskalatora.html> (дата звернення: 09.01.2024).
11. Привод поручня ескалатора – UA 22157. *База патентів України*. URL: <https://uapatents.com/4-22157-privod-poruchnya-eskalatora.html> (дата звернення: 09.01.2024).
12. Научная статья на тему «Развитие эскалаторов» | Научные статьи «Технологии». URL: <https://bank.nauchniestati.ru/primery/nauchnaya-statya-na-temu-razvitie-eskalatorov-imwp/> (дата звернення: 09.01.2024).
13. Ескалатор: переваги, умови встановлення, обслуговування та ремонт. URL: <https://liftportal.com.ua/ua/lifti-ta-eskalatori/57-tsikavo-znati/454-eskalator-perevagi-umovi-vstanovlennya-obslugovuvannya-ta-remont.html> (дата звернення: 09.01.2024).
14. Помінов И.Н. Эскалаторы метрополитена. - М.: Транспорт, 1993. – 182с.
15. Utilities One. *Utilities One*. URL: <https://utilitiesone.com/the-science-of-managing-traffic-flow-with-elevator-and-escalator-installations> (дата звернення: 09.01.2024).
16. Пересада С. М., Ніконенко Є. О. Курсовий проект з керування електроприводами [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 57
17. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода : учебное пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979 – 616с.
18. ЭСКАЛАТОРЫ И ПАССАЖИРСКИЕ КОНВЕЙЕРЫ. Чинний від 2012-07-01. Вид. офіц. Москва : Стандартиформ, 2012. 80 с.
19. Динаміка тунельних ескалаторів з проміжним приводом: монографія/

Ю.М.Данильченко, Ю.П.Горбатенко, О.В.Закора.- К.: 2018 – 177 с.: іл.

20. Кравчик А.Е. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504.

21. Електродвигун 4А315М6 132 кВт 1000 об/хв - Ціни 2017. *ЕЛНАС*. URL: <https://all-electro.com.ua/ua/p610010997-elektrodvigatel-4a315m6-132kvt.html> (дата звернення: 09.01.2024).

22. ACS550-02-368А-4 Преобразователь Частоты 160 кВт |ABB. *Электрооборудование PRIVODOK*. URL: <https://privodok.com.ua/abb-ac550-01-290a-4> (дата звернення: 09.01.2024).

23. Investigating spatio-temporal mobility patterns and changes in metro usage under the impact of COVID-19 using Taipei Metro smart card data - Public Transport. *SpringerLink*. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12469-021-00280-2> (дата звернення: 09.01.2024).