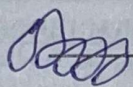


Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:  
«МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА  
СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА»

Виконав: студент 4 курсу, гр. ЕМСА-216  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка



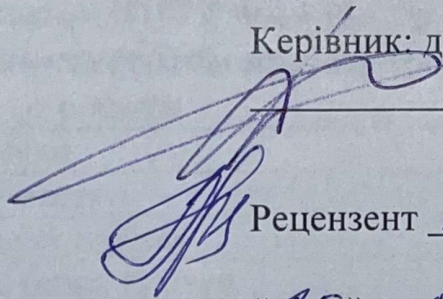
Максим ВЛАСЮК

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: д.т.н., професор кафедри КЕМСК

Володимир ГРАБКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)



Рецензент

К.Т.Н., доц., доцент каф. ЕСЕМ Рибак О.В.

(прізвище та ініціали)

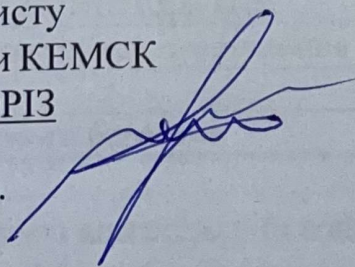
«20» 06 2025 р.

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри КЕМСК

Микола МОШНОРІЗ

(прізвище та ініціали)

«3» червня 2025 р.



Вінниця ВНТУ – 2025 рік



Вінницький національний технічний університет

Факультет \_\_\_\_\_ Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра \_\_\_\_\_ Комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський)

Галузь знань \_\_\_\_\_ 14 – Електрична інженерія

Спеціальність \_\_\_\_\_ 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма \_\_\_\_\_ «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

\_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Микола МОШНОРИЗ

“18” лютого 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Власюку Максиму Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Модернізація системи керування електропривода стрічкового конвеєра

керівник роботи Грабко Володимир Віталійович д.т.н. професор

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

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97.

2. Строк подання студентом проекту (роботи): 03.06.2025

3. Вихідні дані до роботи:

|     |                                   |                |
|-----|-----------------------------------|----------------|
| 1.  | Ширина стрічки                    | 800            |
| 2.  | Довжина конвеєра                  | 25,4           |
| 3.  | Швидкість руху стрічки            | 1,6            |
| 4.  | Маса одного метру стрічки         | 10             |
| 5.  | Продуктивність                    | 400            |
| 6.  | Висота підйому                    | 5              |
| 7.  | Кут обхвату приводного барабана   | $\alpha_n=210$ |
| 8.  | Кут обхвату натяжного барабана    | $\alpha_n=180$ |
| 9.  | Максимальне допустиме прискорення | $\alpha=0,5$   |
| 10. | ККД                               | 0,8            |
| 11. | Діаметр приводного барабана       | $D_B=0,526$    |

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):  
Зовнішній вигляд, кінематична схема та тахограми роботи. Схема електрична структурна. Моделювання перехідних процесів. Схема електрична принципова.



## 6. Консультанти розділів роботи

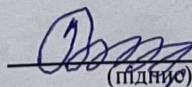
| Розділ          | Прізвище, ініціали та посада консультанта     | Підпис, дата   |                  |
|-----------------|-----------------------------------------------|----------------|------------------|
|                 |                                               | завдання видав | завдання прийняв |
| Основна частина | Грабко В. В.,<br>д.т.н., проф. каф. КЕМСК     | 18.02.2025     | 06.05.2025       |
| Охорона праці   | Кобилянський О.В.,<br>д.пед.н, зав.каф. БЖДПБ | 18.02.2025     | 20.05.2025       |

7. Дата видачі завдання « 18 » лютого 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

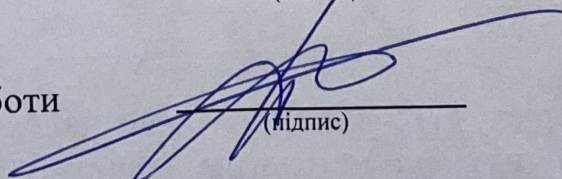
| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                        | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР) | 18.02.2025                    |          |
| 2     | Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР  | 06.05.2025                    |          |
| 3     | Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР  | 20.05.2025                    |          |
| 4     | Виконання розділу «Охорона праці»                                          | 20.05.2025                    |          |
| 5     | Попередній захист БКР                                                      | 03.06.2025                    |          |
| 6     | Нормоконтроль БКР                                                          | 03.06.2025                    |          |
| 7     | Рецензування БКР                                                           | 10.06.2025                    |          |
| 8     | Захист БКР                                                                 | 19.06.2025                    |          |

Студент

  
(підпис)

Максим ВЛАСЮК

Керівник роботи

  
(підпис)

Володимир ГРАБКО

## АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 102 сторінок, 29 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел містить 58 найменувань.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі здійснено модернізацію стрічкового конвеєра, за допомогою якого передбачається перевантаження карбаміду. На основі розрахунків техніко-економічної обґрунтованості було обрано систему електропривода, розраховано основні вузли лінії та обрано двигун. Виконано розрахунки статичних і динамічних характеристик. Результати розрахунків показали, що розроблена система керування повністю відповідає поставленим задачам. Розроблено електричні структурну і функціональну схеми, а також виконано розрахунки і вибір елементів їх силових частин.

Визначено основні положення щодо охорони праці при експлуатації електроприводу.

Ключові слова: електропривод конвеєра, регулювання швидкості, приводний двигун, система керування

## **ABSTRACT**

The bachelor's qualification work consists of 102 pages, 29 figures, 11 tables, the list of used sources contains 58 names.

In the bachelor's qualification work, a belt conveyor was modernized, with the help of which urea is expected to be overloaded. Based on the calculations of the feasibility study, an electric drive system was selected, the main nodes of the line were calculated and the engine was selected. Calculations of static and dynamic characteristics were performed. The results of the calculations showed that the developed control system fully meets the tasks set. Electrical structural and functional diagrams were developed, and calculations and selection of elements of their power parts were also performed.

The main provisions on labor protection during the operation of the electric drive were determined.

Keywords: electric conveyor drive, speed control, drive motor, control system

## ЗМІСТ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                            | 7  |
| 1 КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ ...                                                          | 9  |
| 1.1 Особливості та режими роботи транспортної лінії .....                                                             | 9  |
| 1.2 Постановка задач роботи .....                                                                                     | 12 |
| 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА .....                                                                                 | 13 |
| 2.1 Розрахунок приведених статичних моментів .....                                                                    | 13 |
| 2.2 Розрахунок динамічних навантажень та побудова навантажувальної<br>діаграми електропривода.....                    | 15 |
| 3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ<br>ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                                             | 21 |
| 4 ВИБІР ДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА .....                                                                               | 25 |
| 4.1 Перевірка двигуна за нагрівом та пусковою здатністю .....                                                         | 26 |
| 5 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНОГО ДВИГУНА .....                                                                   | 28 |
| 6 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА<br>ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ, РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЇЇ СИЛОВОГО<br>КОЛА ..... | 35 |
| 6.1 Вибір транзисторів і шунтуючих діодів .....                                                                       | 38 |
| 6.2 Вибір схеми управління силовими ключами .....                                                                     | 39 |
| 6.3 Вибір плавких запобіжників .....                                                                                  | 41 |
| 6.4 Вибір автоматичних вимикачів .....                                                                                | 41 |
| 6.5 Вибір захисту двигуна від підвищення напруги на статорі двигуна .....                                             | 42 |
| 6.6 Розробка принципової електричної схеми .....                                                                      | 42 |
| 7 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....                                                                | 46 |
| 8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ТА<br>ЯКОСТІ .....                                                  | 55 |
| 8.1 Оцінка стійкості .....                                                                                            | 55 |
| 8.2 Оцінка якості .....                                                                                               | 57 |
| 9 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ .....                                                            | 61 |
| 9.1 Розрахунок сенсорів та їх коефіцієнтів підсилення .....                                                           | 61 |
| 9.2 Розрахунок задавача інтенсивності .....                                                                           | 63 |
| 9.3 Розрахунок параметрів регулятора струму .....                                                                     | 65 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 10 ОХОРОНА ПРАЦІ .....                                                                      | 71  |
| 10.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації .....                                        | 71  |
| 10.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....                         | 74  |
| 10.3 Пожежна безпека .....                                                                  | 78  |
| ВИСНОВКИ.....                                                                               | 81  |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                             | 82  |
| Додаток А Технічне завдання .....                                                           | 87  |
| Додаток Б Графічна частина .....                                                            | 90  |
| Додаток В Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень ..... | 101 |



## ВСТУП

**Актуальність.** Промислові підприємства в процесі своєї діяльності прагнуть до підвищення продуктивності, енергоефективності та рівня автоматизації технологічних процесів. В умовах конкурентного ринку та зростаючих вимог до якості продукції особливої уваги набуває вдосконалення допоміжного та транспортного обладнання, зокрема стрічкових конвеєрів, які відіграють ключову роль у системах внутрішньоцехового та міжцехового транспортування матеріалів.

Велика частина обладнання на підприємствах хімічної та суміжних галузей досі експлуатується на базі морально застарілих релейно-контакторних систем керування. Такі системи мають обмежену функціональність, підвищену імовірність виходу з ладу через знос контактних елементів та не забезпечують можливості гнучкого регулювання динамічних параметрів електропривода. Сучасна елементна база дозволяє реалізовувати високоточні, надійні та економічні системи на базі частотних перетворювачів та мікропроцесорних засобів керування. Їх застосування забезпечує: плавний пуск і зупинку конвеєра, регулювання швидкості залежно від навантаження, зниження пускових струмів, покращення умов праці за рахунок зменшення необхідності постійної присутності оператора.

Особливої актуальності набуває модернізація таких систем на підприємствах, де зупинки технологічного процесу, через відмову обладнання, призводять до значних втрат. Таким чином, модернізація системи керування електроприводом стрічкового конвеєра є актуальною задачею, яка дозволить покращити експлуатаційні характеристики обладнання.

**Мета роботи** – розробити модернізовану систему керування електроприводом стрічкового конвеєра, що забезпечить покращення техніко-економічних показників та підвищить надійність роботи технологічного обладнання.

**Об'єкт дослідження** – процес роботи електропривода стрічкового



конвеєра в складі пересувної перевантажувальної лінії.

**Предмет дослідження** – система керування електроприводом стрічкового конвеєра.

**Методи дослідження:** аналітичні та інженерні розрахунки параметрів електропривода; методи аналізу електричних кіл; методи комп'ютерного моделювання динамічних характеристик системи; метод еквівалентного моменту для перевірки електродвигуна.

**Постановка задачі проектування.**

- 1) провести аналіз існуючої системи тягового електроприводу;
- 2) розрахувати потужність електродвигуна та значення динамічних навантажень;
- 3) провести техніко-економічне порівняння альтернативних систем електропривода;
- 4) розробити схему керування електроприводом та здійснити вибір її елементів;
- 5) промодельовати роботу електроприводу стрічкового конвеєра.

**Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблено принципову та функціональну схему роботи електроприводу стрічкового конвеєра, приведено її модель, яка дозволяє отримати графіки перехідних процесів та виконати аналіз ефективності роботи системи електроприводу при різному навантаженні.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, які складають основний зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи, отримані автором самостійно.

# 1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЧОГО МЕХАНІЗМУ І РЕЖИМІВ ЙОГО РОБОТИ

## 1.1 Особливості та режими роботи транспортної лінії

У даній роботі розглядається пересувна перевантажувальна лінія, призначена для транспортування карбаміду зі складу до засобів автотранспорту. Така лінія використовується на промислових підприємствах для оптимізації логістики та забезпечення безперервної подачі вантажу. Загальна схема перевантажувальної лінії представлена на рисунку 1.1.

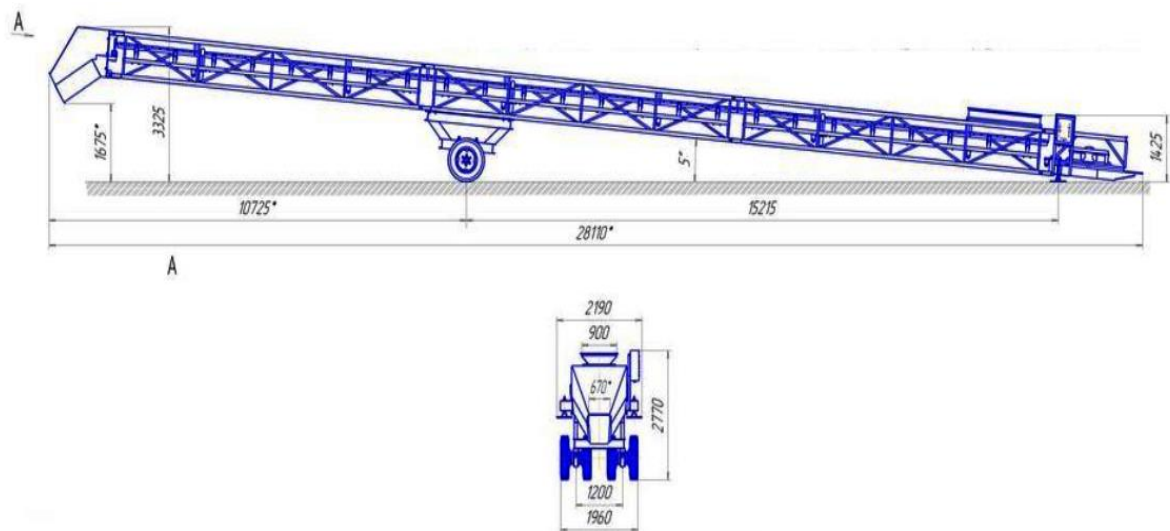


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд конвеєрної лінії

Пересувні перевантажувальні системи мають ряд переваг: вони компактні, легко переміщуються, не потребують складного обслуговування і дозволяють організувати гнучкий технологічний процес у складських або виробничих умовах. Їх конструкція проста, а ефективність – достатня для багатьох типових завдань із завантаження/розвантаження сипких матеріалів.

Основним елементом перевантажувальної лінії є стрічковий конвеєр. Це механізм безперервної дії, який забезпечує переміщення сипких, дрібно-кускових або гранульованих вантажів. Стрічкові конвеєри застосовуються у більшості галузей промисловості – від аграрного сектора до хімічного виробництва.



Типова стрічкова транспортна система складається з:

- привідної та натяжної станцій;
- стрічки (вантажонесучої частини);
- роlikоопор;
- опорної рами або металоконструкції;
- системи натягу та керування.

На сучасних підприємствах конвеєри виконують такі функції:

1. транспортування сировини або готової продукції;
2. переміщення вантажів між технологічними ділянками;
3. подача матеріалів до зони завантаження або фасування;
4. вивантаження продукції у транспортні засоби;
5. участь в автоматизованих лініях обробки або пакування.

Залежно від особливостей виробництва, конвеєри можуть працювати в ручному, напівавтоматичному або повністю автоматичному режимі.

Основні напрямки вдосконалення стрічкових транспортерів:

1. Збільшення продуктивності – шляхом підвищення швидкості руху стрічки, використання ширших стрічок або ефективніших приводів.
2. Підвищення надійності – за рахунок використання якісніших комплектуючих, зменшення зношування та автоматизації контролю технічного стану.
3. Оптимізація конструкції – для зменшення ваги, габаритів та споживання енергії.
4. Поліпшення умов обслуговування – за допомогою вдосконалених систем натягу, легкого доступу до вузлів тощо.
5. Автоматизація керування – з використанням частотних перетворювачів, та програмованих логічних контролерів і систем моніторингу.

Також важливою тенденцією є впровадження конвеєрів, здатних працювати з великим кутом нахилу (до 90°), для вертикального транспортування вантажів або в обмеженому просторі.

На рисунку 1.2 представлена кінематична схема приводу стрічкового конвеєра, яка відображає послідовність передавання енергії від електродвигуна до приводного барабана конвеєра.



Рисунок 1.2 – Кінематична схема приводу конвеєра

Джерелом механічної енергії є електродвигун (М), який забезпечує обертальний рух. Обертання від вала двигуна передається на зубчасту передачу, що виконує функцію редуктора – зменшує частоту обертання та збільшує крутний момент, необхідний для приводу транспортної стрічки.

Зубчаста передача з'єднана з привідним барабаном, який безпосередньо взаємодіє з конвеєрною стрічкою, створюючи тягове зусилля для її руху. Таким чином, вся система забезпечує перетворення електричної енергії на механічну та передачу її з оптимальними параметрами на транспортну стрічку для переміщення вантажів.

Запропонована схема є простою та надійною, а використання зубчастої передачі дозволяє забезпечити стабільну роботу при тривалих навантаженнях, характерних для стрічкових транспортерів.

## 1.2 Постановка задач роботи

У рамках цієї бакалаврської роботи визначено такі основні задачі:

- Модернізація системи керування електроприводом стрічкового конвеєра – з переходом від застарілої релейно-контакторної схеми до сучасного варіанту з використанням частотного перетворювача та асинхронного двигуна.
- Розробка електричної схеми модернізованої системи керування електроприводом конвеєра.
- Математичне моделювання роботи електроприводу – для оцінки його динамічних характеристик.
- Аналіз ефективності запропонованих рішень.

**Висновок.** Здійснено загальну технічну характеристику переважувальної лінії стрічкового конвеєра, описано особливості її роботи та визначено основні напрямки модернізації. Також сформульовано задачі, вирішення яких дозволить підвищити ефективність роботи стрічкового конвеєра за рахунок актуального підходу до системи керування.



## 2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

### 2.1 Розрахунок приведених статичних моментів

Для розрахунку тахограми роботи механізму розглядається пуск, навантаження та зупинка механізму. При розрахунку потужності двигуна для пересувної перевантажувальної лінії повинні враховуватись такі технічні дані (таблиця 2.1):

Таблиця 2.1 – Технічні дані механізму

| Показник                          | Одиниця виміру   | Значення                |
|-----------------------------------|------------------|-------------------------|
| Ширина стрічки                    | мм.              | 800                     |
| Довжина конвеєра                  | м                | 25,4                    |
| Швидкість руху стрічки            | м/сек.           | 1,6                     |
| Маса 1 метра стрічки              | кг/м             | 10                      |
| Продуктивність                    | т/час            | 400                     |
| Висота підйому                    | мм               | 5                       |
| Кут обхвату прив. барабана        | град             | $\alpha_{\text{п}}=210$ |
| Кут обхвату натяж. барабана       | град             | $\alpha_{\text{н}}=180$ |
| Максимальне допустиме прискорення | м/с <sup>2</sup> | $\alpha=0,5$            |
| ККД                               |                  | 0,8                     |
| Діаметр привідного барабана       | м                | $D_{\text{б}}=0,526$    |

Маса вантажу, що розміщується на одному метрі стрічки, обчислюється за формулою:

$$m_{\Gamma} = \frac{\Pi}{3600 \cdot V_{\text{л}}} , \quad (2.1)$$

$$m_{\Gamma} = \frac{400000}{3600 \cdot 1,6} = 36,44 \text{ (кг)} .$$

Знайдемо розрахункову середню масу конвеєра:

$$m_{\Sigma} = (m_0 + m_B) \cdot L , \quad (2.2)$$

$$m_{\Sigma} = (10 + 69,44) \cdot 25 = 1986,11 \text{ (кг)}.$$

Розрахунок сил опору руху:

навантаження на 1 метр шляху:

$$g_0 = m_0 \cdot g , \quad (2.3)$$

$$g_0 = 10 \cdot 9,81 = 98,1(\text{Н}).$$

навантаження на навантаженій ділянці стрічки:

$$g_{\Gamma} = m_{\Gamma} \cdot g , \quad (2.4)$$

$$g_0 = 64,44 \cdot 9,81 = 681,2(\text{Н}).$$

розрахункова результуюча сила:

$$F = (g_{\Gamma} + g_0) \cdot L , \quad (2.5)$$

$$F = (98,1 + 681,2) \cdot 25 = 19482,5(\text{Н}).$$

Розрахунок натягнення тягового органу і потужності приводної станції,  
вибір потужності електродвигуна

кут приводного барабана в радіанах:

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_{\text{п}}}{\alpha_{\text{н}}} \cdot \pi , \quad (2.6)$$

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{210}{180} \cdot \pi = 3,751 \text{ (рад)} .$$

Розрахунок допустимого натягнення стрічки:

$$T_{\text{с.б. min}} = \frac{F + m_{\Sigma} \cdot \alpha_{\text{доп}}}{e^{\mu \cdot \alpha_{\text{пр}}}} , \quad (2.7)$$

$$T_{c.б.min} = \frac{19482,5 + 1986,11 \cdot 0,5}{e^{\mu \cdot 3,751}} = 12072,5 \text{ (Н)}.$$

Оскільки маса барабанів і роликів не врахована, вводиться коефіцієнт запасу  $K_3$ . Для двигунів потужністю від 20 до 60 кВт  $K_3 = 1,1 \dots 1,3$ . Вибираємо коефіцієнт запасу  $K_3 = 1,1 \div 1,3$ . Отже:

$$T_{c.б.} = 1,1 \div 1,3 \cdot T_{c.б.} \quad (2.8)$$

Розрахуємо потужність приводної станції конвеєра :

$$P = \frac{T_{c.б.}}{\eta} \cdot V_{л} = 28,3 \div 30,9 \text{ (кВт)} .$$

Отже, для забезпечення надійної роботи стрічкового конвеєра з урахуванням навантажень, довжини траси, продуктивності та коефіцієнту запасу, необхідна потужність привідного електродвигуна складає приблизно 31,4 кВт. Це значення будемо використовувати як базове при виборі двигуна.

## **2.2 Розрахунок динамічних навантажень та побудова навантажувальної діаграми електропривода**

Для аналізу навантажень на електропривод при роботі стрічкового конвеєра виконується розрахунок динамічних моментів, які виникають під час пуску, розгону, усталеної роботи та зупинки механізму. З урахуванням інерційності системи та мас рухомих частин будується тахограма – графік зміни основних параметрів у часі: швидкості, прискорення та моментів.

Номінальний момент на валу електродвигуна визначається за формулою:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} , \quad (2.7)$$

де  $P_H$  – номінальна потужність двигуна ( $P_H = 30$  кВт);

$\omega_H$  – номінальна кутова швидкість двигуна;

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}, \quad (2.8)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 103,4 \text{ (рад/с)},$$

$$M_H = \frac{30000}{103,4} = 290,13 \text{ (Н·м)}.$$

Конвеєрні механізми мають високу інерційність, що суттєво впливає на навантаження під час запуску та зупинки. Приведений момент інерції від усіх рухомих мас значно перевищує власний момент інерції двигуна.

Моменти інерції обертових частин визначаються за довідковими даними або наближеними інженерними розрахунками. Їх слід привести до швидкості обертання вала двигуна.

Момент інерції двигуна знаходиться за формулою:

$$J_d = 0,00015 \cdot (M_H), \quad (2.9)$$

$$J_d = 0,00015 \cdot 290,13 = 0,74 .$$

Приведений момент інерції всього механізму до вала двигуна:

$$J_{\text{ПР}} = J_d + J_k, \quad (2.10)$$

де  $J_k$  – момент інерції з урахуванням усіх рухомих мас,

$J_B$  – інерція привідного барабана ( $J_B = 0,04 \text{ Н·м}^2$ );

$J_P$  – інерція редуктора ( $J_P = 0,04 \text{ Н·м}^2$ ).

$$J_k = J_P + J_B + m_C \cdot \rho^2 + m_B \cdot \rho^2, \quad (2.11)$$

де  $m_C$  – маса стрічки;

$$m_C = m_0 \cdot L, \quad (2.12)$$

$$m_C = 10 \cdot 25 = 250 \text{ (кг)},$$

де  $m_B$  – маса вантажу;

$$m_B = m_T \cdot L, \quad (2.13)$$



$$m_c = 1,1 \cdot 25 = 27,5 \text{ (кг) ,}$$

де  $\rho$  – радіус інерції ведучого барабана;

$$\rho = \frac{D_B}{2 \cdot i_{\text{пр}}} , \quad (2.14)$$

де  $i_{\text{пр}}$  – передаточне число редуктора;

$$i_{\text{пр}} = \frac{\omega_H}{\omega_6} , \quad (2.15)$$

де  $\omega_B$  – кутову швидкість обертання приводного барабану;

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot D}{g_c} , \quad (2.16)$$

де  $g_c$  – швидкість руху стрічки.

$$\omega_{\text{пр}} = \frac{\pi \cdot 0,8}{1,6} = 1,57 \text{ с}^{-1} = 94,2 \text{ об/хв} .$$

Передаточне число рівне:

$$i_{\text{пр}} = \frac{988}{94,2} = 10,48 .$$

Радіус інерції рівний:

$$\rho = \frac{0,8}{2 \cdot 10,48} = 0,038 \text{ (м) .}$$

Момент інерції конвеєра:

$$J_K = 0,04 + 0,04 + 250 \cdot 0,00144 + 27,5 \cdot 0,00144 = 0,4796 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2) .$$

Кутове прискорення визначає, наскільки швидко обертається вал двигуна під час розгону:

$$\varepsilon = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t_p} . \quad (2.17)$$

Оскільки  $\omega_1 = 0$ ,  $\omega_2 = 103,4$  рад/с, то час розгону (гальмування):

$$t_p = \frac{\vartheta_c}{\alpha_{\max}} , \quad (2.18)$$

де  $\vartheta_c$  – швидкість руху стрічки;

$\alpha_{\max}$  – максимальне допустиме прискорення;

$$t_p = \frac{1,6}{0,5} = 3,2 \text{ (с)} .$$

Кутове прискорення при розгоні двигуна:

$$\varepsilon = \frac{0 - 103,4}{3,2} = -32,31 .$$

Динамічний момент визначається як:

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{пр}} \cdot \varepsilon , \quad (2.19)$$

$$M_{\text{динр}} = J_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{р}} , \quad (2.20)$$

$$M_{\text{динг}} = J_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{г}} , \quad (2.21)$$

$$M_{\text{динр}} = 1,1296 \cdot 32,31 = 39,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

$$M_{\text{динг}} = 1,1296 \cdot (-32,31) = -39,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)}.$$

На основі отриманих значень будується тахограма (рис. 2.1), яка демонструє зміну основних параметрів:

$$M_1 = M_{\text{н}} + M_{\text{динр}} , \quad (2.22)$$

$$M_1 = 290,13 + 39,4 = 329,53 ,$$

$$M_2 = M_{\text{н}} , \quad (2.23)$$

$$M_2 = 290,13,$$

$$M_3 = M_n + M_{\text{динг}}, \quad (2.24)$$

$$M_3 = 290,13 - 39,4 = 250,73.$$

Тоді приведений момент інерції всього механізму:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + J_{\text{к}}, \quad (2.25)$$

$$J_{\text{пр}} = 0,74 + 0,4796 = 1,2196 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

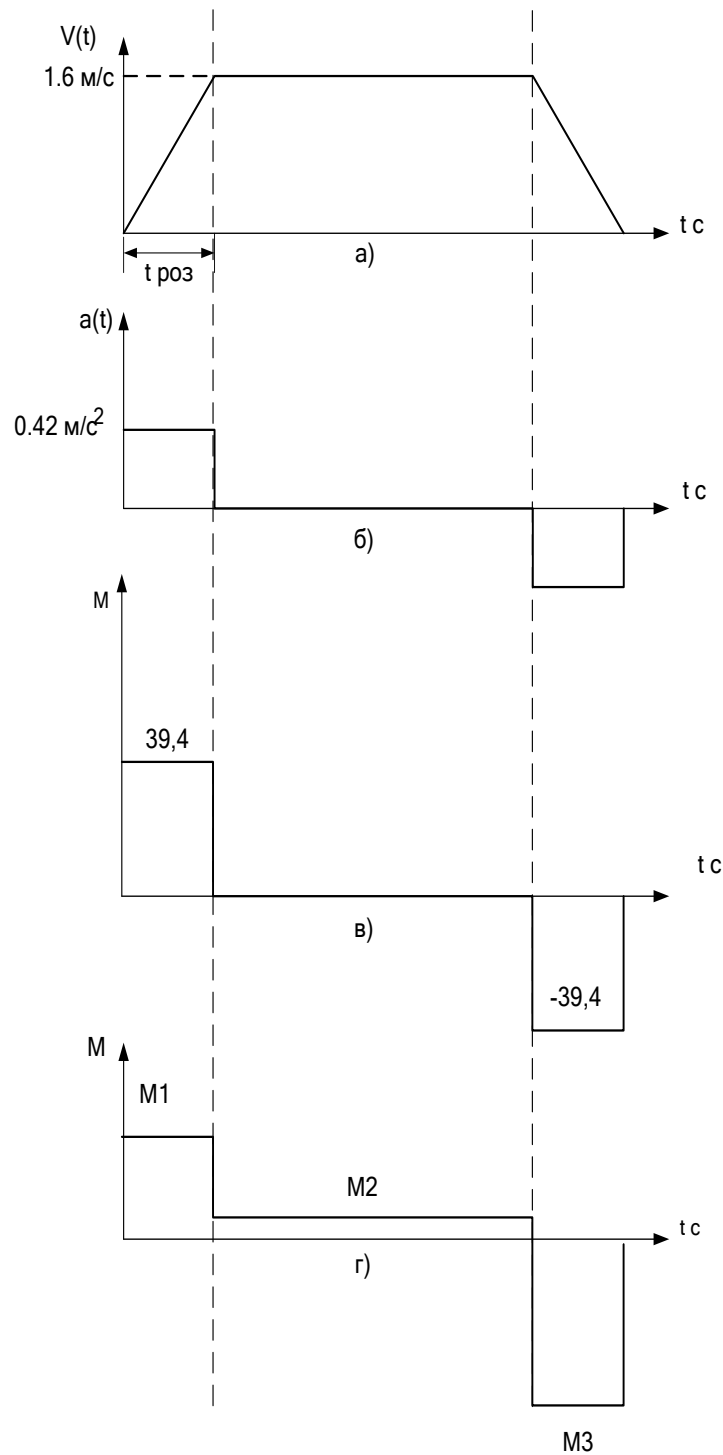


Рисунок 2.1 – Тахограма робочого механізму: швидкість (а), прискорення (б), динамічний момент (в), сумарний момент (г)

**Висновок.** Розраховано інерційні характеристики електропривода та побудовано тахограму його роботи. Це дозволяє зробити висновок, що вибраний електродвигун потужністю здатен забезпечити стабільну роботу механізму з урахуванням динамічних навантажень під час пуску, розгону та зупинки.

### 3 ТЕХНІКО ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Для порівняння техніко-економічних показників систем електро-приводу розглядатимемо такі системи як тиристорний перетворювач із двигуном постійного струму (ТП-Д); широтно-імпульсний перетворювач з двигуном постійного струму (ШП-Д); тиристорний регулятор напруги асинхронний двигун (ТРН-АД); перетворювач частоти – асинхронний двигун (ПЧ-АД).

Розглянемо ці варіанти з економічної точки зору. Використовуємо метод зведених витрат:

$$З = E_n \cdot K + C, \quad (3.1)$$

де  $E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ( $E_n=0,12$ );

$K$  – капіталовкладення, в які входять вартість двигуна  $D$  та системи керування СК;

$C$  – собівартість.

$$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}, \quad (3.2)$$

де  $C_o$  – витрати на обслуговування і ремонт.

$$C_o = E_o \cdot K; \quad (3.3)$$

$C_a$  – амортизаційні відрахування:

$$C_a = E_a \cdot K, \quad (3.4)$$

$E_a$  – нормативний коефіцієнт ( $E_a=0,05$ );

$C_{\Delta W}$  – витрати на електроенергію ( $E_o = 0,015$ ).

$$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W, \quad (3.5)$$

$m_o$  – вартість електроенергії ( $m_o=6,67$  грн/кВт год);

$\Delta W$  – кількість втраченої електроенергії за рік.



$$\Delta W = \Delta P \cdot T_p, \quad (3.6)$$

де  $T_p$  – річний час роботи обладнання ( $T_p = 2160$  год.).

Втрати потужності:

$$\Delta P = k_3 \cdot P_n \cdot (1 - \eta_d) / (\eta_d \cdot k_e), \quad (3.7)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт завантаження ( $k_3 = 0,57$ );

$\eta_d$  – ККД двигуна ( $\eta_d = 0,91$ );

$k_e$  – коефіцієнт енергозатрат.

Покажемо приклад розрахунку для системи ТП-Д.

При вартості двигуна  $D = 15320$  грн та системи керування СК = 14150 грн. капіталовкладення становитимуть:

$$K = D + СК, \quad (3.8)$$

$$K = 15320 + 14150 = 32020 \text{ (грн.)}$$

Амортизаційні витрати відповідно до (3.4):

$$C_a = 0.05 \cdot 32020 = 601 \text{ (грн.)}$$

Витрати на обслуговування і ремонт відповідно до (3.3):

$$C_o = 0.015 \cdot 32020 = 180,3 \text{ (грн.)}$$

Втрати потужності відповідно до (3.7):

$$\Delta P = 0,57 \cdot 0.91 \cdot (1 - 0.91) / (0.91 \cdot 0,5) = 3,38 \text{ (кВт)}.$$

Кількість втраченої електроенергії за рік відповідно до (3.6):

$$\Delta W = 3,38 \cdot 2160 = 7306,02 \text{ (кВт·год)}.$$

Витрати на електроенергію відповідно до (3.5):

$$C_{\Delta W} = 6,67 \cdot 7306,02 = 2258 \text{ (грн.)}$$

Собівартість відповідно до (3.2):

$$C = 473,5 + 142,05 + 4968,09 = 3039,3 \text{ (грн.)}$$

Зведені витрати відповідно до (3.1):

$$З = 0.12 \cdot 9470 + 5583,64 = 14481,7 \text{ (грн.)}$$

Аналогічним чином розраховуються економічні показники і для інших систем.

Результати розрахунків зводимо до таблиці 3.1, в якій ціни взяті з джерела [6].

Таблиця 3.1 – Порівняння варіантів систем

| Показники                                                       | Тип системи |       |        |       |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|-------|--------|-------|
|                                                                 | ТП-Д        | ШП-Д  | ТРН-АД | ПЧ-АД |
| Потужність двигуна $P_n$ , кВт                                  | 30          |       |        |       |
| Вартість двигуна (Д), грн.                                      | 29520       | 29520 | 15320  | 15320 |
| Вартість системи керування (СК), грн.                           | 18700       | 17700 | 16700  | 14650 |
| Капіталовкладення $K = Д + СК$ , грн                            | 48220       | 47220 | 29970  | 32020 |
| $E_a$                                                           | 0.05        |       |        |       |
| Амортизаційні відрахування<br>$Ca = E_a \cdot K$ , грн.         | 911         | 861   | 498,5  | 601   |
| $E_o$                                                           | 0.015       |       |        |       |
| Витрати на обслуговування і ремонт<br>$Co = E_o \cdot K$ , грн. | 273,3       | 258,3 | 149,55 | 180,3 |

Продовження таблиці 3.1

|                                                                                           |         |         |          |         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|----------|---------|
| Вартість електроенергії<br>то, грн/кВт год                                                | 6.67    |         |          |         |
| Коефіцієнт завантаження $k_3$                                                             | 0.57    |         |          |         |
| Річний час роботи $T_p$ , год                                                             | 2016    |         |          |         |
| ККД $\eta_d$ %                                                                            | 30      |         |          |         |
| Коефіцієнт енергозатрат $k_e$                                                             | 0.50    | 0.60    | 0.45     | 1.1     |
| Втрати потужності<br>$\Delta P = k_3 \cdot P_H \cdot (1 - \eta_d) / (\eta_d \cdot k_e)$ , | 3,38    | 2,81    | 3,75     | 1,53    |
| Кількість втраченої електроенергії за рік<br>$\Delta W = \Delta P \cdot T_p$              | 7306    | 6088    | 8117     | 3320    |
| Витрати на електроенергію<br>$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W$                          | 4968    | 4140    | 5520     | 2258    |
| Собівартість<br>$C = C_a + C_o + C_{\Delta W}$ , грн.                                     | 6152,3  | 5259,3  | 6168,05  | 3039,3  |
| Нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_H$                                     | 0,12    |         |          |         |
| Зведені витрати<br>$Z = E_H \cdot K + C$ , грн.                                           | 18338,7 | 17325,7 | 17364,45 | 14481,7 |

**Висновок.** Після проведених розрахунків які відповідно занесені до таблиці 3.1, робимо висновок, що найбільш рентабельною є система ПЧ-АД, яку і вибираємо для проектування.

#### 4 ВИБІР ДВИГУНА ТА ЙОГО ПЕРЕВІРКА

На основі розрахунків потужності, отриманих у попередніх розділах, для приводу стрічкового конвеєра обираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу ВРП200L6.

Основні технічні характеристики цього двигуна наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані

| Паспортні дані                                              | Значення |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| Номінальна потужність $P_{ном}, кВт$                        | 30       |
| Номінальна частота обертання $n_{ном}, об / хв$             | 988      |
| Коефіцієнт потужності, $\cos\varphi$                        | 0,87     |
| ККД, $\eta, \%$                                             | 91       |
| Момент інерції $J_p, кг \cdot м^2$                          | 0,92     |
| Номінальний струм, А                                        | 91       |
| Номінальний момент, Нм                                      | 289,9    |
| $\frac{M_n}{M_{ном}}$ – кратність пускового моменту         | 2,2      |
| $\frac{M_{min}}{M_{ном}}$ – кратність мінімального моменту  | 1,5      |
| $\frac{M_{max}}{M_{ном}}$ – кратність максимального моменту | 2,5      |
| $\frac{I_n}{I_{ном}}$ – кратність пускового струму          | 6,5      |

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором є одним із найпростіших і надійніших типів електричних машин. Він має компактну конструкцію, не потребує складного обслуговування, стійкий до перевантажень та характеризується хорошими пусковими властивостями. За рахунок відсутності контактних елементів (щіток, колекторів) втрати в такому двигуні мінімальні, що робить його ефективним з погляду експлуатаційних витрат..

Середній пусковий момент двигуна є постійною величиною, обумовленою характеристиками двигуна і не залежної від характеру виконуваної механізмом роботи.

#### 4.1 Перевірка двигуна за нагрівом та пусковою здатністю

Перевірка на нагрівання. Щоб оцінити працездатність двигуна в умовах циклічної роботи (з частими пусками), виконується перевірка за нагрівом згідно з методом еквівалентного моменту (метод ЕП). Його суть полягає в порівнянні еквівалентного моменту за цикл із номінальним моментом двигуна.

Розрахунок еквівалентного моменту здійснюється за формулою:

$$M_{\text{екв1}} = \sqrt{\frac{M_{\Sigma 1}^2 \cdot t_p + M_n^2 \cdot t_{\text{роб}} + M_{\Sigma 2}^2 \cdot t_{\Gamma}}{t_p + t_{\text{роб}} + t_{\Gamma} + t_0}}, \quad (4.1)$$

де  $M_{\Sigma 1}$ ,  $M_n$ ,  $M_{\Sigma 2}$  – моменти відповідно в періоди пуску, робочого ходу та гальмування;

$t_p$ ,  $t_{\text{роб}}$ ,  $t_{\Gamma}$  – відповідні інтервали часу.

Підставимо значення:

$$M_{\text{екв1}} = \sqrt{\frac{329,13^2 \cdot 3,2 + 290,13^2 \cdot 11,4 + 250,73^2 \cdot 3,2}{3,2 + 12,8 + 3,2 + 19,2}} = 198,1 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

Обчислимо номінальний момент двигуна для порівняння:

$$M_{\text{ном.д}} = 9550 \cdot \frac{P_n}{n_n}, \quad (4.2)$$

$$M_{\text{ном.д}} = 9550 \cdot \frac{30}{988} = 289,97 (\text{Н} \cdot \text{м}).$$

$M_{\text{ном.д}} > M_{\text{екв1}}$  – двигун не перегріється в умовах цього режиму. Отже, двигун має достатній запас по нагріву, і температура його обмоток не перевищить допустимого значення.

Для забезпечення надійного запуску двигуна необхідно виконати перевірку умови:

$$k_u^2 \cdot M_{\pi} \geq M_{\text{тп}} , \quad (4.3)$$

де  $k_u = 0,93$  – коефіцієнт відношення дійсної напруги під час пуску до номінальної .

$M_{\pi}$  – паспортний пусковий момент двигуна;

$M_{\text{тп}}$  – момент пуску робочого органу механізму.

Пусковий момент механізму обчислюється так:

$$M_{\text{тп}} = \frac{P_c}{\omega_n} , \quad (4.4)$$

$$M_{\text{тп}} = \frac{30000}{103,5} = 289,9 \text{ (Н} \cdot \text{м)} ,$$

$$M_{\pi} = M_n \cdot m_{\pi} , \quad (4.5)$$

$$M_{\pi} = 290,13 \cdot 2 = 580,26 \text{ (Н} \cdot \text{м)},$$

$$0,93^2 \cdot 580,26 = 501,86 \geq 289,9 \text{ (Н} \cdot \text{м)} .$$

**Висновок.** На підставі виконаних перевірок можна зробити висновок, що вибраний асинхронний двигун ВРІ200L6 повністю задовольняє вимоги до теплового режиму та пускової здатності в умовах роботи перевантажувального конвеєра. Двигун не перегрівається, забезпечує надійний пуск та дозволяє працювати в повторно-короткочасному режимі без перевантаження.



## 5 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНОГО ДВИГУНА

Механічна характеристика електродвигуна – це залежність кутової швидкості обертання від навантажувального моменту, який створюється двигуном.

Для аналізу характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовуються наближені математичні моделі – формули Клоса та Чекунова.

Механічна характеристика за формулою Клоса визначається за виразом:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_{\text{дв.к}} \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + 2 \cdot a \cdot s_k + \frac{s_k}{s}}, \quad (5.1)$$

де  $a$  – розрахунковий коефіцієнт;

$S$  – ковзання;

$a$  – розрахунковий коефіцієнт, що визначається як:

$$a = \frac{R_1}{R'_2}, \quad (5.2)$$

де  $R_1$  – активний опір обмотки статора;

$R'_2$  – приведений активний опір обмотки ротора до сторони статора.

Механічна характеристика згідно формули Чекунова можна описати виразом:

$$M(s) = M_k \cdot \frac{2 + (s^2 - s_k^2) \cdot K_s}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \quad (5.3)$$

де  $K_s$  – розрахунковий коефіцієнт,

$$K_s = \frac{\frac{\lambda_{\text{пуск}}}{\lambda_k} \cdot \left( \frac{1}{s_k} - s_k \right) - 2}{1 - s_k^2}, \quad (5.4)$$

Оскільки паспортні дані не містять значень опорів обмоток, їх визначають наближено.

Втрати на механічне тертя та вентиляцію приймаються рівними 5% від номінальної потужності:

$$P_{\text{дв.мех}} = 0,05 \cdot P_{\text{дв.н}}, \quad (5.5)$$

$$P_{\text{дв.мех}} = 0,05 \cdot 30000 = 1500 \text{ (Вт)}.$$

Розрахунок приведенного опору ротора:

$$R_2' = \frac{1}{3} \cdot \frac{P_{\text{дв.н}} + P_{\text{дв.мех}}}{I_{\text{дв.н}}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{s_H}}, \quad (5.6)$$

$$R_2' = \frac{1}{3} \cdot \frac{30000 + 1500}{91^2 \cdot \frac{1 - 0,012}{0,012}} = 0,015 \text{ (Ом)}.$$

Активний опір статора:

$$R_1 = \frac{U_{\text{ф.ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot (1 - \eta_{\text{дв.н}})}{I_{\text{дв.н}}} - C^2 \cdot R_2' - \frac{P_{\text{дв.мех}}}{3 \cdot I_{\text{дв.н}}^2}, \quad (5.7)$$

$$R_1 = \frac{219,4 \cdot 0,87 \cdot (1 - 0,91)}{91} - 1,02^2 \cdot 0,015 - \frac{1500}{3 \cdot 91^2} = 0,112 \text{ (Ом)}.$$

де  $C = 1,02$  – коефіцієнт поправки.

Розрахунок коефіцієнт для формули Клоса:

$$a = \frac{R_1}{R_2} = \frac{0,112}{0,015} = 7,297$$

Розрахунок коефіцієнта  $K_s$  Для критичного ковзання  $S_k = 0,057$ , кратностей пускового моменту 2,2 та максимального моменту 2,5:

$$K_s = \frac{\frac{2,2}{2,5} \cdot \left( \frac{1}{0,057} - 0,057 \right) - 2}{1 - 0,057^2} = 13,4$$

Підставивши розраховані значення у формули (5.1) та (5.3), отримаємо рівняння для побудови характеристик.

Формула Клоса:

$$M(s) = \frac{2 \cdot 724,949 \cdot (1 + 7,297 \cdot 0,057)}{\frac{s}{0,057} + 2 \cdot 7,297 \cdot 0,057 + \frac{0,057}{s}}.$$

Формула Чекунова::

$$M(s) = 724,949 \cdot \frac{2 + (s^2 - 0,057) \cdot 13,4}{\frac{s}{0,057} + \frac{0,057}{s}}.$$

На основі цих рівнянь побудовано: механічну характеристику за формулою Клоса та характеристику за формулою Чекунова (рисунок 5.1), об'єднану (середньоарифметичну) механічну характеристика асинхронного двигуна (рисунок 5.2) та електромеханічну характеристику асинхронного двигуна (рисунок 5.3).

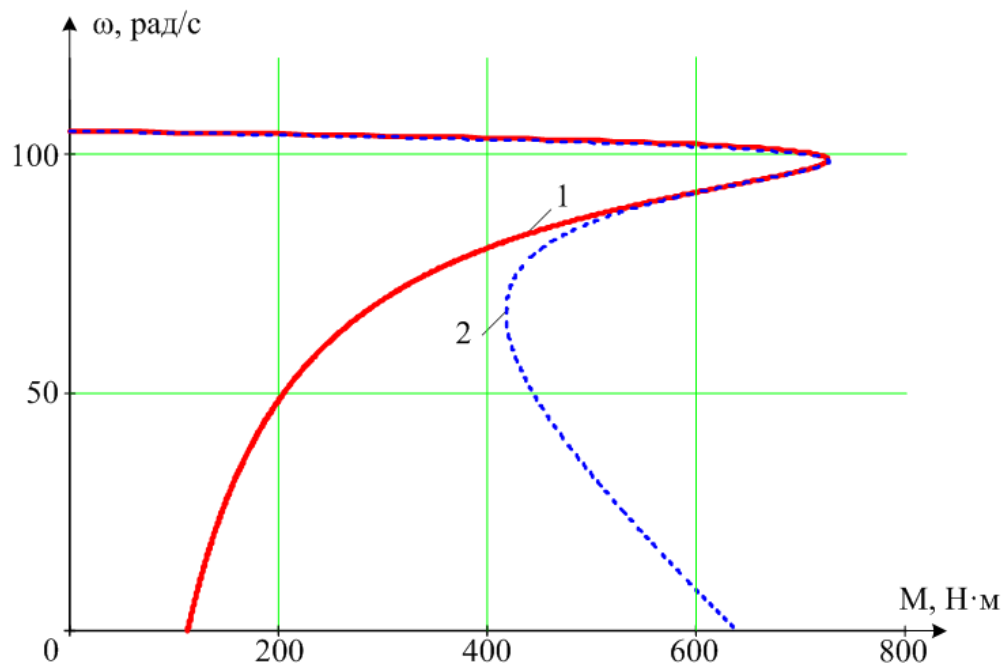


Рисунок 5.1 – Природні механічні характеристики АД з КЗ ротором

Об'єднана механічна характеристика АД побудована за формулами Клоса та Чекунова приведена на рисунку 5.2

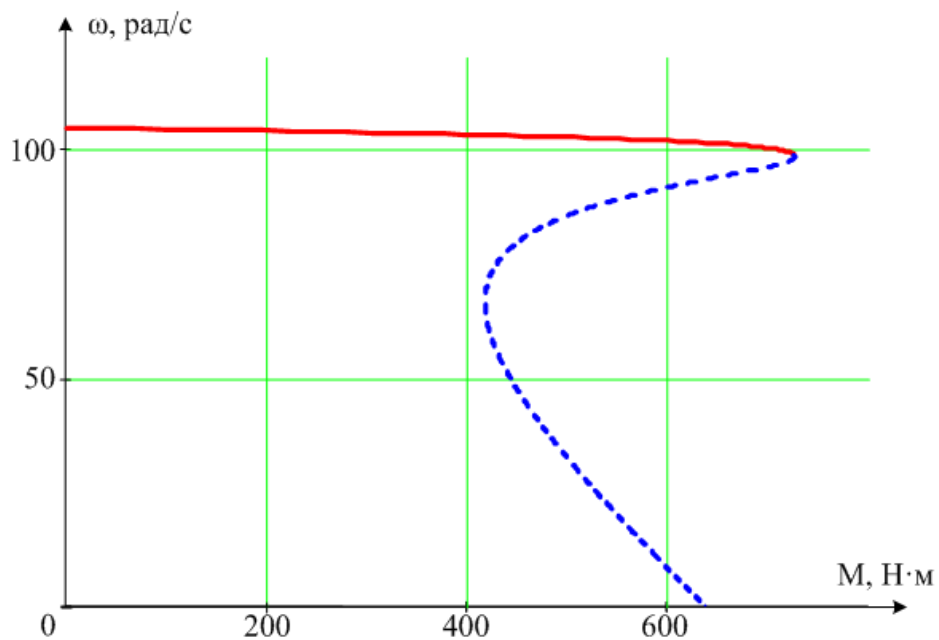


Рисунок 5.2 – Об'єднана механічна характеристика АД побудована за формулами Клоса та Чекунова

Окрім механічної, важливою також є електромеханічна характеристика асинхронного двигуна, яка відображає залежність кутової швидкості обертання ротора від струму в обмотці статора при різному навантаженні.

Ця характеристика дозволяє оцінити реакцію струму двигуна на зміну навантаження та використовується для аналізу стійкості приводу. Важливо знати її форму при проектуванні систем із частими пусками або навантаженнями, що змінюються у часі.

На рисунку 5.3 показано електромеханічну характеристику двигуна ВРІ200L6 у координатах  $\omega_2 = f(I_2')$

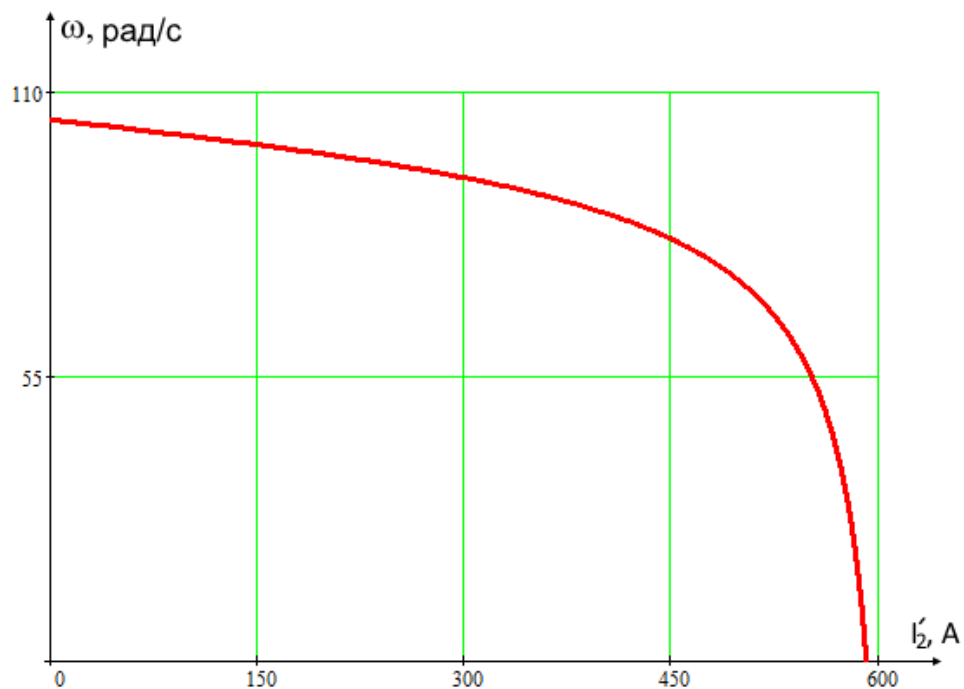


Рисунок 5.3 – Електромеханічна характеристика АД

З графіка видно, що при зростанні струму (тобто збільшенні навантаження) відбувається поступове зниження швидкості обертання двигуна. При номінальному струмі (близько 91 А) зменшення швидкості є незначним, що свідчить про достатню жорсткість характеристики. Різке падіння швидкості при струмах, що перевищують 500-550 А, вказує на втрату стійкості та наближення до критичної точки ковзання і пускового значення струму (по суті

– струму короткого замикання. Ця характеристики і роботи двигуна є небажаною для довготривалої експлуатації, оскільки супроводжується великими втратами, нагрівом і ризиком аварійної зупинки.

У разі керування асинхронним двигуном за допомогою частотного перетворювача доцільним є перевірка його роботи при різних частотах живлення. Це дозволяє оцінити зміну характеристик двигуна в умовах частотного регулювання швидкості.

На рисунку 5.4 представлено сімейство механічних характеристик асинхронного двигуна типу ВРІ200L6, побудованих для частот живлення 20, 30, 40 та 50 Гц. Графік побудовано за умовою збереження співвідношення  $U/f = \text{const}$ , що є типовим режимом роботи для частотного електропривода.

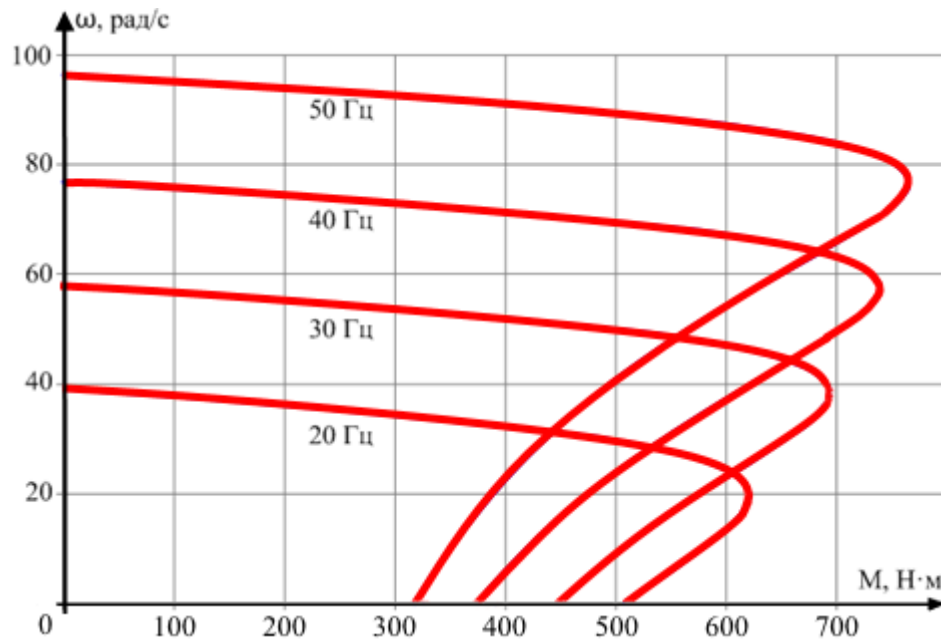


Рисунок 5.4 – Сімейство механічних характеристик асинхронного двигуна при частотах живлення 20-50 Гц

При аналізі графіків видно, що зі зниженням частоти разом зі зменшенням напруги суттєво зменшується критичний момент двигуна, особливо в області низьких частот. Це пояснюється зменшенням ЕРС обмотки статора та напруги на контурі намагнічування, оскільки зі зменшенням частоти індуктивний опір статора зменшується, а частка падіння напруги на активному

опорі зростає. У результаті, напруга, що реально створює магнітне поле, зменшується, а разом з нею послаблюється магнітний потік.

Таким чином, навіть ідеальне збереження пропорції  $U/f = \text{const}$  без компенсації падіння напруги на опорах, призводить до зниження моменту. Щоб уникнути цього ефекту, на низьких частотах бажано не зменшувати напругу лінійно, а застосовувати корекцію – наприклад, шляхом підвищення напруги на низьких частотах і додавання напруги зсуву (boost voltage). Це дозволяє зберегти магнітний потік і момент на рівні, близькому до номінального.

З графіків на рисунку 5.4 видно, що до настання критичного ковзання всі характеристики зберігають майже однаковий нахил, тобто жорсткість механічної характеристики (відношення зміни моменту до зміни швидкості) залишається практично сталою. Це важлива властивість АД для стабільної роботи електроприводу у робочій зоні.

**Висновок.** Виконано розрахунок та побудову механічних і електромеханічних характеристик асинхронного двигуна типу ВРІ200L6, обраного для приводу стрічкового конвеєра. Механічні характеристики побудовані за формулами Клоса та Чекунова з використанням розрахованих параметрів двигуна. Проведено аналіз сімейства механічних характеристик при змінних частотах живлення (20-50 Гц) у режимі  $U/f = \text{const}$ . Відзначено, що зі зменшенням частоти знижується критичний момент, що пов'язано зі зменшенням напруги на контурі намагнічування через втрати на активному опорі обмоток. Підкреслено, що для збереження магнітного потоку і тягових характеристик на низьких частотах доцільно використовувати додаткові режими компенсації, зокрема підвищення напруги (boost voltage). Такі режими реалізовано у більшості сучасних частотних перетворювачів частоти і можуть бути активовані під час налаштування. У наступних розділах буде розглянуто вибір частотного перетворювача, здатного підтримувати потрібний режим.



## 6 РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ, РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ІІ СИЛОВОГО КОЛА

Сучасний частотно-регульований електропривод складається з електродвигуна (асинхронного або синхронного) та перетворювача частоти (рисунок 6.1).

Електродвигун перетворює електричну енергію на механічну та передає її виконавчому механізму. Перетворювач частоти (ПЧ) формує напругу змінної частоти та амплітуди, що подається на двигун. Регулюючи частоту живлення  $f$ , ми змінюємо кутову швидкість обертання ротора.

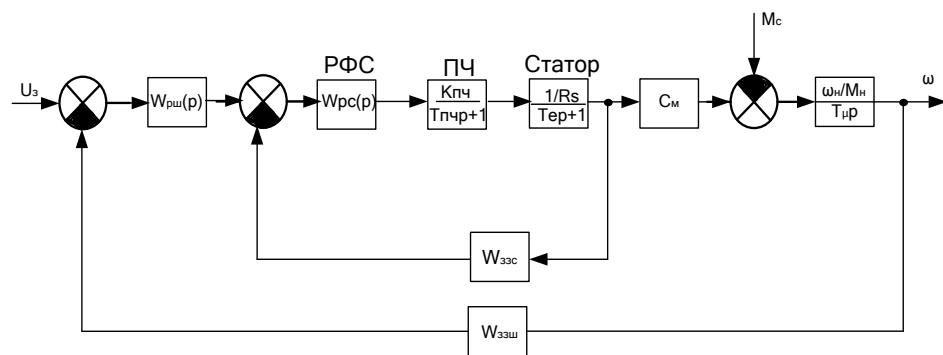


Рисунок 6.1 – Спрощена структурна схема частотно-регульованого електропривода

Сучасні ПЧ є складними статичними електронними пристроями, що складаються з силової та керувальної частин.

- Силова частина формує необхідну форму напруги. Вона виконується на базі силових напівпровідникових ключів (тиристори, транзистори), які працюють у режимі перемикання.
- Керувальна частина базується на мікропроцесорних системах та реалізує алгоритми керування, діагностику, захист, самоналаштування тощо.

Типи перетворювачів частоти

Перетворювачі частоти поділяють на два основних класи:

1. ПЧ з проміжною ланкою постійного струму.
2. ПЧ з безпосереднім зв'язком (без проміжної ланки постійного струму).

Кожний з існуючих класів перетворювачів має свої достоїнства й недоліки, які визначають область раціонального застосування кожного з них.

Перетворювачі з безпосереднім зв'язком (рисунк 6.2) – це найпростіша та історично перша схема ПЧ. У ній тиристори формують керований випрямляч, який по черзі підключає обмотки двигуна до мережі.

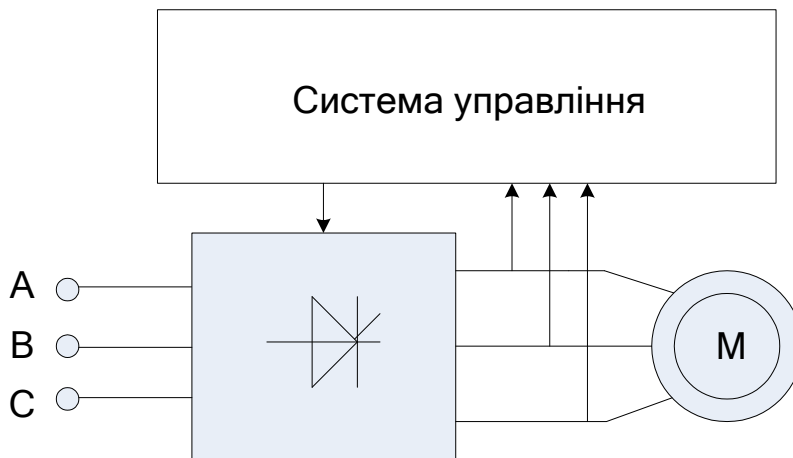


Рисунок 6.2 Перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком

Вихідна напруга перетворювача частоти формується шляхом модифікації вхідної синусоїдальної напруги, зокрема шляхом її "нарізання" або імпульсної модуляції. У результаті цього формується несинусоїдальна, здебільшого пилкоподібна напруга, яка значно відрізняється від ідеальної синусоїди. Така форма сигналу містить значну кількість вищих гармонік. Ці гармоніки є джерелом ряду проблем: вони спричиняють додаткові енергетичні втрати в обмотках електродвигуна, сприяють його перегріву, знижують ефективність створення електромагнітного моменту, а також можуть викликати значні електромагнітні завади у мережі живлення. Усе це погіршує загальну продуктивність і надійність системи. Щоб зменшити негативний вплив гармонік, іноді застосовуються додаткові фільтрувальні або компенсувальні пристрої. Однак їх впровадження призводить до збільшення вартості

обладнання, зростання габаритів і маси установки, а також до зниження загального коефіцієнта корисної дії (ККД) системи.

На сучасному етапі розвитку електроприводів з частотним регулюванням найбільш широке застосування знаходять перетворювальні пристрої з проміжною ланкою постійного струму, конструктивна схема яких подана на рисунку 6.3. Основною особливістю таких систем є реалізація двоступеневого перетворення електричної енергії: на першому етапі вхідна синусоїдальна напруга зі сталою амплітудою та частотою перетворюється у напругу постійного струму за допомогою випрямляча (В), після чого відбувається її фільтрація та згладжування (Ф); на другому етапі інверторна частина (І) формує змінну напругу із заданими частотними та амплітудними параметрами.

Застосування проміжної ланки постійного струму забезпечує високу гнучкість керування, однак супроводжується певними недоліками. Зокрема, подвійне перетворення електроенергії зумовлює зниження енергетичної ефективності системи (ККД), а також погіршення масо-габаритних характеристик у порівнянні з перетворювачами прямої дії.

Для синтезу наближено синусоїдальної вихідної напруги у таких пристроях застосовуються автономні інвертори струму або напруги, в яких як силові ключові елементи використовуються напівпровідникові прилади нового покоління – замикаючі тиристори типу GTO (Gate Turn-Off), а також їхні вдосконалені модифікації: GCT (Gate-Commutated Thyristor), IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor), SGCT (Symmetrical GCT), і IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – біполярні транзистори з ізольованим затвором. Серед ключових переваг тиристорних перетворювачів, як і систем із прямим енергетичним зв'язком, варто відзначити їх здатність ефективно працювати при високих рівнях напруги й струму, стійкість до тривалих навантажень, а також високу надійність в умовах дії імпульсних навантажень.

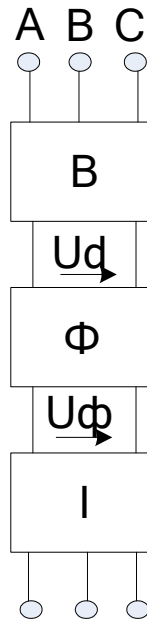


Рисунок 6.3 Перетворювачі частоти проміжною ланкою постійного струму

### 6.1 Вибір транзисторів і шунтуючих діодів

Вибір силових транзисторів у схемах керування здійснюється на основі таких основних параметрів:

- 1) Максимальний струм переходу емітер-колектор у відкритому стані  $I_{к.мах}$ ;
- 2) Максимальна напруга переходу емітер-колектор  $U_{к.мах}$ .

Максимально допустимий струм якоря визначається з умов комутації за формулою:

$$I_{доп} = \lambda \cdot I_n, \quad (6.1)$$

$$I_{доп} = 2.9 \cdot 91 = 263,9 \text{ (A)}.$$

Максимальний струм якоря, узгоджений з технічними характеристиками транзистора, розраховується з урахуванням коефіцієнтів запасу по струму та охолодженню:

$$I_{мах} = \kappa_{зі} \cdot \kappa_{охл} \cdot I_{доп}, \quad (6.2)$$

де  $\kappa_{зі}$  – коефіцієнт запасу по струму ( $\kappa_{зі}=2$ );

$\kappa_{охл}$  с коефіцієнт, що враховує умови охолодження ( $\kappa_{охл}=2.5$ ).

$$I_{\max} = 2 \cdot 2.5 \cdot 263.9 = 1319.5 \text{ (A)}.$$

Максимальна напруга, що прикладається до транзистора при його запиранні, визначається як:

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot \kappa_{\text{зн}} \cdot U_{\text{н}}, \quad (6.3)$$

де  $\kappa_{\text{зн}}$  – коефіцієнт, що враховує перенапругу ( $\kappa_{\text{зн}}=1.3$ ).

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot 1.3 \cdot 380 = 698.6 \text{ (В)}.$$

З каталогу [7] вибирається транзистор за умов:

$$\begin{cases} I_{\text{k.max}} \geq I_{\max}, \\ U_{\text{k.max}} \geq U_{\max}. \end{cases} \quad (6.4)$$

У результаті вибрано транзистор типу MGW30N70, який забезпечує  $I_{\text{k.max}}=1320 \text{ А}$  та  $U_{\text{k.max}}=700 \text{ В}$ .

Для компенсації зворотного струму та захисту транзистора обирається шунтуючий діод. Згідно з довідником [8], діод має відповідати умовам:

$$\begin{cases} I_{\text{пр.max}} \geq I_{\max}, \\ U_{\text{обр.max}} \geq U_{\max}. \end{cases} \quad (6.5)$$

Вибрано діод типу Д161-320 з  $I_{\text{пр.max}}=1340$  і  $U_{\text{пр.max}}=700 \text{ В}$ .

## 6.2 Вибір схеми управління силовими ключами

Для управління силовими транзисторами використовуються спеціалізовані драйвери — мікросхеми, які забезпечують необхідну амплітуду і форму керуючих імпульсів. Драйвер виконує роль посередника між логічним рівнем сигналу керування та силовим ключем, забезпечуючи гальванічну розв'язку, захисти та підсилення сигналу.

У драйвері передбачені такі функціональні можливості:

- гальванічна розв'язка,
- контроль живлення,

- захист від перенапруги та зниженого живлення,
- фільтрація імпульсів.

Схема драйвера подана на рисунку 6.4, де зображена функціональна схема мікросхеми типу M57915L.

Основні технічні характеристики драйвера:

Максимальна напруга на виході щодо загального проводу на оптопарі – 2500 В;

- Максимальна напруга на керуючому виході – до 7 В;
- Максимальний струм керування – 3 А;
- Час вмикання – 120 нс,  
час вимикання – 90 нс;
- Робочий температурний діапазон – від  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ .

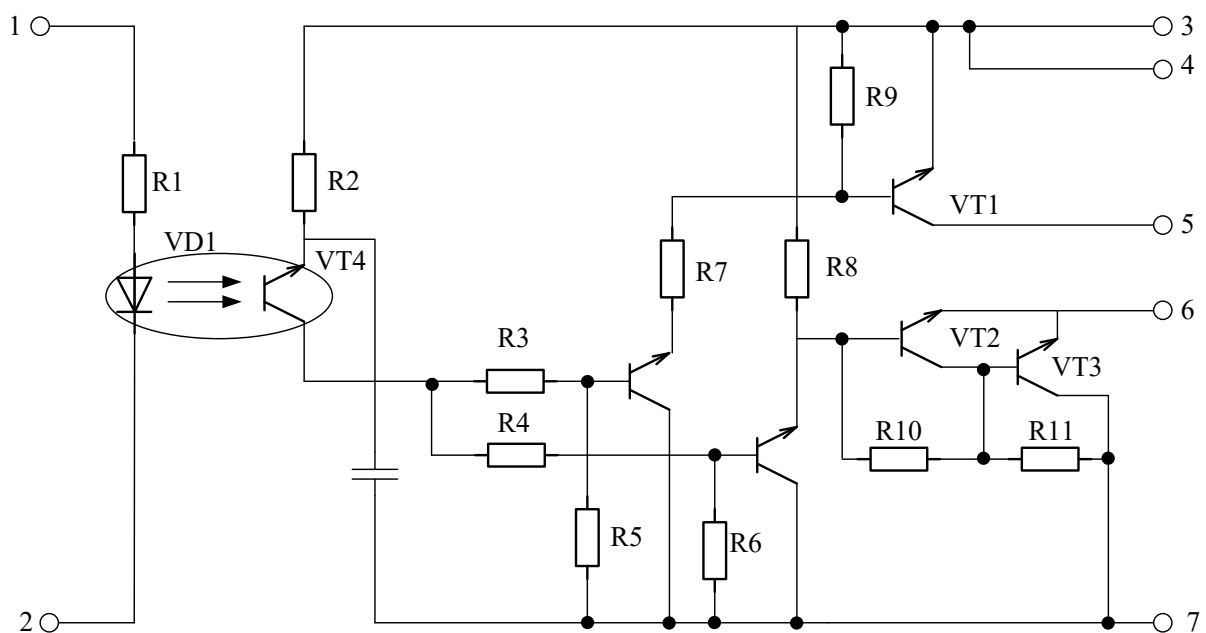


Рисунок 6.4 – Функціональна схема драйвера типу M57915L

### 6.3 Вибір плавких запобіжників

Для забезпечення надійного захисту електродвигуна від перевантаження та короткого замикання вибір плавких запобіжників виконується з урахуванням номінального струму статора. У розрахунках приймається  $I_{pz} = I_{dn}$ .

Середній струм запобіжника визначається за формулою:

$$I_{cp} = \frac{I_{pz}}{3 \cdot n}, \quad (6.6)$$

$$I_{cp} = \frac{91}{3 \cdot 1} = 30,3 (A),$$

де  $n$  – кількість паралельних ланок в одному плечі (для даної схеми  $n = 1$ ).

Діюче значення струму плавкої вставки запобіжника обчислюється як:

$$I_3 = I_{cp} \cdot \sqrt{3} = 30,3 \cdot \sqrt{3} = 52,5 (A). \quad (6.7)$$

За розрахунковим струмом із довідника вибирається запобіжник типу ПН-2-3, який має наступні параметри:: номінальна напруга  $U_{нз}=400$  В; номінальний струм  $I_{нз} = 100A$ , номінальний струм плавкої вставки  $I_{пл.вст} = 250 (A)$ .

### 6.4 Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі підбираються з урахуванням трьох ключових умов:

$$I_3 = I_{cp} \cdot \sqrt{3} = 12,173 \cdot \sqrt{3} = 21,084 (A), \quad (6.8)$$

$$U_{на} \geq U_2 = 380 (B), \quad (6.9)$$

$$I_{на} \geq I_{2н} = 9,13 (A). \quad (6.10)$$

Дотримуючись вищезазначених умов, із довідника обирається автоматичний вимикач типу АЕ 20000, який задовольняє такі технічні характеристики:

- номінальний струм  $I_{\text{на}} = 10 \dots 100 \text{ A}$ ;
- номінальна напруга  $U_{\text{на}} = 380 \text{ В}$ ;
- максимальний струм відключення  $I_{\text{нвідкл}} = 16 \text{ кА}$ .

### 6.5 Вибір захисту двигуна від підвищення напруги на статорі двигуна

Для запобігання пошкодженню ізоляції та перевантаженню при підвищенні напруги живлення, застосовується реле контролю напруги. Його номінальна напруга розраховується як:

$$U_p = 1,1 \cdot U_{\text{дн}}, \quad (6.11)$$

$$U_p = 1,1 \cdot 380 = 418 \text{ (В)}.$$

Напруга спрацювання реле визначається за формулою:

$$U_{\text{сп}} = (0,25 \div 0,8) \cdot U_p, \quad (6.12)$$

$$U_{\text{сп}} = (0,25 \div 0,8) \cdot 418 = 104,5 \div 334,4 \text{ (В)}.$$

Таким чином, вибрано реле напруги РЕЛСнС НЛ-4 з номінальною напругою  $U_{\text{ном,р}} = 500 \text{ В}$ , яке забезпечує необхідний рівень захисту.

### 6.6 Розробка принципової електричної схеми

Принципова електрична схема системи керування асинхронним двигуном представлена на рисунку 6.7. Вона включає:

- вузли керування і захисту;
- силові елементи (транзистори, інвертори);
- допоміжні компоненти (драйвери, запобіжники, вимикачі, реле).

Схема розроблена з урахуванням вимог енергоефективності та відповідає заданим умовам експлуатації електроприводу.



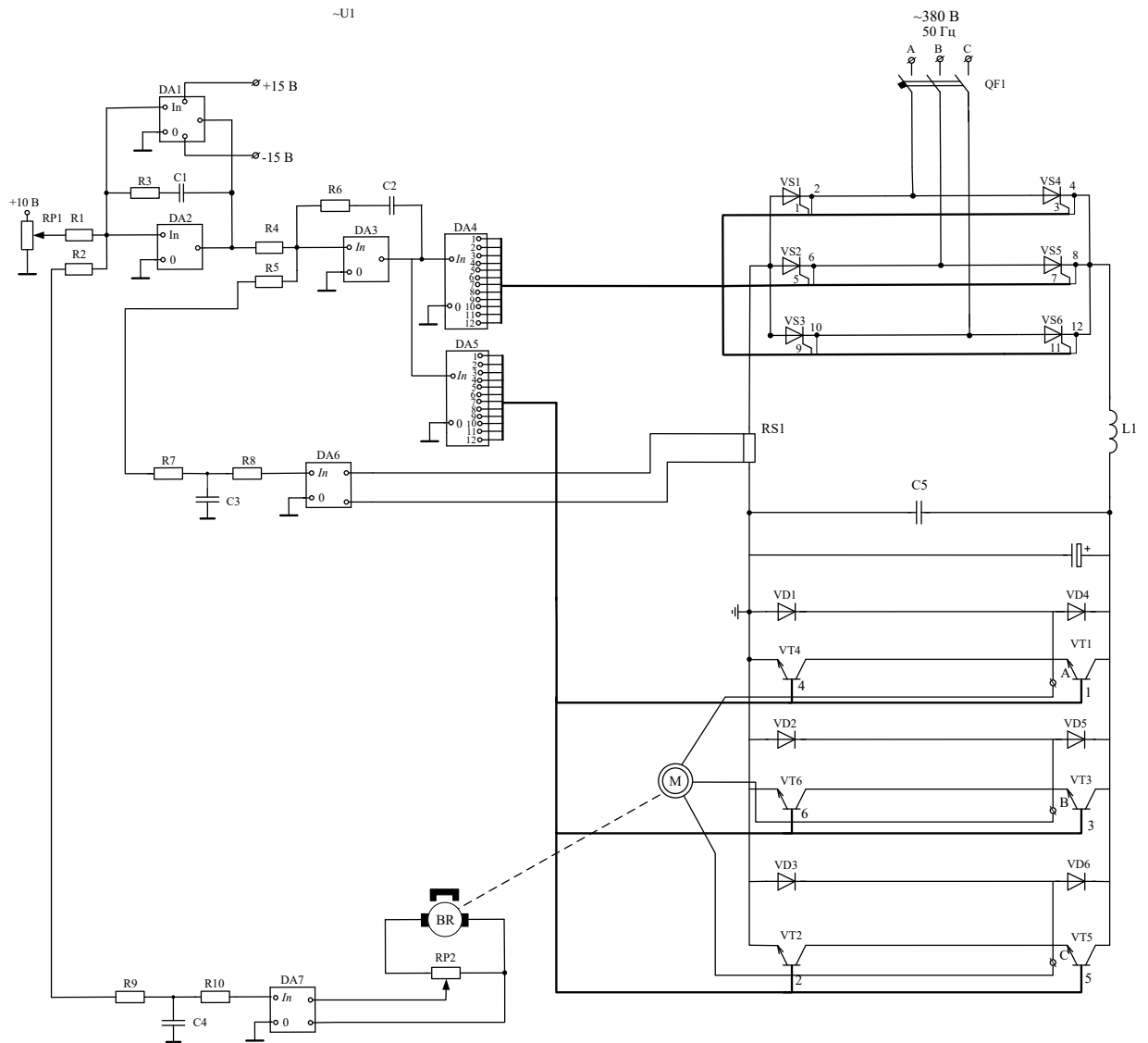


Рисунок 6.7 – Схема електрична принципова керування АД

З урахуванням вимог до технологічного об'єкта розроблено систему керування асинхронним електроприводом, побудовану за принципом частотного регулювання з використанням автономного інвертора струму:

- Живлення електродвигуна здійснюється від перетворювача частоти (ПЧ), у складі якого є керований випрямляч (КВ) та автономний інвертор напруги (АІН).
- Система керування реалізована за двоконтурною структурою: зовнішній контур – регулятор швидкості, внутрішній – регулятор струму.

- Керування КВ та АІН здійснюється незалежно, що підвищує стабільність і динамічну точність системи.
- Для реалізації алгоритмів регулювання, імпульсно-фазового керування та сигналів задання використовуються цифрові пристрої ДА.
- Алгоритми керування струмом та швидкістю реалізуються відповідно до ПІ-закону (для струму) та П-регулятора (для швидкості).

На рисунку 6.7:

Uзад – напруга задання швидкості та струму статора двигуна;

КВ – керований випрямляч;

АІН – автономний інвертор напруги;

DA2, DA3 – відповідно регулятор струму та швидкості;

DA7 – задавач інтенсивності;

DA4, DA5 – відповідно системи імпульсно-фазового керування КВ та АІН;

Rзс, Rзш – відповідно задавальний резистор струму та швидкості;

Rс, Rш – відповідно опори кола зворотнього зв'язку системи за струмом та швидкістю;

Rззс, Rззш – відповідно опори кола зворотнього зв'язку регулятора за струмом та швидкістю;

Rос, Roш – відповідно обмежуючі опори кола контурів струму та швидкості;

Rнс, Rнш – відповідно опори навантаження регулятора кола струму та швидкості; Rп – опір потенціометра тахогенератора;

Cззс – ємність зола зворотнього зв'язку регулятора за струмом;

Rш – опір шунта.

Виходячи з принципової схеми здійснюємо побудову функціональної схеми системи керування електропривода (рисунок 6.8).

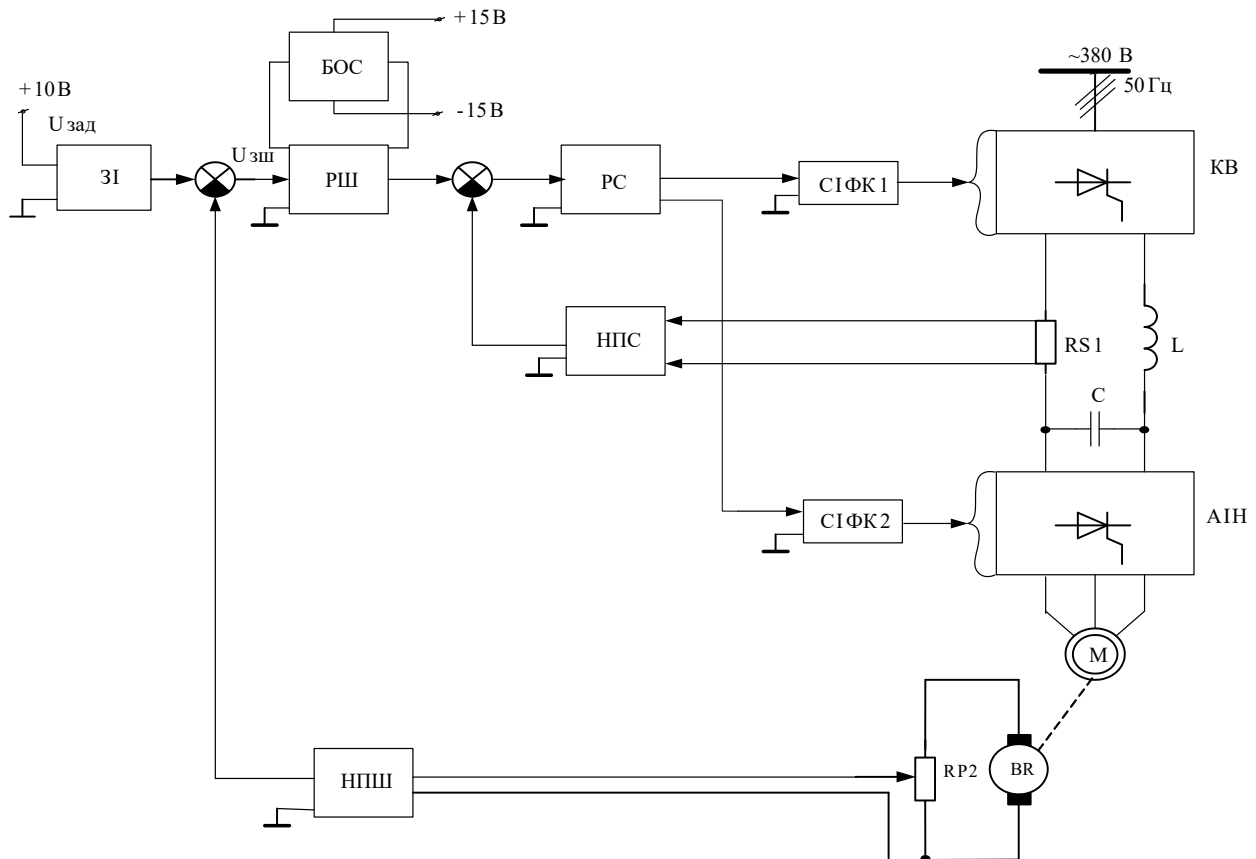


Рисунок 6.8 – Функціональна схема двоконтурної системи керування асинхронним двигуном

**Висновок.** Розроблена система керування забезпечує ефективне та стабільне регулювання частоти і швидкості обертання асинхронного двигуна в широкому діапазоні, з високою точністю і швидкодією. Завдяки роздільному керуванню випрямлячем і інвертором досягається гнучкість налаштувань, а застосування цифрових елементів дозволяє легко інтегрувати систему в сучасні автоматизовані комплекси.

## 7 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Для моделювання перехідних процесів використовується ППП Matlab, а саме вбудована модель АД, що представлена на рисунку 7.1.

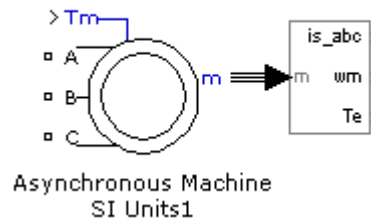


Рисунок 7.1 – модель АД в ППП Matlab.

По паспортним даним двигуна розрахуємо параметри двигуна, необхідні для моделювання.

Параметри моделі асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором зображено на рисунку 7.2.

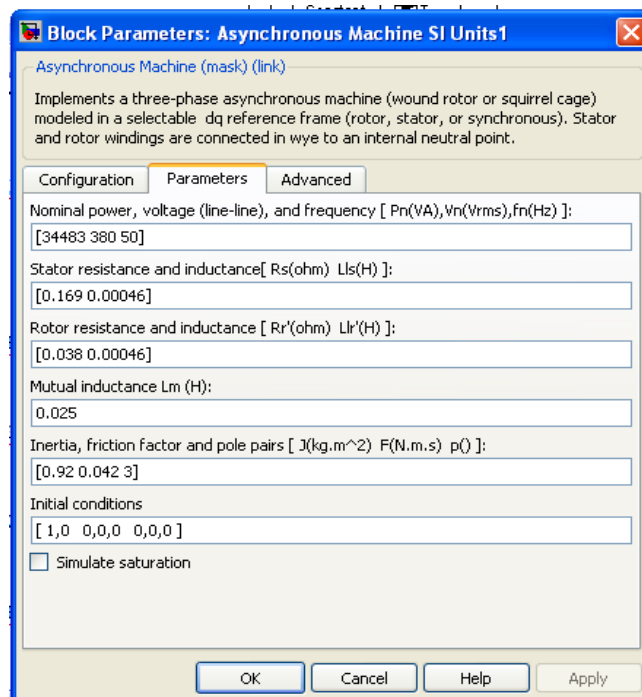


Рисунок 7.2 – Параметри асинхронного двигуна в ППП Matlab

Модель двигуна з живленням та навантаженням при холостому пуску, зібрана в ППП Matlab Simulink бібліотеки елементів SimPower System, зображена на рисунку 7.3.

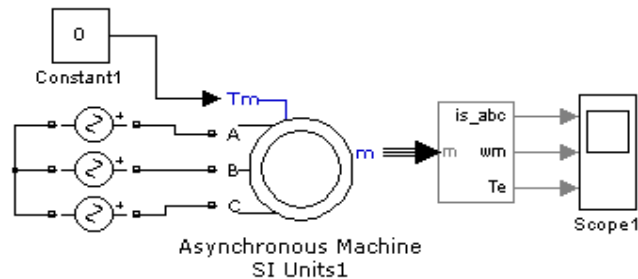


Рисунок 7.3 – Модель асинхронного двигуна, зібрана в ППП Matlab Simulink

Перехідні процеси струму статора, швидкості обертання та моменту електродвигуна в режимі пуску без навантаження приведено на рисунку 7.4.

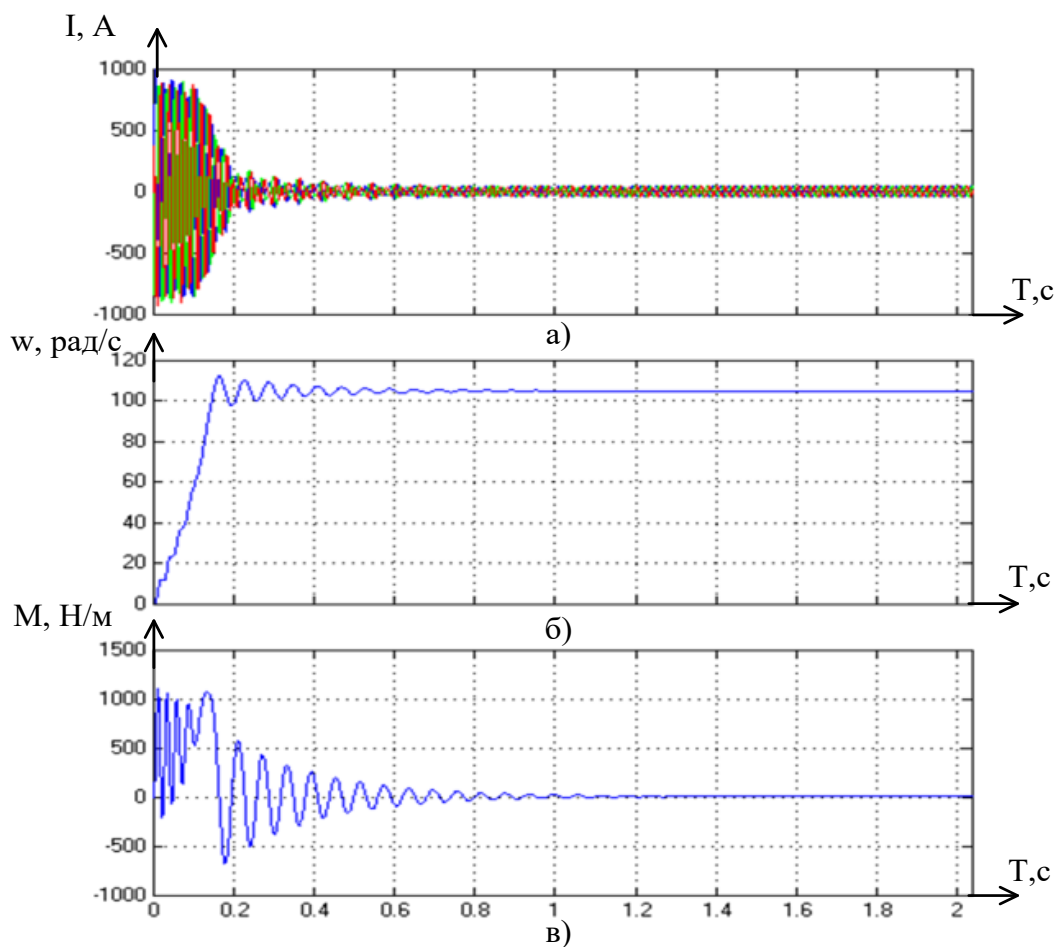


Рисунок 7.4 – Графіки струму статора а), швидкості б) та моменту двигуна в) при холостому пуску

Відповідно до умов роботи конвеєра виконаємо запуск двигуна на холостий хід до 1 с., та накид номінального навантаження в 1 с. Модель двигуна для забезпечення такого переміщення, зібрана в ППП Matlab Simulink, зображена на рисунку 7.5.

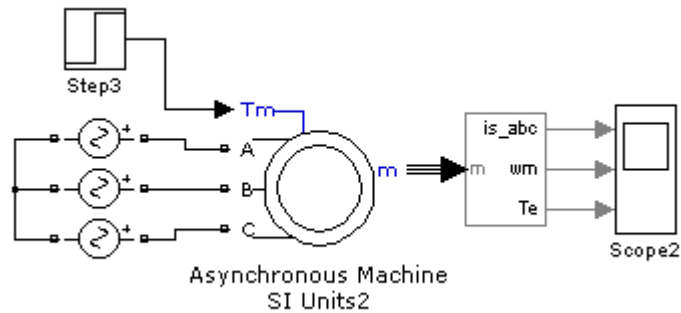


Рисунок 7.5 – Модель двигуна при накиді навантаження

Графіки перехідних процесів при цьому зображено на рисунку 7.6.

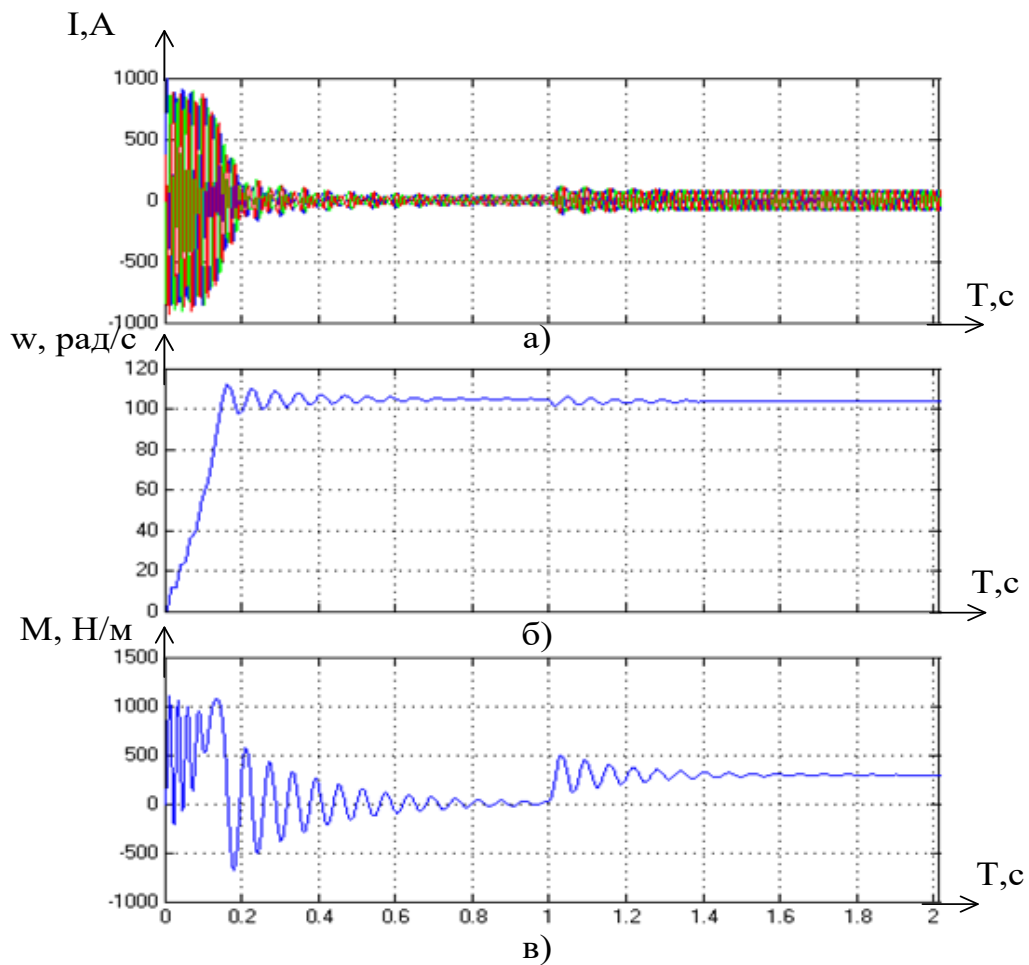


Рисунок 7.6 – Графіки перехідних процесів відповідно струмів статора а), швидкості обертання б) та моменту двигуна при накиді навантаження в)

Розглянемо випадок, коли в 1 с. на двигун подається номінальне навантаження, а сипучий матеріал продовжує сипатися на стрічку конвеєра. Графіки перехідних процесів при цьому зображено на рисунку 7.7.

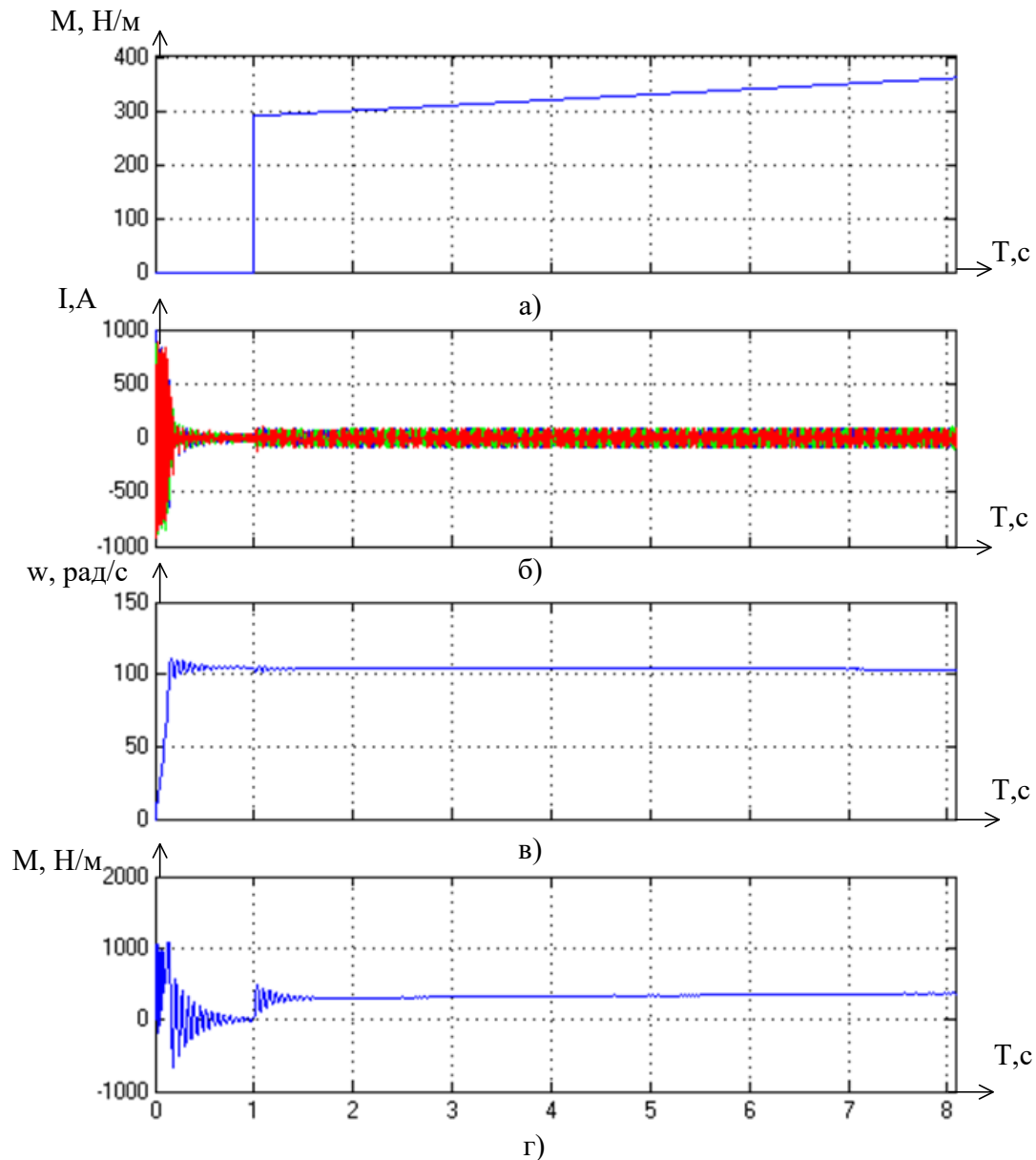


Рисунок 7.7 – Графіки моменту навантаження а), струмів статора б) швидкості обертання в) та моменту двигуна при накиді навантаження більше за номінальне г)

По паспортним даним розрахуємо параметри двигуна, необхідні для моделювання системи керування. Розрахунок представлено в додатку В.

Лінійна модель асинхронного двигуна, зібрана в ППП Matlab, зображена на рисунку 7.8.

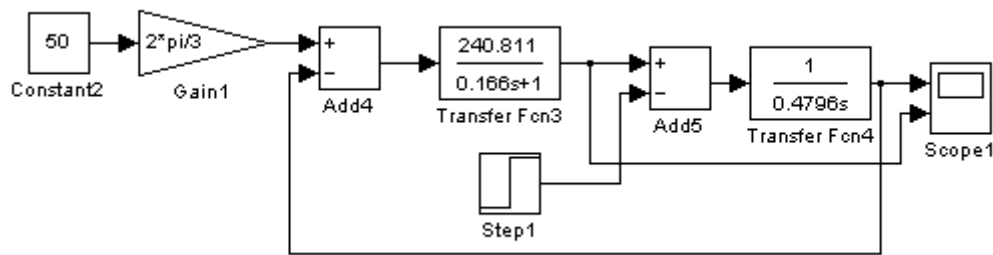


Рисунок 7.8 – Лінійна модель асинхронного двигуна, зібрана в ППП Matlab

При накиді номінального навантаження в 1с., отримаємо графіки перехідних процесів швидкості обертання та моменту двигуна (рис. 7.9).

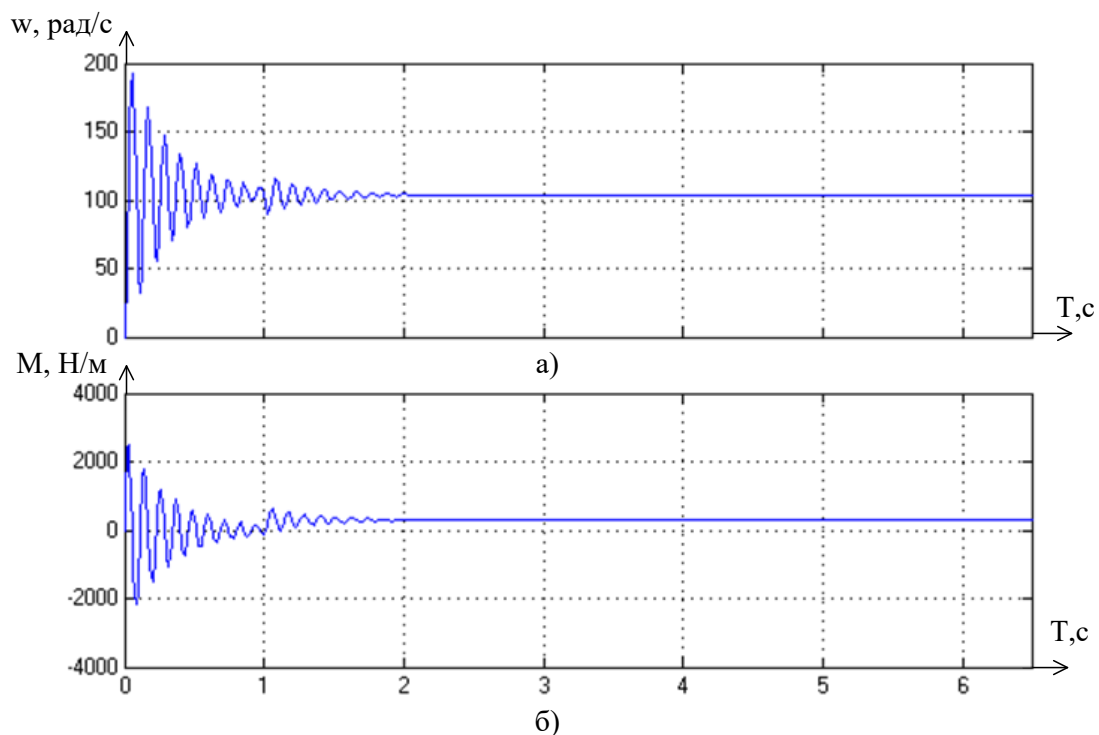


Рисунок 7.9 – Графіки перехідних процесів швидкості обертання а) та моменту двигуна б) при накиді в 1 с. номінального навантаження

Доповнимо побудовану модель двигуна моделлю перетворювача частоти з регулятором струму. Параметри регулятора розраховані в розділі 4. Комп'ютерна модель внутрішнього контуру моменту (струму в лінійній моделі асинхронного двигуна) зображена на рисунку 7.10.



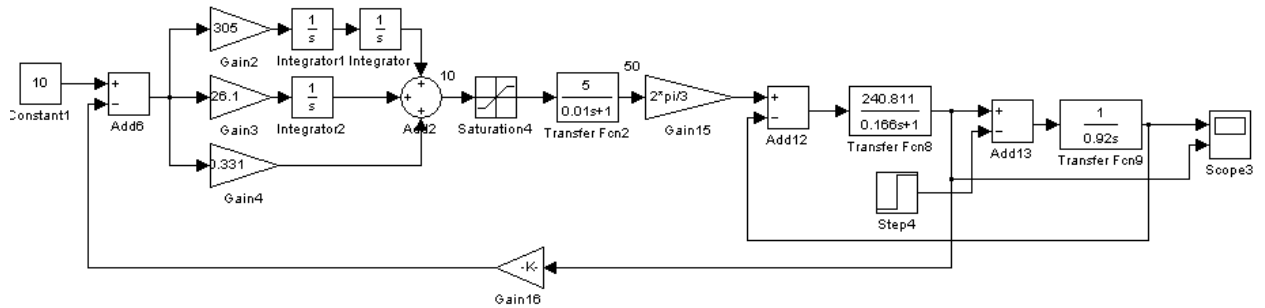


Рисунок 7.10 – Комп’ютерна модель внутрішнього контуру моменту (струму) асинхронного двигуна

Графіки перехідних процесів швидкості обертання та моменту, при накиді в 1с. номінального навантаження, зображено на рисунку 7.11.

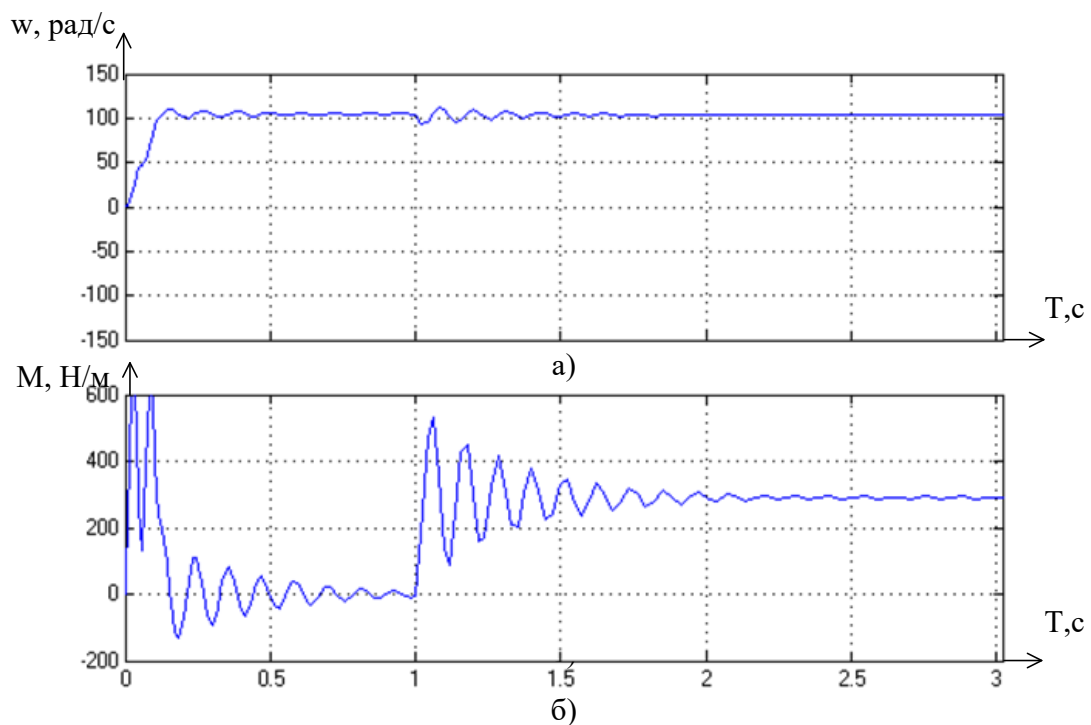


Рисунок 7.11 – Графіки перехідних процесів відповідно швидкості обертання а) та моменту двигуна в системі зі зворотнім зв’язком по моменту б), при накиді в 1с. номінального навантаження

Охопимо внутрішній контур струму зворотнім зв’язком по швидкості. Параметри регулятора швидкості розраховані в розділі 4. Комп’ютерна модель системи з двома зворотніми зв’язками зображена на рис. 7.12.

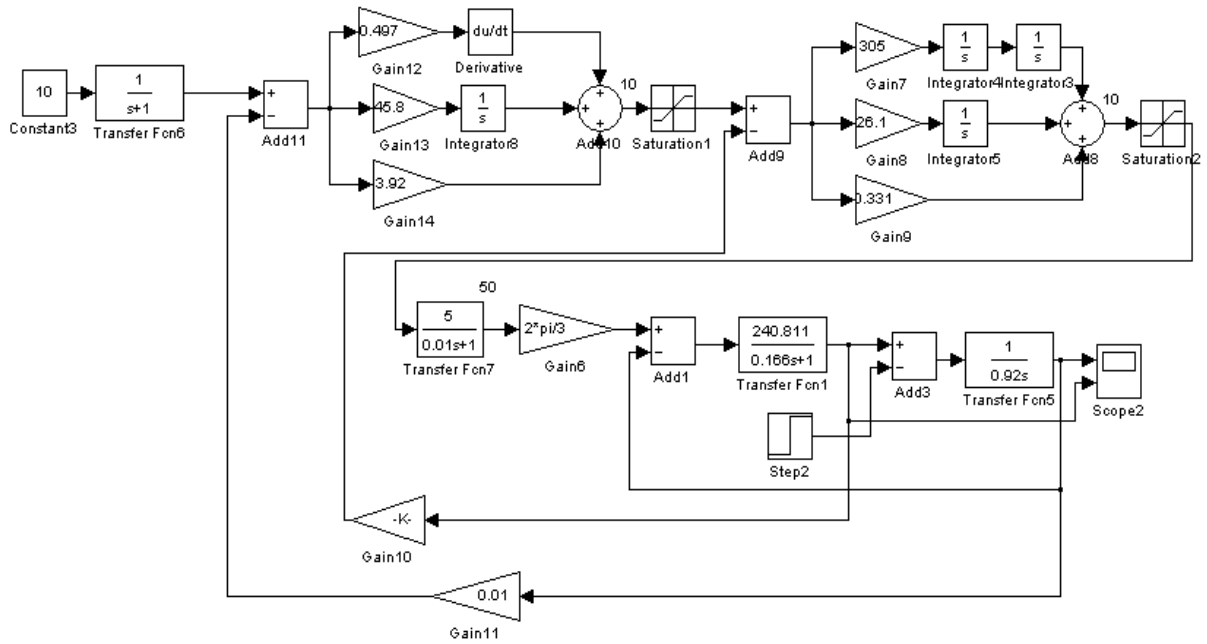


Рисунок 7.12 – Комп’ютерна модель двохконтурної системи керування асинхронним двигуном

Графіки перехідних процесів швидкості обертання та моменту, при накиді в 1с. номінального навантаження, зображено на рисунку 7.13.

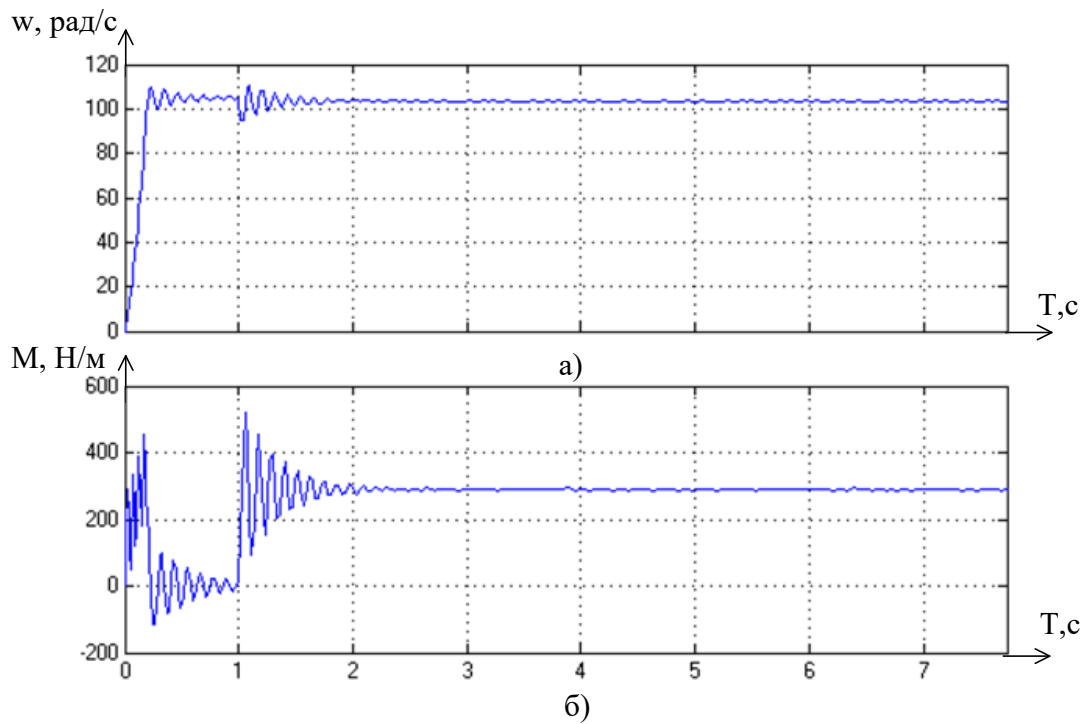


Рисунок 7.13 – Графіки перехідних процесів відповідно швидкості обертання а) та моменту двигуна б) в системі з двома зворотніми зв'язками по моменту (струму) та швидкості обертання, при накиді в 1с. номінального навантаження

На основі аналізу отриманих графіків перехідних процесів можна зробити висновок про покращення динамічних характеристик системи електропривода. Зокрема, спостерігається зменшення величини перерегулювання швидкості, що свідчить про коректність проведених розрахунків і налаштування регуляторів.

Двигун адекватно реагує на задавальні дії, демонструючи стабільне відпрацювання навіть за умов номінального навантаження, без ознак зупинки чи втрати динаміки. Перехідні процеси як при зміні режиму роботи, так і при прикладенні навантаження характеризуються незначною тривалістю, що підтверджує достатню швидкодію системи керування.

**Висновок.** У ході моделювання було підтверджено працездатність і ефективність реалізованої системи керування. При номінальному навантаженні електродвигун зберігає роботу без зупинки, а значення швидкості та моменту на валу після завершення перехідного процесу досягають заданих (уставлених) величин. Це дозволяє стверджувати, що модель двигуна розроблена коректно, а система керування забезпечує необхідну якість регулювання.

## 8 РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ. ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ

### 8.1 Оцінка стійкості

Під стійкістю системи у загальному розумінні слід розуміти здатність системи повертатися до початкового стану після припинення дії зовнішнього збурення, що вивело її з рівноважного положення.

Аналіз стійкості системи передбачає визначення загальної передавальної функції. У процесі розрахунку параметрів регулятора зовнішнього контуру швидкості передавальна функція приводиться до стандартного вигляду одиничного зворотного зв'язку. Таким чином, загальна передавальна функція системи ЕП набуває вигляду:

$$W(p) = \frac{F_{\text{ш}}(p)}{1 - F_{\text{ш}}(p)}, \quad (8.1)$$

де  $F_{\text{ш}}(p)$  – передаточна функція прямого каналу зовнішнього контуру швидкості, оптимізованого за модульним критерієм:

$$F_{\text{ш}}(p) = \frac{1}{2T_{0\text{ш}}p(T_{0\text{ш}}p + 1)}, \quad (8.2)$$

де  $T_{0\text{ш}}$  – мала незкомпенсована стала часу зовнішнього контуру.

Таким чином, отримано передаточну функцію системи у вигляді:

$$W(p) = \frac{140095.8}{14700p^2 + 5265.6p + 514493}.$$

Для побудови логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) та логарифмічної фазо-частотної характеристики (ЛФЧХ) було використано стандартні оператори програмного середовища MATLAB. Вікно команд наведено на рисунку 8.1.

```

>> num=140095.8

num =

    1.4010e+005

>> den=[14700 5265.6 514493]

den =

    1.0e+005 *

    0.1470    0.0527    5.1449

>> h=tf(num,den)

Transfer function:
           1.401e005
-----
14700 s^2 + 5266 s + 514493

>> margin(h)
>> |

```

Рисунок 8.1 – Вікно команд в Matlab

Отримані графіки ЛАЧХ і ЛФЧХ зображено на рисунку 8.2.

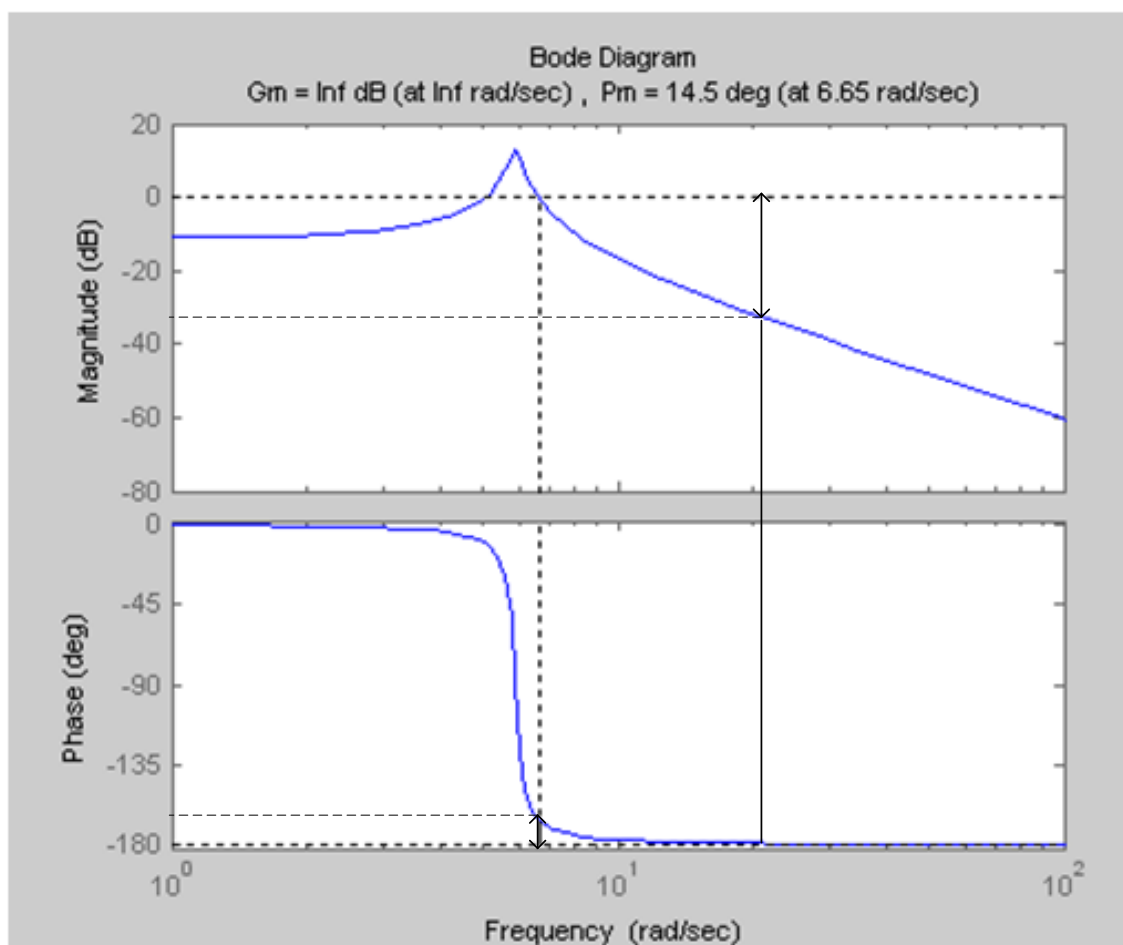


Рисунок 8.2 – Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ

На основі графічного аналізу ЛАЧХ та ЛФЧХ визначено частоту зрізу  $\omega_{зр}$ , тобто частоту, на якій амплітуда ЛАЧХ дорівнює 0 дБ, а також критичну частоту  $\omega_{кр}$ , на якій фазова характеристика перетинає  $-180^\circ$ .

Для забезпечення стійкості системи повинна виконуватися умова:

$$\omega_{зр} \leq \omega_{кр}, \quad (8.3)$$

Аналіз ЛАЧХ на критичній частоті дозволяє визначити запас стійкості за амплітудою – 34 дБ, та за фазою –  $25^\circ$ .

## 8.2 Оцінка якості

До основних показників якості системи регулювання належать:

1) Час регулювання  $t_p$  – час від моменту прикладення вхідної дії до моменту, коли відхилення регульованої величини від усталеного значення стає меншим за задану межу.

2) Час встановлення  $t_{вст}$  – інтервал часу, за який регульована величина досягає сталого значення (відображає швидкість процесу регулювання).

3) Перерегулювання – максимальне відхилення регульованої величини від сталого значення:

$$\sigma = \frac{\Delta X_{\max}}{X(\infty)} \cdot 100 \%, \quad (8.4)$$

де  $\Delta X_{\max}$  – максимальне відхилення,

$X(\infty) = \text{Нуст}(t)$  – усталене значення.

4) Стала часу коливань  $t_{\text{кол}}$  – інтервал між першим і другим піками графіка. Якщо коливань немає, то дорівнює нулю.

5) Кількість коливань  $n$  – число піків, які виходять за межі допустимого відхилення від усталеного значення.

6) Частота коливань  $f$  – відношення кількості піків  $N$  до загального періоду коливань. Оскільки в системі коливання відсутні, то  $f = 0$ .

Аналіз якості системи проводився за реакцією на одиничний сходячковий сигнал. Передавальна функція у цьому випадку набуває вигляду::

$$H(p) = \frac{W_0}{p}, \quad (8.5)$$

Для побудови графіка перехідної характеристики використано середовище MATLAB (рисунок 8.3), результати зображено на рисунку 8.4.

```
num =  
1.4010e+005  
  
>> den=[147 526 514493]  
  
den =  
147 526 514493  
  
>> h=tf(num,den)  
  
Transfer function:  
1.401e005  
-----  
147 s^2 + 526 s + 514493  
  
>> step(h)
```

Рисунок 8.3 – Вікно команд в Matlab

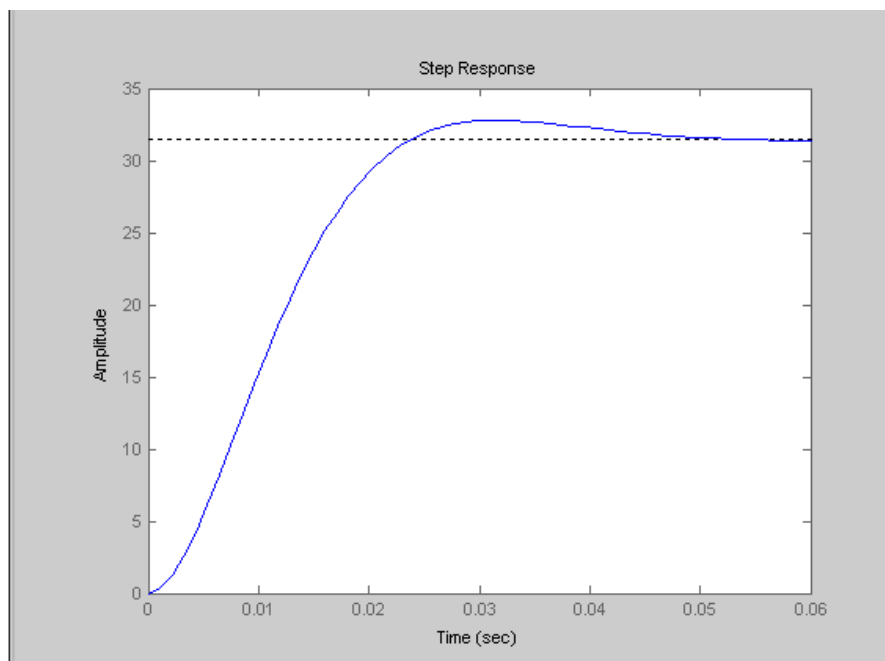


Рисунок 8.4 – Графік перехідної характеристики

На основі перехідної характеристики визначено такі параметри:

1) час встановлення:

$$t_{вст} = 0,06 (с);$$

2) Усталене значення:

$$H_{уст} = 31;$$

3) Максимальне значення:

$$H_{max} = 33;$$

4) Перерегулювання:

$$\sigma = \frac{H_{max} - H_{уст}}{H_{уст}} \cdot 100\%, \quad (8.6)$$

$$\sigma = \frac{33-31}{31} \cdot 100\% = 6\%;$$

5) Час регулювання:

$$t_p = 0,05 (с);$$

6) Кількість коливань:

$$n = 0;$$

7) Частота коливань:

$$f = \frac{N}{t_p}; \quad (8.7)$$

$$f = \frac{0}{1,8} = 0.$$

**Висновок:** Проведене дослідження стійкості та якості системи регулювання передбачало побудову ЛАЧХ, ЛФЧХ і графіка перехідної характеристики. На основі отриманих результатів було встановлено, що



система є стійкою та відповідає критеріям якості, тобто здатна забезпечити швидке та безколивальне регулювання із мінімальним перерегулюванням.

## 9 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

### 9.1 Розрахунок сенсорів та їх коефіцієнтів підсилення

У якості сенсора струму застосовується шунт, тоді як вимірювання частоти обертання здійснюється за допомогою тахогенератора постійного струму.

Коефіцієнт підсилення шунта:

$$k_{\text{ш}} = \frac{U_{\text{ш.н}}}{I_{\text{ш.н}}}, \quad (9.1)$$

де  $U_{\text{ш.н}}$  – номінальна напруга шунта ( $U_{\text{ш.н}} = 75 \text{ мВ}$ );

$I_{\text{ш.н}}$  – номінальний струм шунта, приймається рівним номінальному струму двигуна ( $I_{\text{ш.н}} = 91 \text{ А}$ ).

$$k_{\text{ш}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{91} = 0.0008 (\text{Ом}).$$

для вимірювання струму обрано шунт типу 75ШШП–100А зі стандартним значенням опору  $R_{\text{ш}} = 0.00075 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ , розрахований на максимально допустимий струм в колі якоря двигуна з врахуванням його перевантаження, тобто:

$$\lambda I_{\text{н}} = 2.9 \cdot 91 = 263.9 (\text{А}).$$

Далі уточнюється значення коефіцієнта підсилення шунта. Приймаючи  $k_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}$ , тобто  $k_{\text{ш}} = 0.00075 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ .

Підставивши відповідні числові значення, одержуємо:

$$k_{\text{n.cc}} \leq \frac{10}{k_{\text{ш}} \cdot \lambda \cdot I_{\text{н}}}, \quad (9.2)$$

$$k_{\text{n.cc}} \leq \frac{10}{0.00075 \cdot 10^{-6} \cdot 2.9 \cdot 2} = 2.29 \cdot 10^8.$$

За результатами розрахунку вибираємо стандартний коефіцієнт підсилення сенсора струму  $k_{\text{n.cc}} = 2.29 \cdot 10^8$ .

Коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за струмом обчислюється за формулою:

$$k_{cc} = k_{ш} \cdot k_{n,cc}, \quad (9.3)$$

$$k_{cc} = 0.00075 \cdot 10^{-6} \cdot 2.29 \cdot 10^8 = 0.17.$$

Тахогенератор обирається згідно з умовою:

$$n_{т.г} \geq n_n \quad (9.4)$$

де  $n_{т.г}$  – номінальна частота обертання тахогенератора.

$n_n$  – номінальна частота обертання двигуна.

Оскільки номінальна частота обертання двигуна  $n_n = 988$  об/хв, обирається тахогенератор типу ТП212 – 0.2 – 0.5 ІМ1082 УХЛ2 з номінальною частотою обертання  $n_{т.г.} = 1000$  об/хв і номінальною напругою тахогенератора  $U_{нт.г.} = 200$  В.

Коефіцієнт підсилення тахогенератора обчислюється як:

$$k_{тг} = \frac{U_{н.т.г.}}{\omega_{н.т.г.}}, \quad (9.5)$$

де  $U_{н.т.г.}$  – номінальна напруга тахогенератора;

$\omega_{н.т.г.}$  – номінальна кутова швидкість тахогенератора, яка визначається за формулою:

$$\omega_{н.т.г.} = \frac{\pi \cdot n_{н.т.г.}}{30}, \quad (9.6)$$

$$\omega_{н.т.г.} = \frac{3.14 \cdot 1000}{30} = 104.6 \text{ (рад/с)},$$

$$k_{тг} = \frac{200}{104.6} = 1.9.$$

Коефіцієнт дільника тахогенератора розраховується за формулою:

$$k_{д.т.г.} = \frac{10}{k_{тг} \cdot \omega_{н.т.г.}}, \quad (9.7)$$

$$k_{\text{д.т.г.}} = \frac{10}{1.9 \cdot 104.6} = 0.05.$$

## 9.2 Розрахунок задавача інтенсивності

Оцінимо наближені коефіцієнти пропорційності резисторів  $R_2, R_3$  та  $R_4$ .

$$k_m = \Delta \omega / \Delta U_{\text{вх}}, \quad (9.8)$$

де  $\Delta \omega$  – зміна регульованого параметра на певній ділянці;

$\Delta U_{\text{вх}}$  – відповідна зміна вхідної напруги.

$$k_{m1} = \frac{55}{2} = 27,5,$$

$$k_{m2} = \frac{85}{2,6} = 32,7,$$

$$k_{m3} = \frac{160}{1,1} = 145.$$

В разі ступінчатої подачі на задавач інтенсивності 5,7 (В) до роботи одночасно підключаються всі резистори  $R_2, R_3$  та  $R_4$ . Припускаючи паралельне з'єднання з еквівалентним опором  $R_{\text{третього}} = 0,5$  (кОм), паралельний опір резисторів  $R_2, R_3$  визначається за виразом:

$$R_{\text{другого}} = n_1 \cdot R_{\text{третього}}, \quad (9.9)$$

де

$$n_1 = \frac{k_{\text{т3}}}{k_{\text{т2}}}, \quad (9.10)$$

$$n_1 = \frac{145}{32,7} = 3,33,$$

$$R_{\text{другого}} = 3,33 \cdot 0,5 = 1,665 \text{ (кОм)}.$$

Знайдемо величину опору  $R_2$ :

$$R_2 = n_2 \cdot R_{\text{другого}}, \quad (9.11)$$

де

$$n_2 = \frac{k_{T2}}{k_{T1}}, \quad (9.12)$$

$$n_2 = \frac{32,7}{27,5} = 1,18,$$

$$R_2 = 1,18 \cdot 1,665 = 1,96 \text{ (кОм)}.$$

Вибираємо із ряду резисторів стандартний номінал  $R_2 = 1,8 \text{ (кОм)}$ .

$$R_{\text{другого}} = \frac{R_2}{n_2}, \quad (9.13)$$

$$R_{\text{другого}} = \frac{1,8}{1,18} = 1,52 \text{ (кОм)}.$$

Знайдемо величину опору  $R_3$ :

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_{\text{другого}}}{(R_2 + R_{\text{другого}})}, \quad (9.14)$$

$$R_3 = \frac{1,8 \cdot 1,52}{1,8 + 1,52} = 0,82 \text{ (кОм)}.$$

Вибираємо із ряду резисторів стандартний номінал  $R_3 = 1 \text{ (кОм)}$ .

Знайдемо величину опору  $R_4$ :

$$R_4 = \frac{R_{\text{другого}} \cdot R_{\text{третього}}}{R_{\text{другого}} + R_{\text{третього}}}, \quad (9.15)$$

$$R_4 = 0,79 \text{ (кОм)}.$$

Вибираємо із ряду резисторів стандартний номінал  $R_4 = 1 \text{ (кОм)}$ .

По отриманих номіналах резисторів порахуємо їх загальний опір:

$$R_{\text{заг}} = R_2 + R_3 + R_4, \quad (9.16)$$

$$R_{\text{заг}} = 3,8 \text{ (кОм)}.$$

Визначимо величину ємності конденсатора в зворотному зв'язку операційного підсилювача із умови:

$$R_{\text{заг}} \cdot C = 2 \text{ (сек)}, \quad (9.17)$$

$$C = \frac{2}{R_{\text{заг}}},$$

$$C = \frac{2}{3,8} = 526 \text{ (мкФ)}.$$

Вибираємо з ряду конденсаторів стандартний номінал  $C = 560 \text{ (мкФ)}$ .

Величина резистора  $R_1$  і типи стабілітронів залежать від вихідної напруги трансформатора  $U_{\text{вих}} = 10 \text{ (В)}$ , при вхідній напрузі  $U_{\text{вх}} = 220 \text{ (В)}$ .

Коефіцієнт трансформації:

$$k_{\text{тр}} = \frac{10}{220} = 0,045. \quad (9.18)$$

Вибираємо випрямляючий діод Д12А з наступними параметрами:  $I_{\text{пр}} = 100 \text{ (мА)}$ ,  $U_{\text{пр}} = 1 \text{ (В)}$ ,  $U_{\text{зв}} = 50 \text{ (В)}$ .

### 9.3 Розрахунок параметрів регулятора струму

Триканальний замкнутий контур регулювання фазних струмів статора призначений для відробітку задаючих впливів на трифазні струму статора. В структурній схемі одного контура регулювання фазного струму представленої на рисунку 9.1, використовуються наступні позначення: РФС – регулятор фазних струмів ; ПЧ – перетворювач частоти; Статор АД – фазна обмотка статора.

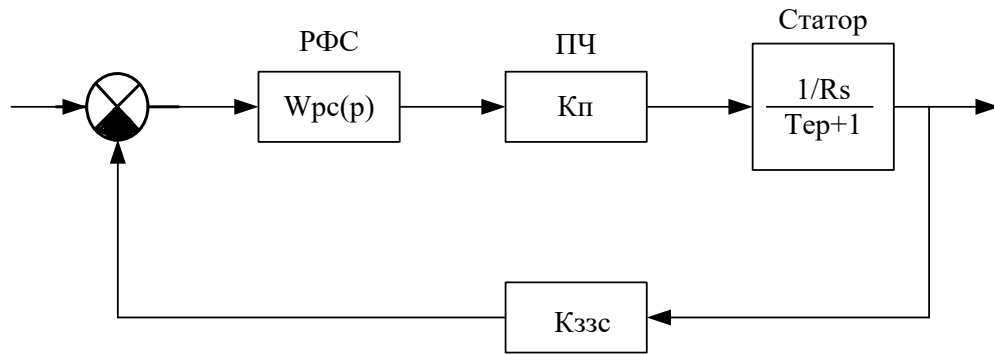


Рисунок 9.1 – Структурна схема контуру регулювання струму статора

Регулятор струму пропорційний з коефіцієнтом пропорційності  $K_{pc}$ .

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом:

$$K_{ззс} = \frac{U_{зад}}{I_{max}}, \quad (9.19)$$

де  $I_{max}$  – максимально допустимий струм:

$$I_{max} = \frac{U_n}{R_c}, \quad (9.20)$$

$$I_{max} = \frac{380}{0,124} = 3064,5 \text{ (A)}.$$

Передаточна функція двигуна:

$$W_d(p) = \frac{\beta / T_e p + 1}{1 + \beta / (T_e p + 1) \cdot 1 / J_d \cdot p}, \quad (9.21)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт жорсткості двигуна;

$T_e$  – стала часу асинхронного двигуна.

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (9.22)$$

$$T_e = \frac{1}{103.4 \cdot 0.057} = 0.16.$$

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (9.23)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 1378.1}{103.4 \cdot 0.057} = 467.64.$$

Передаточна функція системи:

$$W(p) = W_d(p) \cdot W_{пч}(p) \cdot \kappa_{ззс} \cdot \frac{2\pi}{p}, \quad (9.24)$$

де  $W_{пч}(p)$  – передаточна функція перетворювача частоти.

$$W_{пч}(p) = \frac{\kappa_{пч}}{1 + T_{пч}p}, \quad (9.25)$$

де  $\kappa_{пч}$  – коефіцієнт перетворювача частоти ( $\kappa_{пч}=5$ );

$T_{пч}$  – мала стала часу перетворювача частоти ( $T_{пч}=0.01$ ).

Оптимізуємо систему за симетричним критерієм оптимальності:

$$W_0(p) = \frac{1}{2T_0p(T_0p + 1)}. \quad (9.26)$$

Передаточна функція регулятора оптимізована за критерієм оптимальності:

$$R_c(p) = \frac{W_0(p)}{W_d(p)}, \quad (9.27)$$

$$R_c(p) = \frac{305}{p^2} + \frac{26.1}{p} + 0.331.$$

Фільтр у колі зворотного зв'язку за струмом проектується на основі заздалегідь заданої граничної частоти смуги пропускання  $\omega_g = 500 \text{ с}^{-1}$  та вибраного значення ємності  $C_{\phi c} = 1 \text{ мкФ}$ . У даному випадку в колі зворотного зв'язку за струмом застосовується фільтр першого порядку, стала часу якого визначається як:

$$T_{\phi c} = \frac{1}{\omega_g}, \quad (9.28)$$

$$T_{\phi c} = \frac{1}{500} = 0.002.$$

Опір фільтра в колі зворотного зв'язку за струмом:

$$R_{\phi c} = \frac{1}{\omega_g \cdot C_{\phi c}}, \quad (9.29)$$



$$R_{\text{фс}} = \frac{1}{500 \cdot 10^{-6}} = 0.002 \text{ (Ом)}.$$

#### 9.4 Розрахунок параметрів регулятора швидкості

При синтезі регулятора швидкості іннерційністю контурів регулювання струму можна знехтувати, якщо забезпечити рознесення контурів пропускання (рис. 9.2):

$$\Omega_{\text{крш}} \ll \Omega_{\text{крс}} \quad (9.30)$$

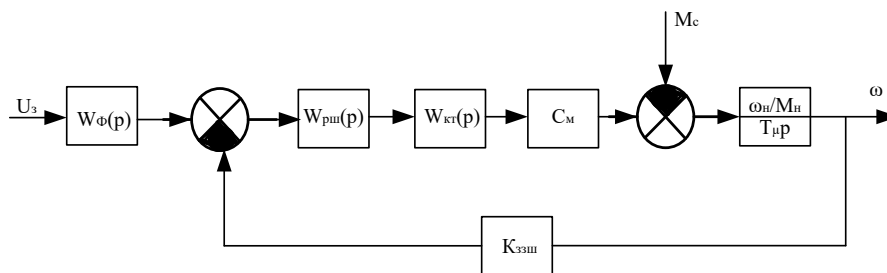


Рисунок 9.2 – Структурна схема контуру регулювання швидкості

На схемі позначено:

$T_{\text{м}}$  – механічна постійна часу;

$W_{\text{кс}}(p)$  – передаточна функція контуру струму;

$C_{\text{м}}$  – коефіцієнт пропорційності між струмом статора і моментом двигуна;

$K_{\text{ззш}}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю.

$$T_{\text{м}} = J \cdot \frac{\omega_{\text{н}}}{M_{\text{н}}}, \quad (9.31)$$

$$T_{\text{м}} = 0.92 \cdot \frac{103.4}{290.13} = 0.32,$$

$$C_{\text{м}} = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}, \quad (9.32)$$

$$C_{\text{м}} = \frac{290.13}{91} = 3.18,$$

$$K_{\text{ззш}} = \frac{U_3}{\omega_0}, \quad (9.33)$$

$$K_{\text{ззш}} = \frac{10}{103.4} = 0.096.$$

Для компенсації на вході системи встановлюється аперіодичний фільтр з передаточною функцією:

$$W_f(p) = \frac{1}{4 \cdot T_\mu p + 1}, \quad (9.34)$$

Передаточна функція двигуна має вигляд:

$$W_d(p) = \frac{\beta}{(T_e p + 1)J_d}, \quad (9.35)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт жорсткості двигуна;

$T_e$  – стала часу асинхронного двигуна.

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (9.36)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot 1378.1}{103.4 \cdot 0.057} = 467.64,$$

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_k}, \quad (9.37)$$

$$T_e = \frac{1}{103.4 \cdot 0.057} = 0.16. \quad (9.38)$$

Передаточна функція двигуна огорнена зворотним зв'язком:

$$W_{d1}(p) = \frac{W_d(p)}{1 + W_d(p)}, \quad (9.39)$$

Передаточна функція замкнутої системи огорненої одиничним зв'язком:

$$W(p) = W_{d1}(p) \cdot W_{\text{пч}}(p) \cdot K_{\text{ззш}} \cdot \frac{2\pi}{p}, \quad (9.40)$$

де  $W_{\text{пч}}(p)$  – передаточна функція перетворювача частоти.

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{K_{\text{пч}}}{1 + T_{\text{пч}} p}, \quad (9.41)$$

де  $K_{\text{пч}}$  – коефіцієнт перетворювача частоти ( $K_{\text{пч}}=5$ );

$T_{\text{пч}}$  – мала стала часу перетворювача частоти ( $T_{\text{пч}}=0.01$ ).

Оптимізуємо систему за симетричним критерієм оптимальності:

$$W_0(p) = \frac{1}{2T_0 p(T_0 p + 1)}, \quad (9.42)$$

Передаюча функція регулятора оптимізована за критерієм оптимальності:

$$R_{ш}(p) = \frac{W_0(p)}{W_{д1}(p)}, \quad (9.43)$$

$$R_{ш}(p) = 0.497p + \frac{45.8}{p} + 3.92.$$

Фільтр в колі зворотного зв'язку за швидкістю вибираємо таким же, як і в колі зворотного зв'язку за струмом, тобто ємність фільтра  $C_{фшв} = C_{фс} = 1$  мкФ, стала часу фільтра швидкості  $T_{фшв} = T_{фс} = 0.002$  с, опір фільтра швидкості  $R_{фшв} = R_{фс} = 0.02$  Ом.

**Висновок.** У даному розділі було здійснено розрахунок та обґрунтований вибір таких ключових елементів, як тахогенератор, сенсор струму та задавач інтенсивності. Зазначені компоненти використовуються при розробці принципової електричної схеми системи.

## 10 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі модернізації та експлуатації електропривода стрічкового конвеєра.

### 10.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації

#### 10.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Електропривод приводних двигунів змінного струму стрічкового конвеєра потребує постійного обслуговування оперативно-ремонтним персоналом. Під час роботи, пов'язаної з дотиком до струмопровідних частин електродвигуна або до частин електродвигуна, що обертаються, і механізму, який вони приводять у рух, необхідно зупинити електродвигун і на його пусковому пристрої або ключі керування вивісити плакат «Не вмикати! Працюють люди» [18, 19].

Під час роботи на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в РУ. Під час роботи на електродвигуні напругою до 1000 В або механізмі, який приводиться ним у рух, зняття напруги і заземлення струмопровідних жил кабелю слід виконувати згідно з вимогами.

Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів і вентиляторів, якщо можливе обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, слід зачинити і замкнути на замок засувки і шибери цих механізмів, а також вжити заходів щодо гальмування роторів електродвигунів.

Забороняється знімати огороження тих частин електродвигунів, що обертаються, під час їх роботи. Обслуговувати щітковий апарат електродвигуна, що працює, допускається одноособово оперативному працівнику або виділеному для цього навченому працівнику з групою III. В цьому разі необхідно дотримуватися таких заходів безпеки:

- працювати в головному уборі і застебнутому спецодязі, остерігаючись захвату його частинами машини, що обертаються;
- користуватися діелектричним взуттям або гумовими килимками;
- не торкатися руками одночасно до струмопровідних частин двох полюсів або струмопровідних і заземлених частин.

Кільця ротора допускається шліфувати на електродвигуні, що обертається, лише за допомогою колодок з ізоляційного матеріалу, із застосуванням захисних окулярів. Під час роботи на електродвигуні заземлення може бути встановлене на будь-якій ділянці кабельної лінії, що з'єднує електродвигун з РУ (збіркою). Під час роботи на механізмі, не пов'язаній з доторканням до частин, що обертаються, і у випадку роз'єднання з'єднувальної муфти, заземлювати кабельну лінію не слід.

Якщо на відключеному електродвигуні роботи не провадять або їх перервано на кілька днів, то від'єднана від нього кабельна лінія має бути заземлена з боку електродвигуна. В тих випадках, коли перетин жил кабелю не дозволяє застосовувати переносні заземлення, допускається у електродвигунів напругою до 1000 В заземлювати кабельну лінію мідним провідником, перетином не меншим від перетину з жили кабелю, чи з'єднувати між собою жили кабелю та ізолювати їх. Таке заземлення і з'єднання жил кабелю слід враховувати в оперативному журналі нарівні з переносним заземленням.

На однотипних або близьких за габаритом електродвигунах, встановлених поряд з тим, на якому провадять роботи, слід вивісити плакати «Стій! Напруга» незалежно від того, перебувають вони в роботі чи у резерві.

Випробування електродвигуна спільно з виконавчим механізмом слід провадити з дозволу начальника зміни технологічного цеху, в якому вони встановлені.

Під час видавання дозволу робиться запис в оперативному журналі технологічного цеху, а про отримання цього дозволу – в оперативному журналі цеху (ділянки), що провадить випробування.

Ремонт і налагоджування електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконавчим механізмом, регулювальних органів і запірної арматури, можна проводити за розпорядженням. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на виведення електроприводу в ремонт, налагодження. Про це слід зробити запис під час оформлення розпорядження.

Вмикання електродвигуна для випробування до повного закінчення роботи здійснюється після виведення бригади з робочого місця. Після випробування провадиться повторний допуск з оформленням у наряді. Під час виконання роботи за розпорядженням на повторний допуск розпорядження дається знову.

#### 10.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання ліфтів і системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 x 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Відповідно з ГОСТ 12.1.013-78 умови праці за ступенем небезпеки ураження працівників електричним струмом є умовами з підвищеною небезпекою, тому що підлога у приміщеннях, що реконструюються та будуються, є струмопровідною.

Згідно із ГОСТ 12.1.030-81, в якості захисту від ураження людей електричним струмом застосовується заземлення. Крім того безпека експлуатації при нормальному режимі роботи забезпечується застосуванням ізолювальних пристроїв, огороженням струмоведучих частин, використанням малих напруг. Особи, що обслуговують електроустановки повинні користуватися ЗІЗ – спецвзуття, рукавиці. Засоби захисту необхідно періодично випробувати, їх потрібно захищати від механічних пошкоджень, впливу факторів, що погіршують їх діелектричні властивості.

В установках напругою до 1 кВ огороження роблять суцільними. Безпечні відстані між огороженнями і не ізольованими струмоведучими частинами регламентується ПУЕ і в установках до 1 кВ із суцільними огороженнями – 5 см. Висота розміщення не огорожених струмоведучих частин залежить від значення напруги і рівня підготовки людей, що працюють з

електроустаткуванням. Струмоведучі частини напругою до 1 кВ у місцях, де працюють люди, висота розміщення повинна бути не менше 3,5 м. Постійний контроль за ізоляцією, тому що протягом часу відбувається старіння ізоляції, що може привести до пробігу і створити небезпеку при дотику людини до ізольованих проводів.

## 10.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

### 10.2.1 Мікроклімат виробничого приміщення

Оперативно-ремонтні з обслуговування приводного двигуна змінного струму відносяться до категорії Пб по важкості праці [20]. Енерговитрати за цією категорією становлять – до 140-174Вт. Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Допустимі норми параметрів повітря

| Період року | Категорія робіт | Температура, °С<br>Допустима |            | Відносна вологість | Швидкість руху, X |
|-------------|-----------------|------------------------------|------------|--------------------|-------------------|
|             |                 | Верхня межа                  | Нижня межа | Допустима          | Допустима         |
| Холодний    | Пб              | 20-24                        | 17-25      | 75                 | не більше 0,2     |
| Теплий      |                 | 21-28                        | 19-30      | 55 при 27 °С       | 0,1-0,3           |

### 10.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м<sup>3</sup> [20].

При здійсненні монтажних робіт виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні в приміщення може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при оздоблювальних технологічних процесах в будівництві, що знаходяться в повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно наведено в таблиці 10.2.

Таблиця 10.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні для обслуговуючого персоналу

| Назва речовини | ГДК, мг/м <sup>3</sup> |                 | Клас небезпечності |
|----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
|                | Максимально разова     | Середньо добова |                    |
| Пил            | 0,5                    | 0,15            | 4                  |

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ДСН [7] проектом передбачені наступні рішення [21]: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на дільницях біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану і неорганізовану.

### 10.2.3 Виробниче освітлення

При поганому освітленні зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. 5% травм можна пояснити недостатнім освітленням, у 20% випадків воно сприяло їх появі. Погане освітлення може призвести до професійних захворювань: погіршують загальне самопочуття, зменшують фізичну і розумову працездатність. Характеристика зорових робіт – середньої точності [22]. Відповідно з ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в табл. 10.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом



використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів).

Таблиця 10.3 – Вимоги до освітлення приміщень підприємств

| Харак-ка зорової роботи | Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм | Розряд зорової роботи | Під-розряд зорової роботи | Контраст об'єкта з фоном | Характеристика фону     | Штучне при системі комбінованого освітлення |                        | Природне Ен пр | Сумісне Е сум |
|-------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|------------------------|----------------|---------------|
|                         |                                                            |                       |                           |                          |                         | всього                                      | у т. ч. від загального |                |               |
| Середньої точності      | Від 0,5 до 1,0 включно                                     | IV                    | в                         | малий середній великий   | світлий середній темний | 400                                         | 200                    | 4              | 2,4           |

#### 10.2.4 Виробничий шум

Під час виконання монтажних робіт виникає виробничий шум з такими характеристиками: за характером спектру – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням – механічний і гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 3.3.6.037 [23] і наведені в таблиці 10.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого двигуни будівельних машин і механізмів виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 10.4 – Допустимі рівні звукового тиску

| Робоче місце                                                                      | Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньогометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      | Рівні звукового тиску, ДБА |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----------------------------|
|                                                                                   | 31,5                                                                         | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |                            |
| На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства | 107                                                                          | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   | 80                         |

### 10.2.5 Виробничі вібрації

Вібрацією називають механічні коливання пружних тіл або систем, коли відбувається переміщення центра їх ваги в просторі відносно статичного стану. Загальна вібрація передається на тіло через опорні поверхні людини, що стоїть чи сидить (підшви ніг або сидниці).

Допустимі рівні загальної вібрації на постійних місцях у виробничих приміщеннях [24] наведені в таблиці 10.5.

Таблиця 10.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

| Вид вібрації                                                               | Октавні смуги з середньогометричними частотами, Гц |                   |                   |                  |                  |                  |     |     |     |      |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-----|-----|-----|------|
|                                                                            | 2                                                  | 4                 | 8                 | 16               | 31,5             | 63               | 125 | 250 | 500 | 1000 |
| Загальна вібрація:<br>На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях | <u>1,3</u><br>108                                  | <u>0,45</u><br>99 | <u>0,22</u><br>93 | <u>0,2</u><br>92 | <u>0,2</u><br>92 | <u>0,2</u><br>92 | -   | -   | -   | -    |

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с  $10^{-2}$ , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс; динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних

конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

### **10.3 Пожежна безпека**

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [25, 26]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Приміщення кар'єру, де встановлюється обладнання приводу двигунів змінного струму стрічкового конвеєра, за вибухонебезпечністю та пожежонебезпечністю відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується III ступенем вогнестійкості.

До III ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 10.6.

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [26] наведено в таблиці 10.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 10.8 (знаменник) [26].

Таблиця 10.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

| Ступінь вогнестійкості будинків | Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см) |             |                    |                                   |          |                                                                 |                                                             |                              |                          |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|
|                                 | стіни                                                                                                              |             |                    |                                   | коло-ни  | сходові площад-ки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток | пере-криття між по-верхові (у т.ч. горючі та над підва-лами | елементи суміщених покриттів |                          |
|                                 | несучі та сходових кліток                                                                                          | само-несучі | зовнішні не-несучі | внутрішні не-несучі (перегородки) |          |                                                                 |                                                             | плити, насти-ли, прого-ни    | балки, ферми, арки, рами |
| III                             | REI 120 M0                                                                                                         | REI 60 M0   | E 15 M0            | EI 15 M1                          | R 120 M0 | R 60 M0                                                         | REI 45 M1                                                   | Не нормують-ся               |                          |

Таблиця 10.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

| Протипожежні перешкоди | Типи протипожежних перешкод або їх елементів | Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах) | Тип заповнення прорізів, не нижче | Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче |
|------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Стіни                  | 3                                            | REI 45                                                              | 2                                 | 2                                         |
| Перегородки            | 2                                            | EI 15                                                               | 3                                 | 2                                         |
| Перекриття             | 3                                            | REI 45                                                              | 2                                 | 1                                         |

Таблиця 10.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративними будинками, а також до виробничих будинків і споруд

| Ступінь<br>вогнестійкості<br>будинку | Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м |      |       |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------|-------|
|                                      | I, II                                           | III  | IV, V |
| III                                  | 8/9                                             | 8/12 | 10/15 |

В приміщенні, де знаходиться обладнання приводу двигунів змінного струму стрічкового конвеєра, встановлено 5 вогнегасників ВП-5(8).

## ВИСНОВКИ

У межах бакалаврської роботи було виконано розробку електропривода для лінії стрічкового конвеєра, призначеного для транспортування карбаміду на підприємстві. Проведено комплексне дослідження роботи пересувної транспортної лінії, враховано особливості експлуатації обладнання та здійснено техніко-економічне обґрунтування вибору системи керування.

На основі порівняльного аналізу альтернативних варіантів було обґрунтовано доцільність застосування системи на базі частотного перетворювача (ПЧ) та асинхронного двигуна (АД). Проведено необхідні розрахунки: вибрано оптимальний тип двигуна, визначено його параметри, побудовано механічні та електромеханічні характеристики, а також здійснено перевірку за критеріями нагріву та пускової здатності.

Математичне моделювання системи ПЧ-АД у програмному середовищі Matlab Simulink підтвердило коректність технічних рішень: при номінальному навантаженні двигун демонструє стійку роботу, а значення швидкості та моменту на валу після короткочасного перехідного процесу досягають встановлених значень. Система характеризується низьким перерегулюванням, відсутністю коливань, високою швидкодією та стійкістю до накидів навантаження.

Розроблена система керування відповідає вимогам до роботи в умовах промислового циклу та може бути застосована для підвищення ефективності перевантажувального процесу карбаміду. Отримані результати можуть бути використані при модернізації подібних систем електроприводів на підприємствах хімічної, харчової та інших галузей промисловості.

Було також розглянуто питання з охорони праці, що мають важливе значення при впровадженні електропривода в умовах реального виробництва.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. Г. Л. Лисенко, А. Г. Буда, Р. Р. Обертюх. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 60 с.
2. Голуб А.П., Кузнєцов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992. – 352 с.
3. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепіков та ін.; За ред. П.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. - К.: Либідь, 2005. - 680 с.
4. Лавріненко Ю.М., Савченко П.І., Синявський О.Ю. Основи електропривода: підручник / Ю.М. Лавріненко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський та ін. – Київ: Ліра-К, 2017. – 524 с.
5. Зеленов А.Б., Шевченко І.С., Андреева Н.І. Синтез та цифрове моделювання систем управління електроприводів постійного струму з вентильними перетворювачами. Навч. посіб. для студ. вузів. - Алчевськ: ДГМІ, 2002. - 400 с.
6. Казачковський М. М. Комплектні електроприводи: Навчальний посібник. - Дніпропетровськ :Національний гірничий університет,2003.-226 с.
7. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. - 404 с.
8. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання. - Дніпропетровськ: НГА України, 2001. -137с.
9. Закладний О. М., Прокопенко В. В., Закладний О. О. Електропривод: навч. посіб. / О. М. Закладний, В. В. Прокопенко, О. О. Закладний. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 316 с.

10. Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2008. - 219 с.

11. Розводюк М.П., Блінкін Є.Я., В.С. Ткач. Електротехніка. Частина I. Дослідження електричних кіл. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2006. - 206 с.

12. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посіб. / За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – Київ: Либідь, 2005. – 680 с.

13. Грабко В. В., Кучерук В. Ю., Возняк О. М. Мікропроцесорні системи керування електроприводами: навч. посіб. / В. В. Грабко, В. Ю. Кучерук, О. М. Возняк. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 146 с.

14. Методичні вказівки до курсової роботи з дисципліни "Моделювання електромеханічних систем" (для студентів спеціальності 7.0922.03 "Електромеханічні системи автоматизації і електропривод") / Укл.: О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, Р.В. Федоряк, О.В. Песковатська, В.Ю. Марінічев. - Донецьк: ДонНТУ, 2002.

15. Довгань С.М. Дослідження систем електропривода методами математичного моделювання: навч. посібник / С.М. Довгань. – Дніпропетровськ: НГА України, 2001. – 137 с.

16. Коваленко І.В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: навч. посіб. / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: Норітаплюс, 2007. – 104 с.

17. Бондарєв, В. С., Дубинець, О. І., Колісник, М. П., Бондарєв, С. В., Горбатенко, Ю. П., & Барабанов, В. Я. (2009). Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підймальних і транспортувальних машин.

21. Методичні вказівки щодо виконання практичних занять з курсу «Системи керування електроприводами» (частина 2) для студентів денної форми навчання зі спеціальностей 7.092203 - «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» (у тому числі скорочений термін навчання),



7.092204 - «Електромеханічне обладнання енергоємних виробництв» / Уклад. С. А. Сергієнко, Ю. В. Зачепа, А. І. Ломонос. -Кременчук: КДПУ, 2005.

26. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму: Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2005. - 86 с.

27. MathWorks. Simulink® Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html>

28. TechInsights. Transformer Design & Data Sheets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.doble.com/product/three-phase-transformer-high-power-test-systems>.

29. Altium. Guide to Ceramic Capacitor Dielectrics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://resources.altium.com/p/guide-capacitor-dielectrics-and-ceramics>

30. Hitachi Energy. Surge Capacitors CHDSU [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hitachienergy.com/us/en/products-and-solutions/capacitors-and-filters/high-voltage-capacitors-and-filters/capacitor-units/surge-capacitors-chdsu>

31. Радіокомпоненти «RadioElektron»: тиристори, симістори та інші силові напівпровідникові прилади [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radioelektron.com.ua>

32. Радіокомпоненти «Radiokomponent»: автоматичні вимикачі, запобіжники [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiokomponent.com.ua>

33. Radiolux / RadioElektron. Запобіжники [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiolux.com.ua>

34. BEONTOP. Вимірювальні трансформатори струму та шунти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://beontop.com.ua>

35. Радіокомпоненти «Radiokomponent»: тахогенератори, електричні машини спеціального призначення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiokomponent.com.ua>

36. RadioElektron: конденсатори високої якості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radioelektron.com.ua>
37. [http://chipinfo.ru/shop/ps\\_resistors.html](http://chipinfo.ru/shop/ps_resistors.html).
38. Радіомаг «Radiolux»: каталог конденсаторів (плівкові, імпортовані) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiolux.com.ua>
39. RadioElektron. Інтегральні схеми та мікросхеми [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radioelektron.com.ua>
40. NIKOM. Маркування резисторів (опис, кольорові коди) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.nikom.biz/index.php?globo=A&lk\\_1=03](https://www.nikom.biz/index.php?globo=A&lk_1=03) (спеціальний каталог)
41. Характеристики конденсаторів постійної ємності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://veles-ua.com>
42. Radiokomponent. Маркування тиристорів (технічні дані) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiokomponent.com.ua>
43. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
44. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->
45. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=48644](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644).
46. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

47. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

48. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

49. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

50. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

51. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.

52. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.

53. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

54. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

55. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.

56. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_36/5-1-0-1759](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).

57. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: [http://www.poliplast.ua/doc/dbn\\_v.1.1-7-2002.pdf](http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf).

58. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

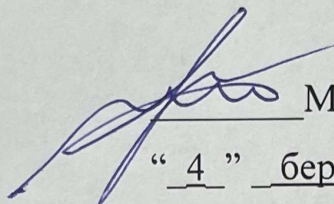
## Додаток А

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ  
« 4 » березня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

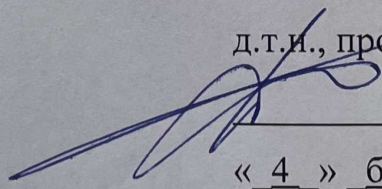
на бакалаврську кваліфікаційну роботу

**МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА  
СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА**

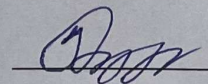
08-24. БКР.005.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф. каф. КЕМСК

 Володимир ГРАБКО  
« 4 » березня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

 Максим ВЛАСЮК  
« 4 » березня 2025 р.



## **1 Загальні відомості**

Повне найменування розробки – «Модернізація системи керування електропривода стрічкового конвеєра».

Скорочене найменування розробки – «Електропривод конвеєра».

Замовник – кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

## **2 Підстави для розробки**

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

## **3 Призначення розробки і галузь використання**

Електропривод транспортної пересувної лінії призначений для транспортування насипних і штучних вантажів.

## **4 Вимоги до розробки**

Електропривод транспортної пересувної лінії повинен забезпечувати надійну роботу в тривалому режимі роботи.

## **5 Комплектація розробки**

Виріб складається з електродвигуна, системи керування та робочого органу.

## **6 Технічні характеристики**

Кількість двигунів – 1 шт.

## **7 Джерела розробки**

Індивідуальне завдання до бакалаврської кваліфікаційної роботи.

## **8 Елементна база**

Двигун, редуктор, приводний та натяжний барабан, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.д. різних виробників.

## **9 Конструктивне виконання**

Електропривод виготовляється окремими блоками, що реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

## **10 Показники технологічності**

Обладнання виконується на сучасній елементній базі. Його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

### **11 Етапи виконання**

| Стадії і етапи розробки | Термін виконання |
|-------------------------|------------------|
| Основна частина         | 06.05.2025       |
| Графічна частина        | 20.05.2025       |

### **12 Технічне обслуговування і ремонт**

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на півроку.

### **13 Живлення електропривода**

Живлення електропривода повинно бути виконане напругою  $\sim 380$  В від силової мережі.

**14 Порядок контролю та прийняття** Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА  
СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

## **Актуальність, мета, об'єкт та предмет роботи**

**Актуальність.** Промислові підприємства постійно підвищують вимоги до енергоефективності, надійності та автоматизації технологічних процесів. Стрічкові конвеєри, що відіграють ключову роль у транспортуванні матеріалів, на багатьох об'єктах досі оснащені застарілими релейно-контакторними системами керування, які не забезпечують гнучкого регулювання та є ненадійними в експлуатації. Сучасні частотні перетворювачі та мікропроцесорні засоби керування дозволяють реалізувати енергоефективні системи з плавним запуском, адаптацією до навантаження та підвищеним ресурсом роботи. Модернізація електроприводів на їх основі особливо актуальна для підприємств із безперервним виробничим циклом, де простої через відмови обладнання призводять до значних втрат.

Таким чином, модернізація системи керування електропривода стрічкового конвеєра є важливою та актуальною задачею.

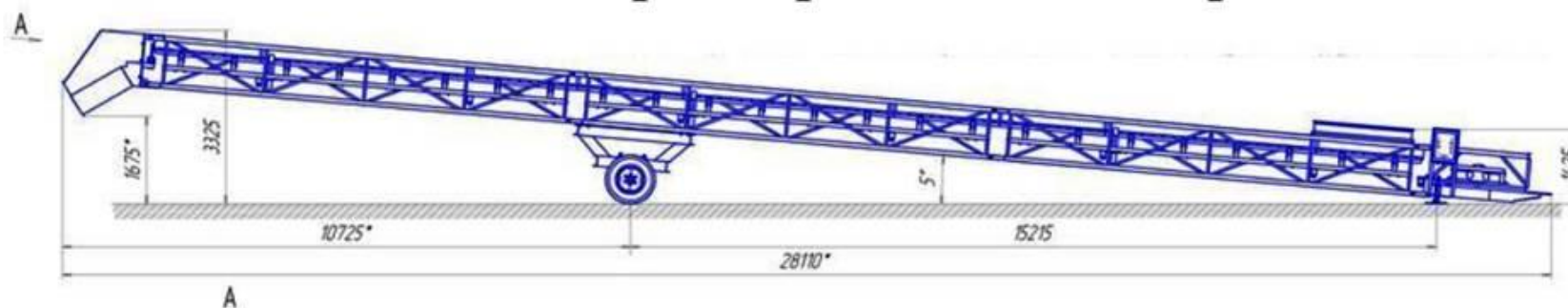
**Мета роботи.** Розробити модернізовану систему керування електроприводом стрічкового конвеєра, що забезпечить покращення техніко-економічних показників та підвищить надійність роботи технологічного обладнання..

**Об'єктом** в бакалаврській роботі є процес роботи електропривода стрічкового конвеєра в складі пересувної перевантажувальної лінії.

**Предметом** є система керування електроприводом стрічкового конвеєра.



## Вигляд і характеристик конвеєра



Загальний вигляд конвеєра

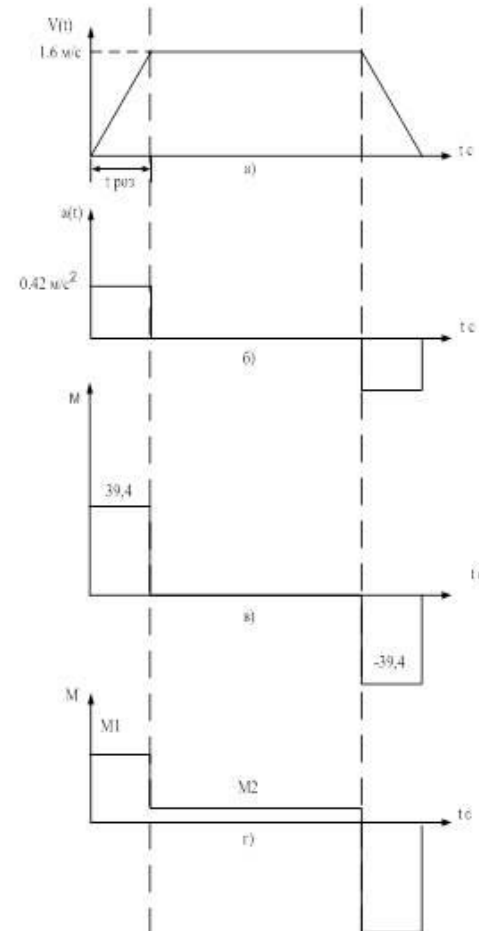
| Показник                          | Одиниця виміру   | Значення       |
|-----------------------------------|------------------|----------------|
| Ширина стрічки                    | мм.              | 800            |
| Довжина конвеєра                  | м                | 25,4           |
| Швидкість руху стрічки            | м/сек.           | 1,6            |
| Маса 1 метра стрічки              | кг/м             | 10             |
| Продуктивність                    | т/час            | 400            |
| Висота підйому                    | мм               | 5              |
| Кут обхвату прив. барабана        | град             | $\alpha_n=210$ |
| Кут обхвату натяж. барабана       | град             | $\alpha_n=180$ |
| Максимальне допустиме прискорення | м/с <sup>2</sup> | $\alpha=0,5$   |
| ККД                               |                  | 0,8            |
| Діаметр привідного барабана       | м                | $D_b=0,526$    |

Технічні характеристики конвеєра

## Кінематична схема і тахограми роботи

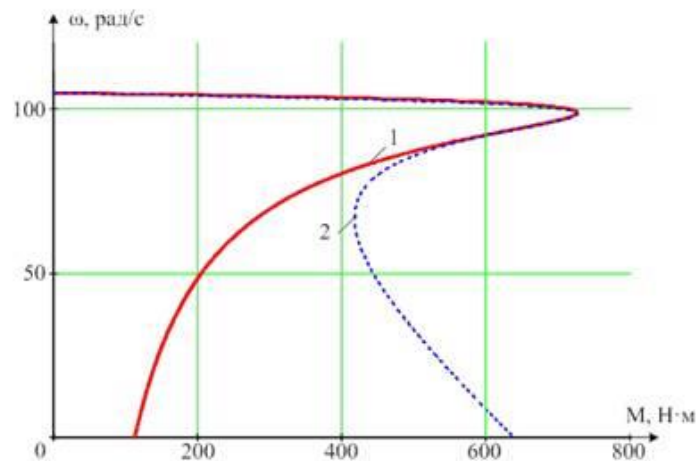


Кінематична схема приводу конвеєра

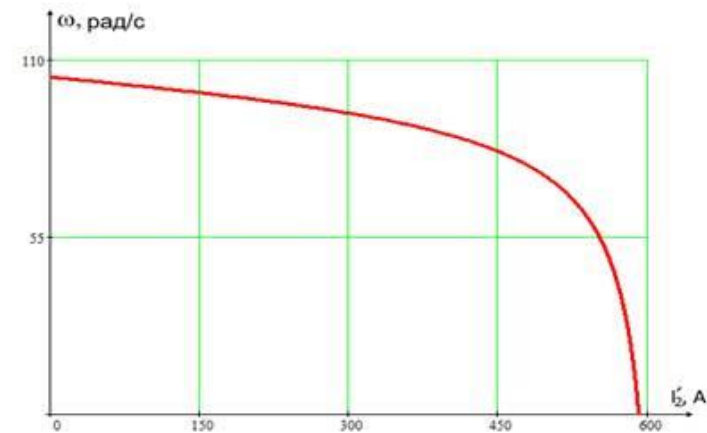


Тахограма робочого механізму:  
швидкість (а), прискорення (б),  
динамічний момент (в), сумарний момент (г)

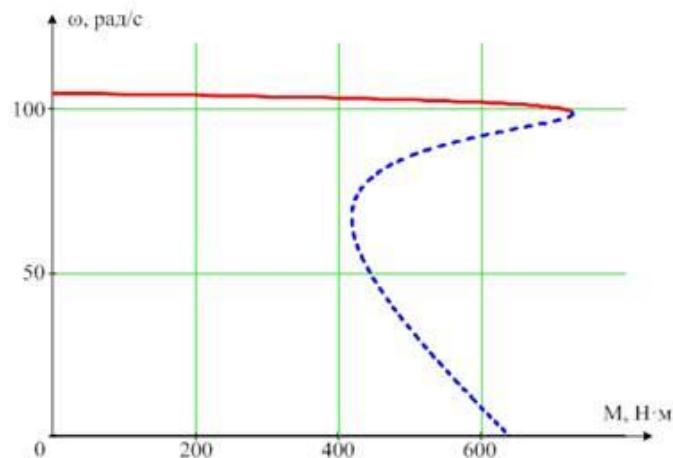
## Статичні характеристики вибраного електродвигуна



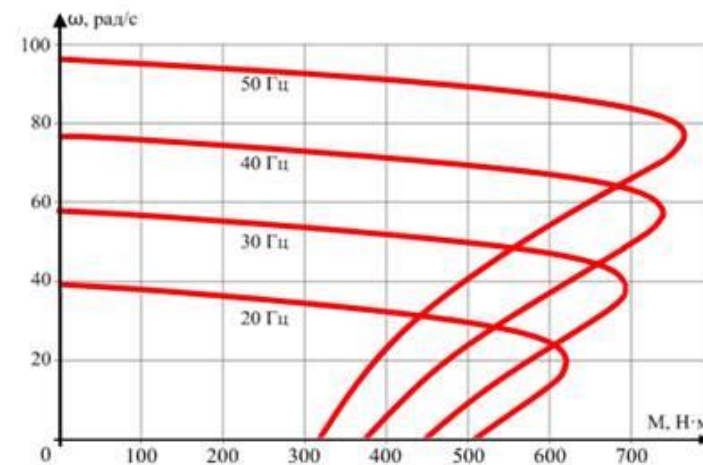
Природні механічні характеристики двигуна ВРП200L6,  
1 – за формулою Клоса, 2 – за формулою Чекунова



Електромеханічна характеристика двигуна

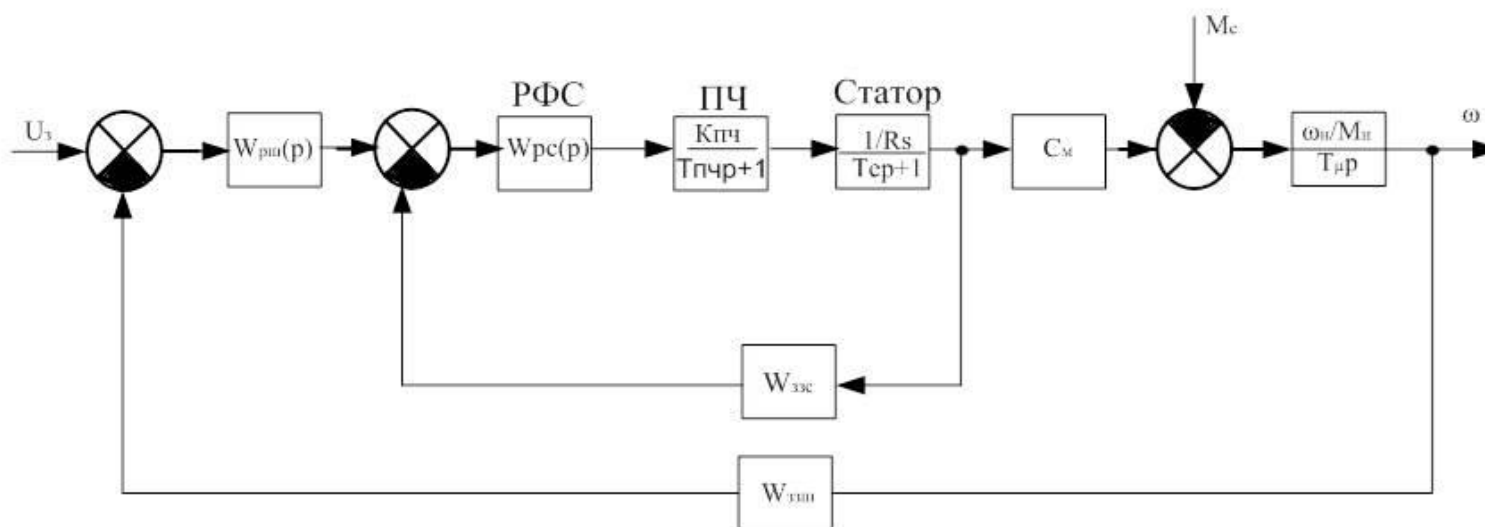


Об'єднана механічна характеристика двигуна

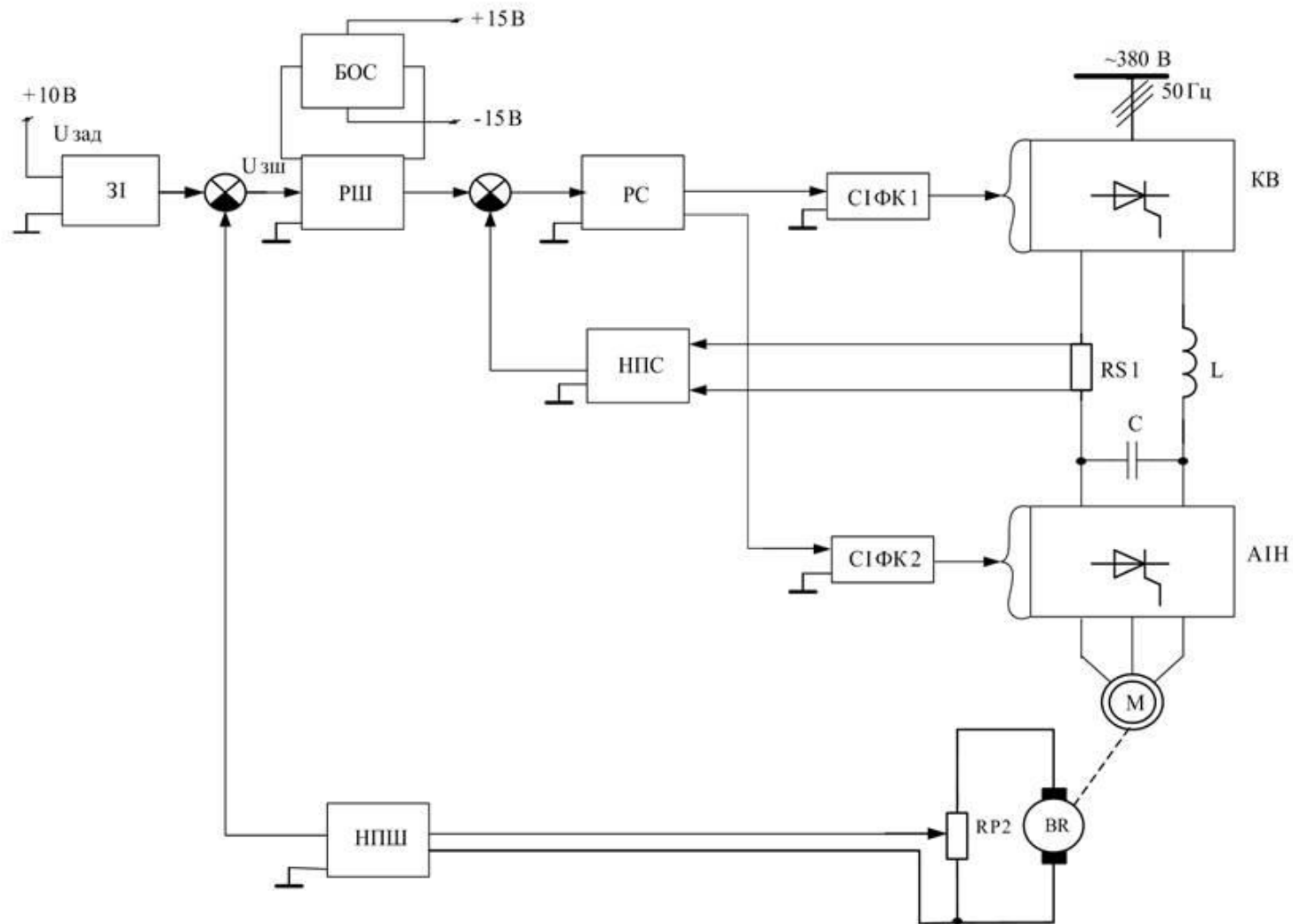


Сімейство механічних характеристик двигуна  
при частотах живлення 20-50 Гц

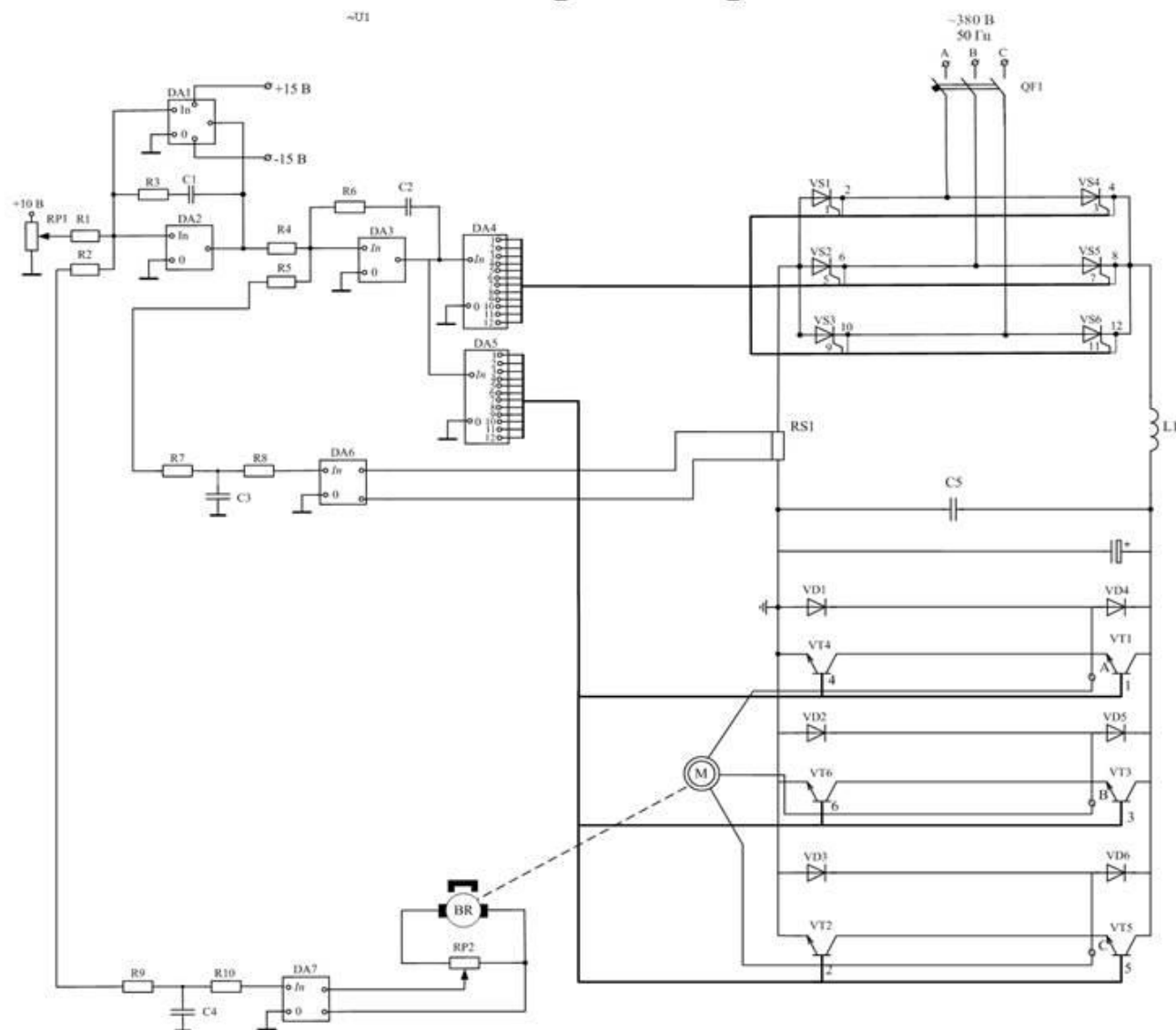
## Структурна схема системи електроприводу



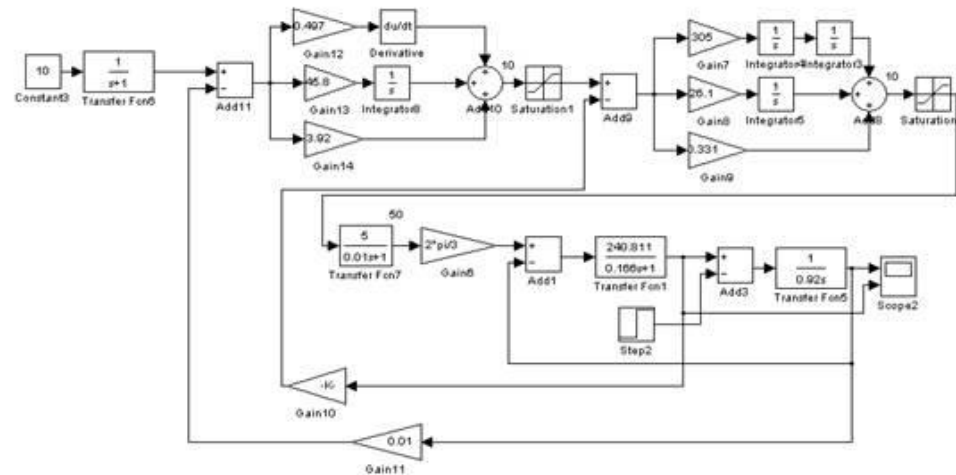
## Схема електрична функціональна



## Схема електрична принципова

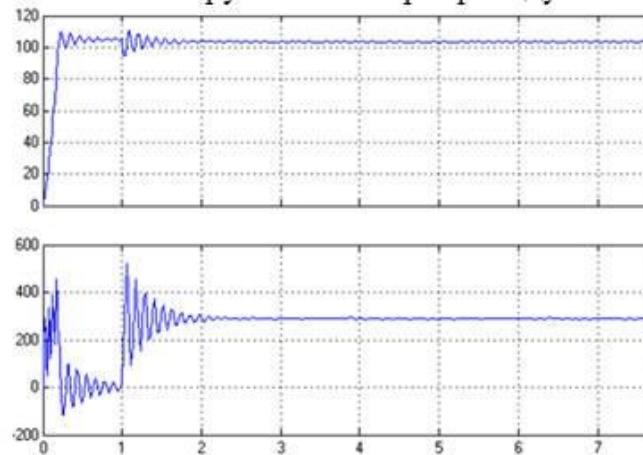


## Моделювання перехідних процесів електропривода



ulink

Модель системи керування електроприводу в Simulink



Перехідні процеси швидкості обертання та моменту  
при накиді навантаження

## Техніко-економічне обґрунтування вибору системи ЕП

| Показники                                                                                                       | Тип системи |         |          |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|----------|---------|
|                                                                                                                 | ТП-Д        | ШП-Д    | ТРН-АД   | ПЧ-АД   |
| Потужність двигуна $P_{\text{дв}}$ , кВт                                                                        | 30          |         |          |         |
| Вартість двигуна (Д), грн.                                                                                      | 29520       | 29520   | 15320    | 15320   |
| Вартість системи керування (СК), грн.                                                                           | 18700       | 17700   | 16700    | 14650   |
| Капіталовкладення $K = Д + СК$ , грн                                                                            | 48220       | 47220   | 29970    | 32020   |
| $E_a$                                                                                                           | 0.05        |         |          |         |
| Амортизаційні відрахування<br>$Ca = E_a \cdot K$ , грн.                                                         | 911         | 861     | 498,5    | 601     |
| $E_o$                                                                                                           | 0.015       |         |          |         |
| Витрати на обслуговування і ремонт<br>$Co = E_o \cdot K$ , грн.                                                 | 273,3       | 258,3   | 149,55   | 180,3   |
| Вартість електроенергії<br>$m_o$ , грн/кВт год                                                                  | 6.67        |         |          |         |
| Коефіцієнт завантаження $k_z$                                                                                   | 0.57        |         |          |         |
| Річний час роботи $T_p$ , год                                                                                   | 2016        |         |          |         |
| ККД $\eta_{\Sigma}$ %                                                                                           | 30          |         |          |         |
| Коефіцієнт енергозатрат $k_e$                                                                                   | 0.50        | 0.60    | 0.45     | 1.1     |
| Втрати потужності<br>$\Delta P = k_z \cdot P_{\text{дв}} \cdot (1 - \eta_{\Sigma}) / (\eta_{\Sigma} \cdot k_e)$ | 3,38        | 2,81    | 3,75     | 1,53    |
| Кількість втраченої електроенергії за рік<br>$\Delta W = \Delta P \cdot T_p$                                    | 7306        | 6088    | 8117     | 3320    |
| Витрати на електроенергію<br>$C_{\Delta W} = m_o \cdot \Delta W$                                                | 4968        | 4140    | 5520     | 2258    |
| Собівартість<br>$C = Ca + Co + C_{\Delta W}$ , грн.                                                             | 6152,3      | 5259,3  | 6168,05  | 3039,3  |
| Нормативний коефіцієнт економічної ефективності $E_n$                                                           | 0,12        |         |          |         |
| Зведені витрати<br>$Z = E_n \cdot K + C$ , грн.                                                                 | 18338,7     | 17325,7 | 17364,45 | 14481,7 |



## **Висновки і результати роботи**

- Розроблено систему електроприводу стрічкового конвеєра для транспортування карбаміду.
- Обґрунтовано вибір системи керування на базі ПЧ-АД.
- Проведено розрахунки параметрів електропривода та його характеристик.
- Моделювання в Matlab/Simulink підтвердило ефективність і стабільність роботи системи.
- Запропоноване рішення забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості та надійність при навантаженнях.
- Розглянуто заходи з охорони праці під час впровадження обладнання.
- Отримані результати можуть бути використані для модернізації аналогічних промислових систем.

# ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Модернізація системи керування електропривода стрічкового конвеєра

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 6,34 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Гарант ОП

Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Грабко В.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Власюк М.С.

(прізвище, ініціали)



[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------|------|---------------|-------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|--|--|--|--|--|--|--|
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Зм.       | Арк. | № докумен.    | Підпис      | Дата     |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Розробив: |      | Власюк М.С.   | [Signature] | 20.05    |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Перевірів |      | Грабко В.В.   | [Signature] | 20.05    |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Т. контр. |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Рецензент |      | Баденько О.В. | [Signature] | 20.05    |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Норм.кон. |      | Галайчук Л.   | [Signature] | 20.05.08 |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
| Затверд.  |      | Мошноріз М.М. | [Signature] | 20.05.08 |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          | <div style="text-align: center;"> <p>08-24. БКР.005.00.000</p> <hr/> <p>Модернізація системи керування<br/>електропривода стрічкового конвеєра</p> </div> |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          | Літ.                                                                                                                                                      | Маса      | Масштаб |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          |                                                                                                                                                           |           |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          | Аркуш 1                                                                                                                                                   | Аркушів 1 |         |  |  |  |  |  |  |  |
|           |      |               |             |          | ВНТУ, гр. ЕМСА-216                                                                                                                                        |           |         |  |  |  |  |  |  |  |