

Мандзій Віталій Русланович

Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом  
неперервно-циклічного дозування сипучих сумішей

Керівник: доц. Чихіра І.В.

Development and study of an automatic control system for granular mixtures  
continuous-cyclic dosing

**АНОТАЦІЯ**

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини роботи становить \_\_\_ слайдів.

Об'єм пояснювальної записки складає \_\_\_ друкованих сторінок формату А4 (210×297), об'єм додатків – \_\_\_ друкованих сторінок формату А4.

Робота складається з шести розділів, в яких нараховується \_\_\_ рисунків та \_\_\_ таблиць з даними.

В роботі використано \_\_\_ літературних джерел.

У роботі розроблено автоматизовану систему керування процесом неперервно-циклічного дозування сипучих сумішей. Була спроектована автоматизована автономна система, а саме проведено розробку функціональних схем, схем зовнішніх підключень, креслення управління, розробка програмного забезпечення, докладний опис програмного забезпечення, його функціоналу, підбір обладнання для системи, розрахунок його споживаної потужності. Також приведено зображення схем дозування сипучих сумішей, структурної схеми системи, блок-схеми програмного забезпечення.

Також в даній роботі розглянуто існуючі системи керування процесом неперервно-циклічного дозування сипучих сумішей. Розроблено імітаційну модель автоматичної системи дозування сипких матеріалів. Проведено тестування і визначено результати дозування певної ваги матеріалу з ПІ-регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості та зроблено порівняння між ними

Ключові слова: ДОЗУВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, ПРОЦЕС, СИПУЧІ МАТЕРІАЛИ, СУМІШ.

**ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b> .....	<b>4</b>
<b>1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА</b> .....	<b>6</b>
1.1. Автоматизована система дозування компонентів будівельних сумішей.....	6
1.2. Автоматизована система дозування сипких матеріалів в сільському господарстві .....	10
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Розрахунки та аналітика</b> .....	<b>14</b>
2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД.....	14
2.3 Побудова механічних та електромеханічних характеристик АД.....	19
2.4 Вибір додаткового обладнання.....	21
2.5 Розрахунок інвертора.....	23
2.6 Розрахунок випрямляча .....	25
<b>3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b> .....	<b>27</b>
3.1 Вибір захисних апаратів для двигуна .....	27
3.2 Вибір електромагнітного пускача .....	28
3.3 Модуль мікроконтролера RTU 188BS.....	29
3.4 Модуль релейного комутації TBR8.....	31
3.5 Тензодатчик серії С .....	36
3.6 Оптимізація контуру швидкості .....	37
3.7 Синтез регулятора швидкості на модульній оптимум .....	38
3.8 Оптимізація контуру ваги.....	38
3.9 Розробка імітаційної моделі автоматичної системи дозування сипких матеріалів .....	41
<b>4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА</b> .....	<b>45</b>
4.1 Результати дозування.....	45
<b>5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА</b> .....	<b>49</b>
5.1. Розрахунок статичних характеристик приводу при частотному.....	49
<b>6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	<b>52</b>
6.1 Система управління охороною праці на підприємстві.....	52
6.2 Основні принципи та функції управління охороною праці на виробництві .....	54
<b>ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ</b> .....	<b>58</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЯ</b> .....	<b>59</b>

## ВСТУП

Автоматизоване дозування сипучих матеріалів все ширше впроваджується в різні технологічні процеси. Збільшення обсягу застосування систем дозування обумовлюється рядом переваг цього обладнання і перш за все збільшенням якості продукції, що випускається і економією сировини .

Дозатори з автоматизованим регулюванням це механізми, які призначені для видачі потоку матеріалу з певним значенням витрат. У таких випадках, для компенсації, що виникають в процесі дозування відхилення витрат від необхідного значення застосовуються пристрої, які автоматично вимірюють інтенсивність потоку і коригують її за величиною в певних межах.

Дозатор безперервної дії (рис.1) може мати наступні функціональні елементи: 1) робочі органи, які забезпечують рух матеріалу і які визначають величину витрат; 2) первинні перетворювачі, які вимірюють витрату і перетворюють вимірювану величину в необхідні сигнали (електричні, пневматичні і т.п.); 3) передавальні ланки, служать для передачі і посилення сигналів; 4) пристрій для вироблення закону управління; 5) виконавчі механізми; 6) контрольно-вимірювальні та реєструючі прилади, які спостерігають за роботою дозаторів та реєстрацією процесу дозування; 7) допоміжні конструктивні елементи (воронки, натяжні і очисні пристрої).

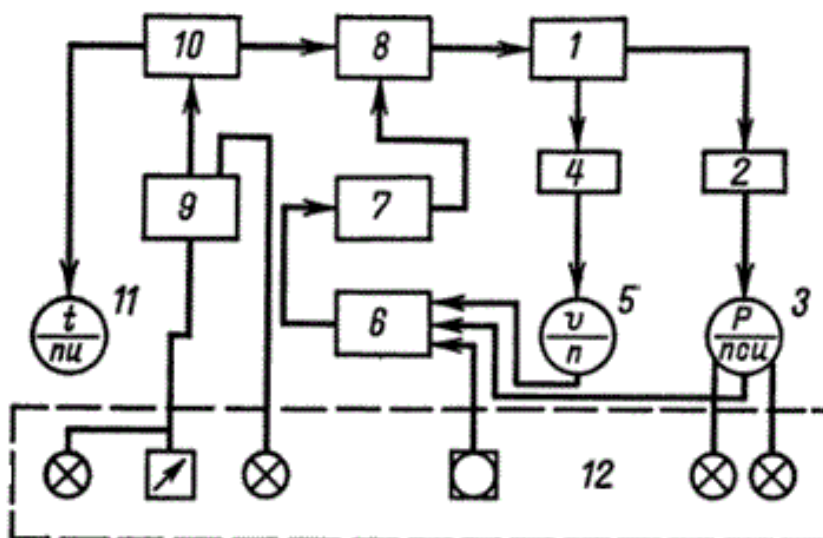


Рисунок 1 – Функціональна схема дозатора безперервної дії

# 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1. Автоматизована система дозування компонентів будівельних сумішей

Система призначена для автоматичного, напівавтоматичного і ручного управління процесом дозування компонентів будівельних сумішей з видачею на екран ПЕОМ оперативної інформації про роботу механізмів системи.

### Склад системи

#### Механічні компоненти

**Дозатор цементу.** Подача цементу в дозатор здійснюється двома шнековими живильниками, який забезпечує режим «грубо-точно». Для струшування цементу зі стінок накопичувального бункера використовуються вібратори. Вивантаження цементу з дозатора здійснюється через відкидне днище з ущільненням.

**Дозатор щебеню.** Подача щебеню в дозатор здійснюється через дозуючий пристрій, що має в своєму складі дві секторні заслінки з пневмоприводом. Стінки бункера для запобігання зносу армовані бронєю. Вивантаження щебеню з вагового бункера здійснюється через секторну заслінку.

**Дозатор піску.** Подача піску в дозатор здійснюється через дозуючий пристрій, що має в своєму складі дві секторні заслінки з пневмоприводом. Для струшування піску зі стінок завантажувального бункера використовуються пневматичні вібратори. Додатковим заходом в разі, якщо виявлено зависання піску, є повторні поворотні рухи секторної заслінки. Днище вагового бункера також здійснює повторні руху при виявленні зависання піску в бункері.

**Дозатор рідини.** Подача води і хімдобавок в дозатор здійснюється через клапанні затвори, керовані пневмоприводами. Випуск рідини з

дозатора здійснюється через клапанний затвор, що відкривається пневмоприводом.

## **Екран ПК**

Електронні компоненти

**Пост оператора.** Пост оператора складається з ПЕОМ, Терміналу дозування компонентів суміші ТДКС, пульта управління ПУ, Табло інформаційного ТІ в кількості від 3 до 6, Контролера дискретних сигналів КДС, Блоку релейного БР, Джерела безперебійного живлення ДБЖ, Щитка захисту від перенапруг з фільтром перешкод ЩЗПФ і принтера ПР.

**Пульт управління ПУ** призначений для ручного управління процесом дозування компонентів суміші. На пульті управління знаходяться перемикачі, сигнальні лампочки і кнопки управління, що забезпечують роботу оператора в ручному режимі, а також цифрові табло, які показують поточну вагу продукту в кожному з дозаторів.

**Термінал дозування компонентів суміші ТДКС** призначений для напівавтоматичного управління технологічним процесом дозування компонентів сумішей і відображення результатів на чотирьохрядкового символному РКІ. Термінал має наступні характеристики:

- Кількість каналів управління 2 – 6
- Кількість збережених рецептів, не більше 100
- Кількість збережених схилів, не більше 9000

**Табло інформаційне ТІ** призначене для відображення поточної ваги в бункері дозатора. Кількість табелів в системі дорівнює кількості дозаторів.

**Контролер дискретних сигналів КДС** призначений для прийому дискретних входних сигналів і передачі їх по інтерфейсу RS232 в ТДКС, а також для прийому від ТДКС і передачі в БР команд управління.

**Блок посилення сигналів БУС** призначений для посилення сигналів від ТДКС і комутації силових ланцюгів по командам, що надходять від КДС.

**Додаткове обладнання**

При необхідності до складу обладнання, що постачається можуть бути включені:

- вібратори електромеханічні або пневматичні – для струшування піску або цементу при їх зависанні або налипання на стінки надважкого бункера і / або дозатора
- одно і двох гвинтові шнекові живильники з двошвидкісним приводом – для регульованої подачі цементу в дозатор
- блоки підготовки повітря – для додаткового очищення повітря перед подачею його в дозатори.

### **Функції системи**

- Ведення бази даних рецептів будівельної суміші, автоматизація вибору рецепта.
- Ведення бази даних виконаних схилів за весь період функціонування системи.
- Формування звітних документів про результати роботи системи за який призначається період.
- Виконання рецептів в автоматичному режимі:
  - управління механізмами подачі компонентів суміші,
  - зважування компонентів суміші,
  - управління випускними заслінками,
  - виявлення і ліквідація зависань матеріалу в бункерах.
- Виявлення аварійних технологічних ситуацій і сигналізація про це оператору.
- Налаштування дозаторів (тарування і калібрування).
- Автоматична діагностика механізмів і електронного устаткування
- Автоматичний, напівавтоматичний і ручний режими управління дозаторами

### **Переваги застосування**



- Висока якість бетону за рахунок точного дотримання рецептури суміші;
- Висока продуктивність за рахунок автоматизації процесу дозування і призначення рецептів;
- Автоматичне фіскальне документування процесу, запобігає розкраданню матеріалів і готового розчину;
- формування, зберігання і роздрукування звітів по компонентах суміші і готового розчину за різні періоди (зміну, добу, тиждень, місяць);
- комфортні умови праці оператора

Як приклад системи дозування представлена схема установки для приготування бетону (Рис.2).

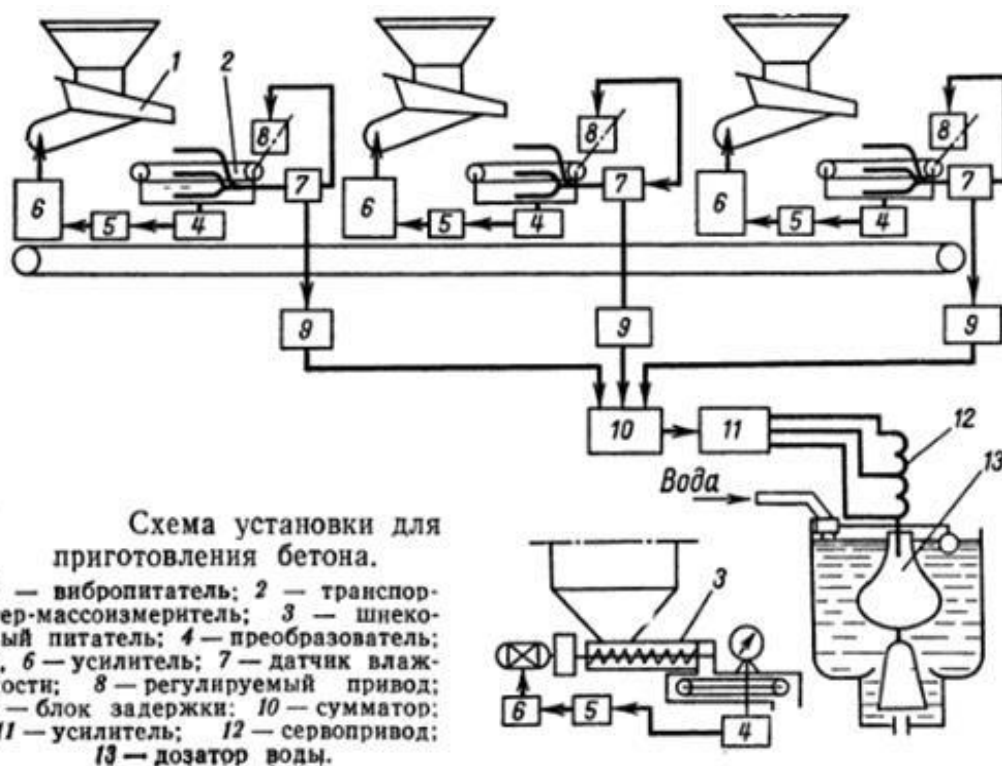


Рисунок 2—Схема установки для приготування бетону

Позначення, прийняті на Рис.2:

1 – віброживильники; 2 – транспортер-вагознімач; 3 – шнековий живильник;  
 4 – перетворювач; 5,6 – підсилювачі; 7 – датчик вологості; 8 – регульований

привід; 9 – блок затримки; 10 – суматор; 11 – підсилювач; 12 – сервопривод; 13 – дозатор.

## **1.2. Автоматизована система дозування сипких матеріалів в сільському господарстві**

Функціональна схема автоматичної системи дозування сипких матеріалів показана нижче (Рис.3). Основні складові схеми: 6 витратних бункерів (РБ), які містять дозовані компоненти (пшениця, ячмінь); 6 шнекових живильників (ШП), обладнаних асинхронними електродвигунами; бункер-дозатор вантажопідйомністю до 1000 кг, які встановлено на 3-х тензодатчиках (ТДВ); бункер-змішувач, який оснащений АТ змішувача і двигуном розпушувача; бункер відвантаження готової продукції з датчиком місткості рівня; транспортна підсистема відвантаження готової продукції .

Зернове сировина надходить в витратні бункера за допомогою автомобільного терміналу. Завантаження одного бункера ємністю 50 тонн займає не менше 3-х годин. Після завантаження витратних бункерів компоненти по черзі надходять в бункер-дозатор. У ньому відповідно до заданого рецептом здійснюється дозування. Сигнал, пропорційний поточному вазі знімається з 3 тензодатчиків і надходить в нормуючий підсилювач (НСУ), де підсумовується, нормується в стандартний струмовий сигнал і в такому вигляді надходить в контролер. Після завершення процесу дозування всіх компонентів маса направляється в бункер-змішувач. час змішування коливається від 1 до 3 хвилин в залежності від обраного рецепту. Готова суміш надходить на транспортер відвантаження готової продукції. Відвантаження готової продукції відбувається через автомобільний термінал з продуктивністю 15 тонн на годину. Управління двигунами шнекових живильників ведеться від одного перетворювача частоти (ПЧ) через блок релейного комутації (БРК1) по сигналу

мікроконтролера. Двигун змішувача (М8) і розпушувача (М9) підключаються до мережі через блок релейного комутації (БРК2), який управляється від мікроконтролера.

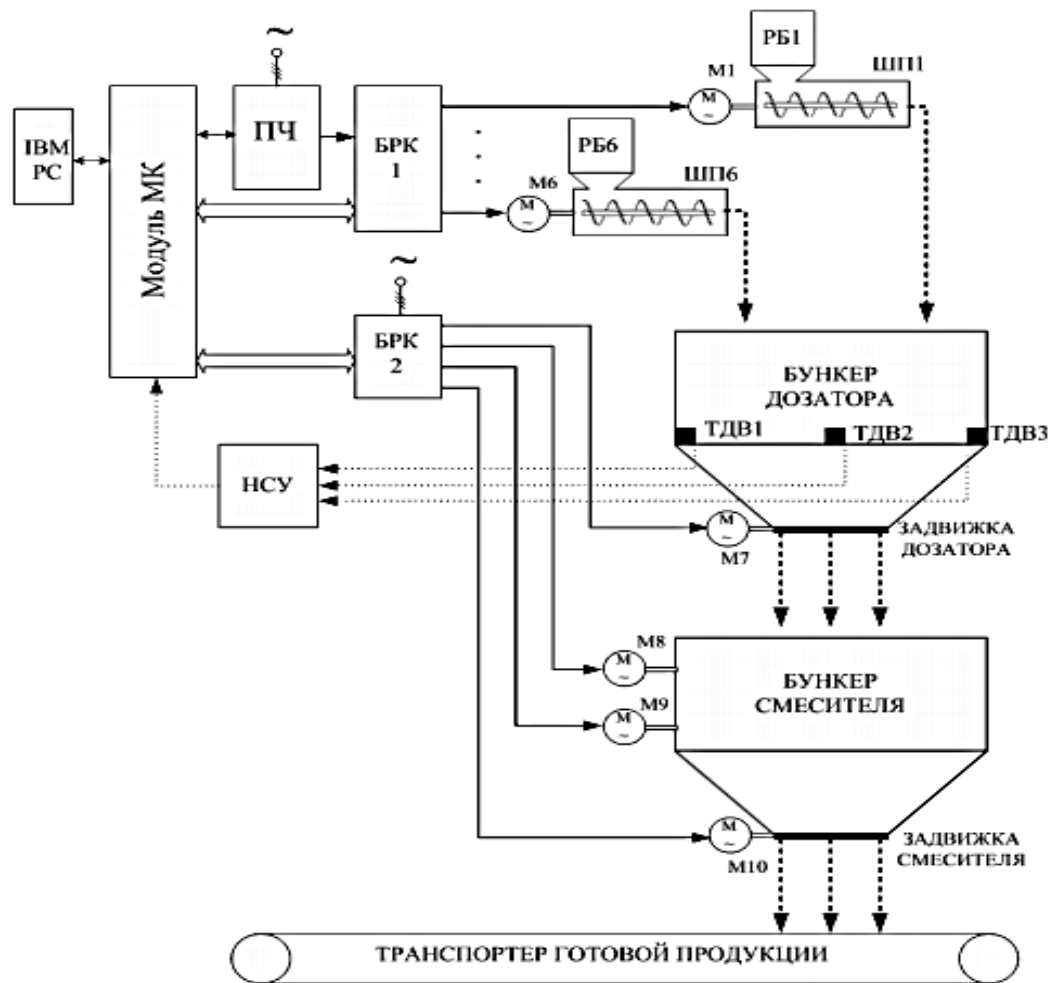


Рисунок.3 Функціональна схема автоматичної системи дозування сипучих матеріалів, що застосовується с/г

Саме цю систему розглянемо більш детально, а саме: розрахуємо параметри схеми заміщення асинхронного двигуна (АД), побудуємо всі необхідні показники, що характеризують роботу АТ, зробимо вибір і розрахунок необхідної електрообладнання, розглянемо імітаційну модель електроприводу автоматизованої системи дозування сипких матеріалів.

Об'єкт і методи дослідження  
Об'єктом дослідження є автоматизована система дозування сипких матеріалів, зображена на Рис.3.

Щоб досягти високої надійності програмно-апаратний комплекс повинен складатися не менше ніж з трьох рівнів (Рис.4). Нижчий рівень складається з датчиків і виконавчих механізмів[14] Середній рівень містить в собі керуючий контролер і модуль релейної комутації. Верхній рівень має автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора на базі ПК. Зв'язок верхнього і середнього рівнів здійснюється за допомогою інтерфейсу RS-485 на фізичному рівні і протоколом обміну, спеціально розробленим для стенду. Швидкість обміну інформацією між контролером і АРМ оператора становить 9600 бод.

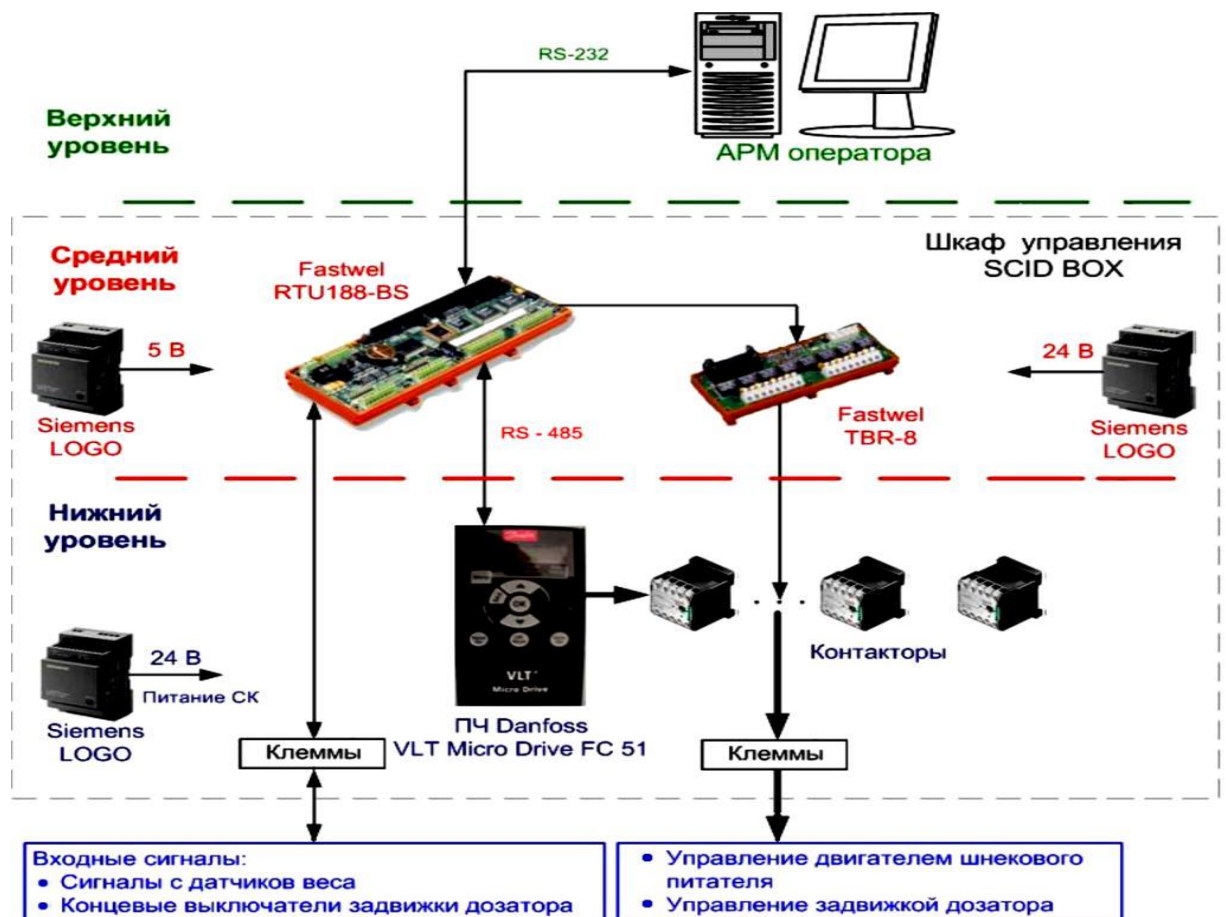


Рисунок.4 Структурна схема автоматичної системи дозування сипучих матеріалів

Технологічний процес дозування вимагає максимальну точність дозування при заданій продуктивності. На Рис.3 представлена функціональна схема асинхронного електроприводу шнекового живильника для автоматичного дозування сипких матеріалів.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розрахунки та аналітика

Для розробки автоматизованої системи дозування сипких матеріалів необхідно для початку провести розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна VTB 71C. Паспортні дані якого відображені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Паспортні дані АТ VTB 71C

Задані велечини	Умовні позначення	Одиниця виміру	Числове значення
Фазна напруга	$U_{\phi}$	<i>B</i>	220
Лінійна напруга	$U_{л}$	<i>B</i>	380
Потужність двигуна	$P_{дв}$	<i>Bт</i>	750
ККД	$\eta_{н}$	%	74
Синхронна частота обертання	$n_{с}$	<i>об/хв</i>	2810
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi$	о.е.	0,78
Номінальне ковзання	$S_{н}$	%	1,3
Кратність пускового струму	$k_i$	о.е.	6
Кратність пускового моменту	$k_{п}$	о.е.	2,6
Кратність максимального моменту	$k_{max}$	о.е.	2,7
Кратність мінімального моменту	$k_{min}$	о.е.	1,6
Коефіцієнт завантаження двигуна	$p_{жс}$	о.е.	0,75
Число пар полюсів	$p$	-	1
Частота мережі	$f$	<i>Гц</i>	50
Число фаз двигуна	$m$	-	3

### 2.2 Визначення параметрів схеми заміщення АД

Синхронна кутова швидкість обертання двигуна:

$$\omega_c = \frac{\pi \cdot n_c}{30} = \frac{3,14 \cdot 2810}{30} = 294,263 \text{ рад / с}$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot n_c = (1 - 0,013) \cdot 2810 = 2773 \text{ об / мин}$$

Номинальна кутова швидкість:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot \omega_c = (1 - 0,013) \cdot 294,263 = 290,437 \text{ рад / с}$$

Номинальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв}}}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{750}{290,437} = 2,582 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тоді номінальний фазний струм:

$$I_{\text{фн}} = \frac{P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{750}{3 \cdot 220 \cdot 0,78 \cdot 0,74} = 1,969 \text{ А}$$

Для розрахунків статичних і динамічних характеристик асинхронного двигуна знайдемо параметри схеми заміщення. Т - подібна схема заміщення асинхронного двигуна для однієї фази приведена на Рис.2.1

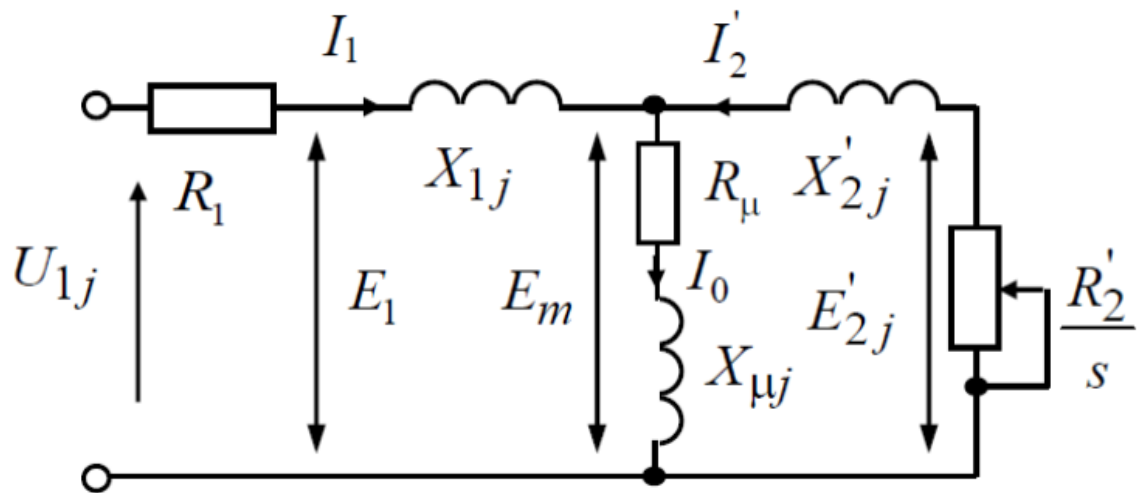


Рисунок 2.1 - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

АТ проектується таким чином, що найбільший ККД досягається при завантаженні на 10 - 15% менше номінальної. Коефіцієнт потужності при навантаженні рівній значно відрізняється від потужності при номінальній навантаженні, причому ця відмінність сильно залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, наведеної на Рис.2.2

Коефіцієнт потужності при частковому завантаженні:

$$\cos \varphi_{p^*} = 0,99 \cdot \cos \varphi_n = 0,99 \cdot 0,7 = 0,772$$

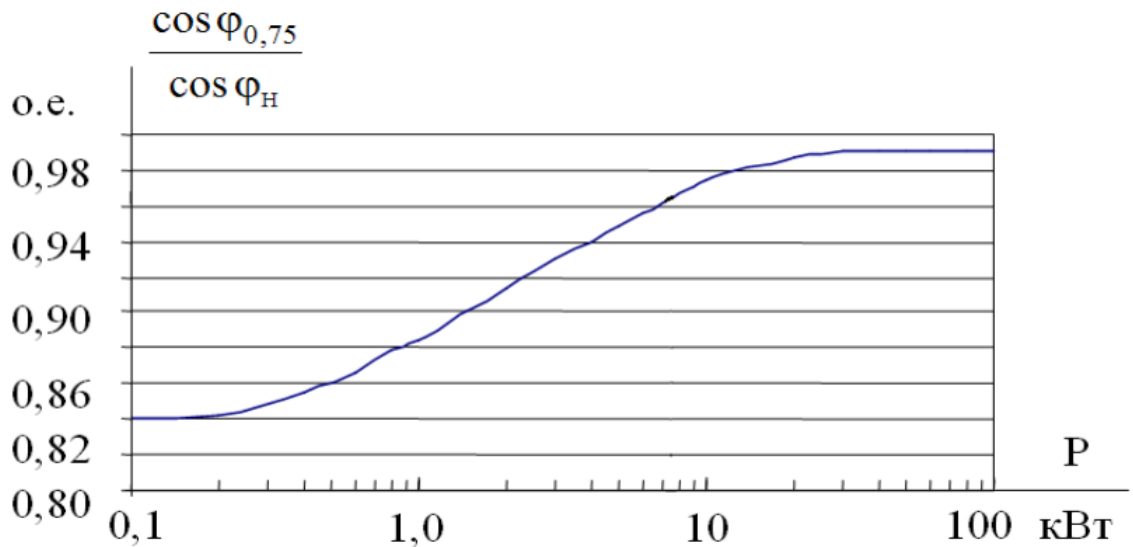


Рисунок 2.2 – Залежність  $\cos \varphi_{0,75}/\cos \varphi_n$  від потужності асинхронних двигунів

Коефіцієнт завантаження двигуна приймаємо  $p^* = 0,75$  через зазначених вище особливостей проектування асинхронних двигунів.

Тоді струм статора двигуна при частковому завантаженні дорівнює:

$$I_{11} = \frac{p^* \cdot P_{\text{дв}}}{m \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_n} = \frac{0,75 \cdot 750}{3 \cdot 220 \cdot 0,772 \cdot 0,74} = 1,688 \text{ A}$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left( \frac{p^* \cdot I_{\phi n} \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}{1 - \left( \frac{p^* \cdot (1 - S_n)}{1 - p^* \cdot S_n} \right)^2}} = \sqrt{\frac{1,688^2 - \left( \frac{0,75 \cdot 1,969 \cdot (1 - 0,013)}{1 - 0,75 \cdot 0,013} \right)^2}{1 - \left( \frac{0,75 \cdot (1 - 0,013)}{1 - 0,75 \cdot 0,013} \right)^2}} = 1,245 \text{ A}$$

З формули Клосса слідує співвідношення для розрахунку критичного ковзання:



$$S_{кр.} = S_n \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot S_n \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,013 \cdot \frac{2,7 + \sqrt{2,7^2 - (1 - 2 \cdot 0,013 \cdot 1 \cdot (2,7 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,013 \cdot 1 \cdot (2,7 - 1)} = 0,071 \text{ о.е.}$$

де в першому наближенні коефіцієнт  $\beta=1$

Попередньо для розрахунку активних і індуктивних опорів (Параметрів схеми заміщення) обмоток статора і ротора визначаються наступні коефіцієнти:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{\phi n}} = 1 + \frac{1,245}{2 \cdot 6 \cdot 1,969} = 1,053$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{\phi}^2 \cdot (1 - S_n)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_{\text{дв}}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,013)}{2 \cdot 1,053 \cdot 2,7 \cdot 750} = 33,614$$

Активний опір ротора, приведений до обмотці статора асинхронного двигуна:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_{кр.}}\right) \cdot C_1} = \frac{33,614}{\left(1 + \frac{1}{0,071}\right) \cdot 1,053} = 2,116 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора визначається за наступним висловом:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,053 \cdot 2,116 \cdot 1 = 2,227 \text{ Ом}$$

Параметр  $\gamma$ , для визначення опору короткого замикання:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_{кр.}^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,071^2} - 1^2} = 14,058$$

$$X_{\kappa} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 14,058 \cdot 1,015 \cdot 2,274 = 31,308 \text{ Ом}$$

Тоді, індуктивний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора, приблизно може бути розрахована:

$$X'_2 = 0,58 \cdot \frac{X_{\kappa}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{31,308}{1,053} = 17,25 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$X_1 = 0,42 \cdot X_\kappa = 0,42 \cdot 31,308 = 13,149 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір ланцюга намагнічування, який визначається через значення ЕРС обмотки статора:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_\phi \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{\phi n})^2 + (U_\phi \cdot \sin \varphi_n + X_1 \cdot I_{\phi n})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,78 - 2,227 \cdot 1,969)^2 + (220 \cdot 0,626 + 13,149 \cdot 1,969)^2} = 201,138 \text{ В} \end{aligned}$$

Індуктивний опір намагнічування:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{201,138}{1,245} = 161,544 \text{ Ом}$$

Індуктивність обмотки статора обумовлена потоками розсіювання:

$$L_{1\delta} = \frac{X_1}{2\pi f} = \frac{13,149}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,042 \text{ Гн}$$

Наведена індуктивність обмотки ротора, обумовлена потоками розсіювання:

$$L'_{2\delta} = \frac{X'_2}{2\pi f} = \frac{17,25}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,055 \text{ Гн}$$

Результуюча індуктивність, яка обумовлена магнітним потоком в повітряному зазорі, створюваним сумарною дією полюсів статора (Індуктивність контуру намагнічування):

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi f} = \frac{161,544}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,514 \text{ Гн}$$

Розраховані параметри схеми заміщення асинхронного двигуна зведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1. Параметри схеми заміщення електродвигуна VTB 71C

$R_1, \text{ Ом}$	$X_1, \text{ Ом}$	$L_{1\delta}, \text{ Гн}$	$X_m, \text{ Ом}$	$L_m, \text{ Гн}$	$R'_2, \text{ Ом}$	$X'_2, \text{ Ом}$	$L'_{2\delta}, \text{ Гн}$	$X_\kappa, \text{ Ом}$
2,27	13,149	0,042	161,544	0,514	2,116	17,25	0,055	31,308

## 2.3 Побудова механічних та електромеханічних характеристик АД

Механічна характеристика

Розраховуємо механічну характеристику асинхронного електродвигуна за формулою (Рис.2.3):

$$M = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_n \cdot s \cdot \left[ (R_1 + R_2' \cdot s^{-1})^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2 \right]};$$

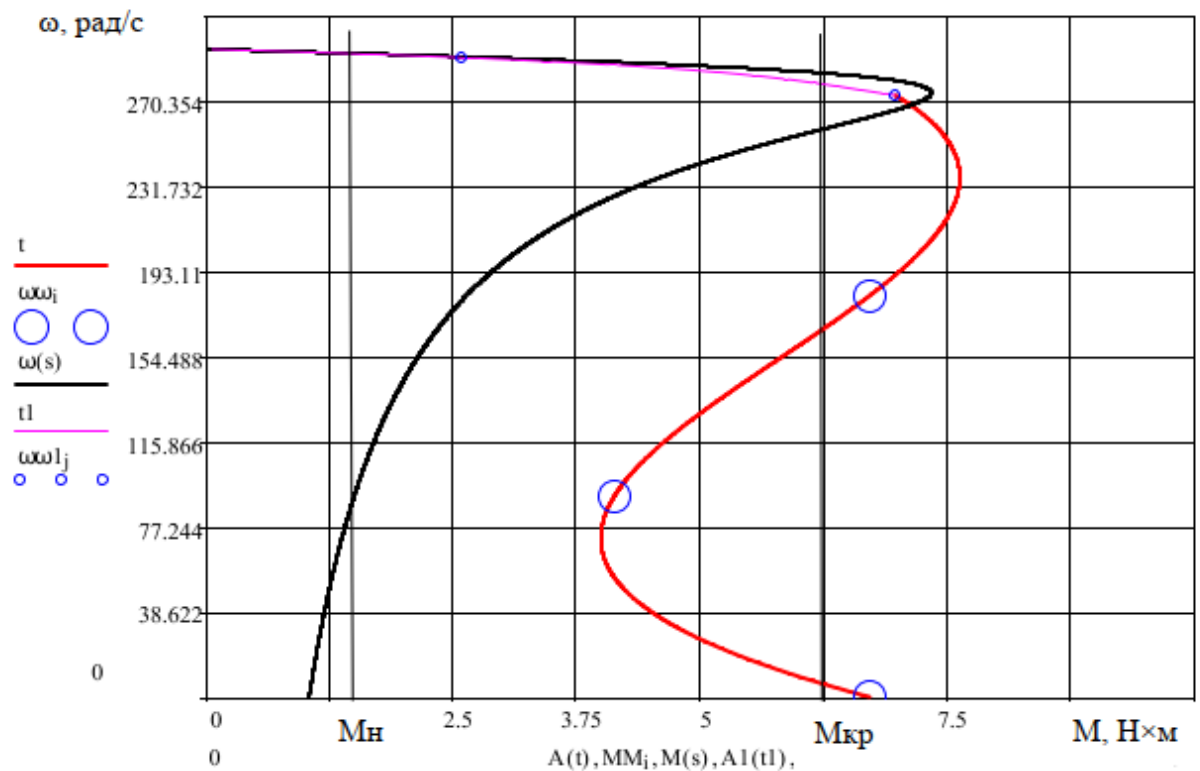


Рисунок.2.3 – Механічна характеристика асинхронного електродвигуна

### Електромеханічна характеристика струму обмотки ротора

Критичний момент рухового режиму:

$$M_{кр.} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_n \cdot C_1 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 294,263 \cdot 1,015 \cdot \left[ 2,309 + \sqrt{2,309^2 + 32,458^2} \right]} = 6,972 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Критичне ковзання:

$$S_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \pm \frac{2,274}{\sqrt{2,309^2 + 32,458^2}} = \pm 0,07$$

Максимальний момент двигуна:

$$M_{\max} = k_{\max} \cdot M_n = 2,3 = 2,7 \cdot 2,582 = 6,972 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Мінімальний момент двигуна:

$$M_{\min} = k_{\min} \cdot M_n = 1,6 \cdot 2,582 = 4,132 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначимо залежність струму ротора  $I_2$ , приведеного до обмотці статора, від ковзання  $S$ .

Графік електромеханічної характеристики  $I_2 = f(s)$  наведено на Рис.2.4.

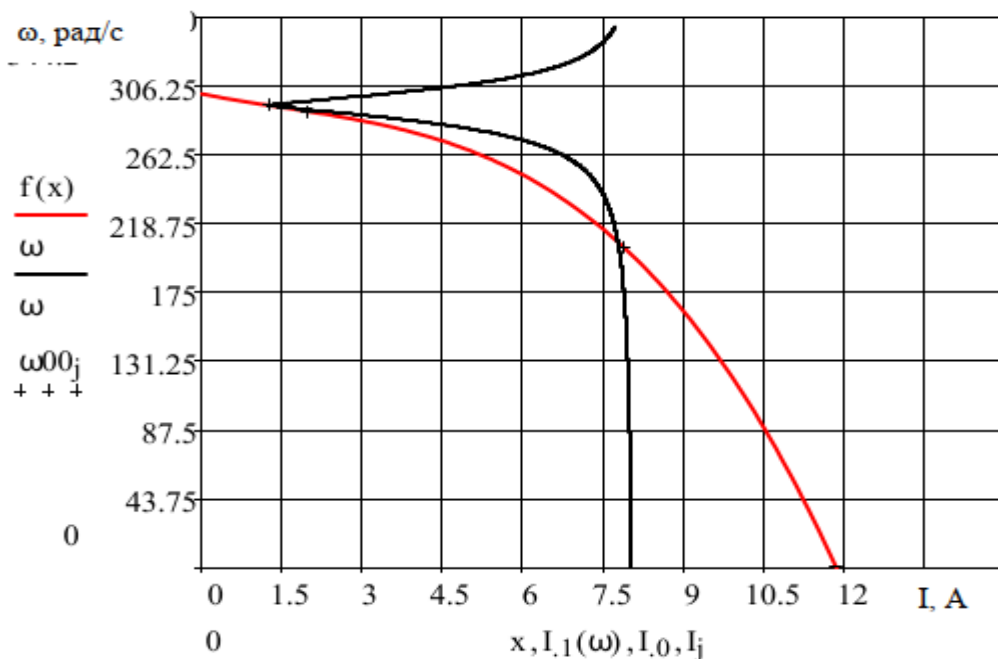


Рисунок 2.4 – Графік електромеханічної характеристики струму обмотки ротора

## 2.4 Вибір додаткового обладнання

Розрахунок перетворювача частоти

Обрано ПЧ «VLT Micro FC 51» 132F0020 (Рис.2.3.1) за умови, що

$$I_{H.ПЧ} \geq 1,25I_{H.ДВ.} \quad P_{H.ПЧ.} \geq 1,25P_{H.ДВ.}$$



Рисунок 2.5 – Перетворювач частоти Danfoss VLT Micro FC 51

Перевірка адекватності вибору ПЧ з наступних умов:

Розраховується повна пускова потужність ПЧ:

$$\left[ \frac{k \cdot n}{9550 \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \cdot \left( M_{ст} + \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t_A} \right) \right] \leq 1,5 \cdot P_{H.ПЧ.}$$

$$\left[ \frac{0,95 \cdot 2810}{9,55 \cdot 0,74 \cdot 0,78} \cdot \left( 2,582 + \frac{0,0006}{9,55} \cdot \frac{2810}{10} \right) \right] = 1,266 \leq 1,5 \cdot 1,5$$

$$1,266 \text{ кВА} \leq 2,25 \text{ кВА}$$

де  $k$  - коефіцієнт спотворення струму, який пов'язаний з алгоритмом формування синусоїди струму за допомогою ШІМ (широтно-імпульсної модуляції напруги на двигуні). Цей коефіцієнт може приймати значення від 0,95 до 1,05, і він не має розмірності. В першому приближенні можна прийняти його рівним 1;

$t_A$  – час, сек, протягом якого потрібно розігнати двигун до частоти обертання;

$M_{CT}$  – статичний момент навантаження на валу двигуна, Н · м, в основному це номінальний момент двигуна, вказаний в специфікації на двигун.

Розраховується ток  $I_{ПОТР}$ , який споживає двигун при роботі від перетворювача частоти при напрузі  $U$  мережі 220 / 380В:

$$I_{ПОТР} = \frac{k \cdot n \cdot M_{cm}}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} = \frac{0,95 \cdot 2810 \cdot 2,582}{9,55 \cdot 0,74 \cdot 0,78 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} = 1,92 A < 2,14 A,$$

де  $M$  – момент навантаження на валу двигуна, Н · м, в основному це номінальний момент двигуна, взятий з специфікації на двигун;

$U$  – лінійна напруга (діюче значення) на обмотках двигуна, В.

Розраховується ток  $I_{ПОТР.Р.}$ , Який споживає двигун при лінійному розгоні:

$$I_{ПОТР.Р.} = \frac{k \cdot n}{9,55 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot U \cdot \sqrt{3}} \cdot (M_{cm} + M_{дин})$$

$$I_{ПОТР.Р.} = \frac{0,95 \cdot 2810}{9,55 \cdot 0,74 \cdot 0,78 \cdot 380 \cdot \sqrt{3}} \cdot (2,55 + 0,018) = 1,93 A < 2,14 A,$$

$$M_{cm} = \frac{P_H \cdot 9,55}{n} = \frac{750 \cdot 9,55}{2810} = 2,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{дин} = \frac{J}{9,55} \cdot \frac{n}{t} = \frac{0,0006 \cdot 2810}{9,55 \cdot 10} = 0,018 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де  $M_{CT}$  – статичний момент навантаження на валу двигуна, Н · м, найчастіше це номінальний момент двигуна, взятий з специфікації на двигун;

$M_{дин}$  – динамічний момент навантаження, який виникає при розгоні інерційної навантаження, Н · м.

Розраховується повна споживана двигуном потужність в номінальному сталому режимі

$$S_{потр} = \frac{k \cdot P}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,95 \cdot 750}{0,74 \cdot 0,78} = 1,23 \text{ кВА} < 3 \text{ кВА},$$

де  $P$  - номінальна потужність двигуна, кВт.

З одержані умов можна зробити висновок, що ПЧ обраний правильно.

## 2.5 Розрахунок інвертора

Максимальний струм, що протікає через перетворювач інвертора:

$$I_{сmax} = \frac{P_H \cdot k_1 \cdot \sqrt{2} \cdot k_2}{\eta_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1H}} = \frac{750 \cdot 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,2}{0,74 \cdot 0,78 \cdot \sqrt{3} \cdot 220} = 8 \text{ A}$$

где  $P_H$  – номінальная мощность двигателя; Вт

$k_1 = 1.4$  – допустимий короткочасний коефіцієнт перевантаження струму,

забезпечує динаміку електроприводу;

$k_2 = 1.2$  – коефіцієнт пульсації допустимого струму;

$\eta_H$  – номінальний ККД двигуна;

$\cos \varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності двигуна;

$U_{1H}$  – номінальне лінійне напруга двигуна.

Розрахунок втрат в інвертор при ШІМ - формуванні синусоїдального струму на виході полягає у визначенні складових втрат IGBT – транзисторів в провідному стані і при комутації, а також втрат зворотного діода.

Втрата IGBT у попередньому стані:

$$P_{SS} = I_{CP} \cdot U_{CE(sat)} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \varphi_H \right) = 5,73 \cdot 2,2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,78 \right) = 2,57$$

$$\text{Где } I_{CP} = \frac{I_{cmax}}{k_1} = \frac{8}{1,4} = 5,73$$

$D = 0,95$  – максимальная скважность

$U_{CE(sat)} = 2,2$  В – прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном состоянии при  $I_{CP}$

Втрата IGBT під час перемикаання:

$$P_{SW} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{cp} \cdot U_{cc} \cdot (t_{con} + t_{coff}) \cdot f_{sw}}{2} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{5,73 \cdot 297 \cdot (0,4 \cdot 10^{-6} + 0,7 \cdot 10^{-6}) \cdot 5000}{2} = 1,08$$

де  $t_{con} = 0,4 \cdot 10^{-6}$  с – тривалість перехідних процесів в колекторному ланцюзі IGBT для розмикання транзистора;

$t_{coff} = 0,7 \cdot 10^{-6}$  с – тривалість ПП в схемі колектора IGBT для закриття транзистора.

$U_{cc} = 297$  В – напруга колектора IGBT (комутаційна напруга дорівнює напрузі ланцюга постійного струму);

$f_{sw} = 5000$  Гц – частота комутації ключів.

Сумарні втрати в IGBT:

$$P_Q = P_{SS} + P_{SW} = 2,57 + 1,08 = 3,65$$

Втрата діода в провідному стані:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ec} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \varphi_H \right) = 5,73 \cdot 2 \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,78 \right) = 2,34$$

де  $I_{ep} = I_{cp}$  – максимальна амплітуда струму, що протікає через зворотний діод;

$U_{ec} = 2$  В – пряме падіння напруги на діоді при  $I_{ep}$ .

Втрати при відновленні замикаючих властивостей діода:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} \cdot I_{ep} \cdot U_{cc} \cdot t_{II} \cdot f_{sw} = \frac{1}{8} \cdot 5,73 \cdot 297 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 5000 = 0,21$$

де  $t_{II} = 0,2$  мкс – тривалість зворотного потоку.



Сумарні втрати діода:

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 2,34 + 0,21 = 2,55$$

Отримана зворотна втрата діодів IGBT:

$$P_T = P_Q + P_D = 3,65 + 2,55 = 6,2$$

Умова вибору ключів IGBT: постійний струм колектора  $I_c \geq I_{cmax}$

З цієї умови вибираємо Trench IGBT шостого покоління серії IRGB4060DPBF.

## 2.6 Розрахунок випрямляча

Максимальне значення середнього випрямленого струму:

$$I_{dm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{I_{cmax}}{\sqrt{2}} \right) \cdot U_{ln} \cdot \cos \varphi_H + n \cdot P_T}{U_d} = \frac{\sqrt{3} \cdot \left( \frac{8}{\sqrt{2}} \right) \cdot 220 \cdot 0,78 + 3 \cdot 6,2}{297} = 5,73$$

де  $n = 3$  кількість пар діодів і транзисторів в інверторі.

$U_d = U_{cc}$  – напруга ланки постійного струму.

Максимальний робочий струм діода:

$$I_{vm} = k_{cc} \cdot I_{dm} = 1,045 \cdot 5,73 = 6 \text{ A}$$

де  $k_{cc} = 1,045$  – для бруківки трифазної схеми.

Максимальна зворотна напруга діода для мостової схеми:

$$U_{vm} = k_{zn} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{ln} \cdot k_{cn} \cdot k_c + \Delta U_n = 1,15 \cdot \sqrt{2} \cdot 220 \cdot 1,35 \cdot 1,5 + 150 = 872,4 \text{ B}$$

де  $k_{zn} = 1,15$  – коефіцієнт запасу по напрузі;

$k_c = 1,5$  – коефіцієнт допустимого підвищення напруги;

$\Delta U_n = 150$  резерви випромінювання напруги комутації ланцюга постійного струму.

Втрати у випрямлячі при сталому режимі роботи:

$$P_{DV} = m_v \cdot k_{cs} \cdot \left( U_j + R_{on} \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} \right) \cdot \frac{I_{dm}}{k_1} = 6 \cdot 0,577 \cdot 1 \cdot \frac{5,73}{1,4} = 14,2$$

де  $k_{cs} = 0,577$  – для бруківки трифазної схеми;

$m_v = 6$  – число напівпровідникових приладів в схемі.

Ємність конденсатора, необхідна для неефективного потоку струму інвертора:

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{sm} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_H}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot U_d \cdot f_{sw} \cdot q_1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 4,81 \cdot \sin\left(\frac{0,45}{2} - \frac{\pi}{12}\right)}{2 \cdot 297 \cdot 5000 \cdot 0,06} = 0,03 \text{ мкФ}$$

де  $\varphi_H = 0,45$  – кут зсуву між першою гармонікою фазної напруги і фазного струму;

$I_{sm}$  – амплітудне значення струму в фазі двигуна;

$q_1$  – коефіцієнт пульсацій на вході фільтра.

Діоди вибираються по постійному робочому струму (не менше  $I_{vm}$ ) і за класом напруги (не менше  $U_{vm} / 100$ ).

Спираючись на дані умови вибору, вибираємо з каталогу діод серії Д2Б

## 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір захисних апаратів для двигуна

Для того, щоб двигуни не піддавалися впливу струмів короткого замикання, струмів перевантаження необхідно виконати вибір автоматичного вимикача (АВВ). Зробимо вибір АВВ по такими параметрами:

Визначимо пусковий струм за допомогою номінального струму двигуна:

$$I_{ПУСК} = 5 \cdot I_H = 5 \cdot 1,74 = 8,7 \text{ А}$$

Розрахуємо короткочасний струм:

$$I_{КР} = 1,25 \cdot I_{ПУСК} = 1,25 \cdot 8,7 = 10,875 \text{ А}$$

Струм електромагнітного розчеплювача повинен бути більше короткочасного струму:

$$I_{ЭМ} \geq I_{КР}$$

За час струмової характеристики відключення вибираємо уставку електромагнітного розчеплювача рівну 8, тобто

$$I_{ЭМ} = 8 \cdot I_H$$

Перевірка по току короткого замикання:

$$I_{КЗ} \geq I_{ЭМ}$$

$$I_{КЗ} = 10 \cdot I_H = 10 \cdot 1,74 = 17,4 \text{ А}$$

За розрахованим параметрам вибираємо АВВ S203, трифазний, 16 А, тип С (Рис.3.1)



Рисунок 3.1 – Автоматичний повітряний вимикач S203

### 3.2 Вибір електромагнітного пускача

Вибір пускового пристрою будемо здійснювати за паспортними і розрахунковими даними двигуна:

$$I_{НОМ} = 1,74 \text{ A}$$

$$I_{ПУСК} = 10,44 \text{ A}$$

$$i_{уд} = (1,2 \div 1,4) \cdot I_{ПУСК} \cdot \sqrt{2} = 17,54 \text{ A}$$

Отже, з каталогу вибираємо магнітний пускач ПМЛ-1100 (Рис.3.2.),  $I_{НОМ} = 10\text{A}$ , категорії АС-3 для АД з короткозамкненим ротором.



Рисунок 3.2 – Магнітний пускач ПМЛ-1100

### 3.3 Модуль мікроконтролера RTU 188BS

Модуль мікроконтролера CPB900 (RTU188) виконаний у вигляді автономного устрою і призначений для використання в системах управління, збору даних, контролю і т.п. Модуль може працювати в автономному або підлеглому режимі. Крім того, CPB900 (RTU188) може бути підключений до мереж RS-232/422/485, що робить можливим використання мікроконтролера в розподілених системах.

Нижче представлений зовнішній вигляд даного модуля (Рис.3.3.)



Рисунок 3.3. Зовнішній вигляд модуля мікроконтролера RTU 188BS

#### Характеристики

- Процесор 188ES, 40 МГц
- Статична ОЗУ (SRAM) 512 кбайт
- Флеш-диск 512 кбайт на платі
- 2 послідовних порту: COM1 - RS-232, COM2 - RS-232/422/485 з гальванічною ізоляцією
- Сторожовий таймер
- 8 каналів АЦП з роздільною здатністю 12 біт і гальванічною ізоляцією

- 16 каналів введення дискретних сигналів до 24 В з поканальною гальванічною ізоляцією
- 16 каналів дискретного введення-виведення ТТЛ, з них 7 - з можливістю комутації до 24 В / 300 мА
- Додатково 24 або 48 універсальних програмованих каналів типу UNIO-xx-5 з можливістю підключення зовнішніх аналогових або дискретних модулів гальванічної розв'язки і нормалізації
- Fastwel™ Software BIOS і DOS зі швидким завантаженням (1 с)
- Діапазон робочих температур від -40 до + 85 ° С
- Середній час безвідмовної роботи (MTBF) не менше 413000 годин

### **Складові частини модуля RTU188-BS**

Процесор Am188ES, частота 40 МГц, супервізор і сторожовий таймер. Модуль процесора, який має супервізор (мікросхема, відстежує збої напруги харчування) і сторожовий таймер.

Супервізор формує апаратний сигнал RESET при зниженні харчування нижче 4,6 В або при натисканні кнопки скидання.

Сторожовий таймер може використовуватися в якості пристрою для виключення програмних зависань. Відгук таймера відбувається при відсутності програмних підтверджень протягом приблизно 1,6 с.

Оперативної пам'яті (ОЗУ). Модуль складається з внутрішньої статичної оперативної пам'яті розміром 512 Кбайт.

Перепрограмуючий постійний запам'ятовуючий пристрій (FDD). Для того, щоб зберігати коди програм і довготривалу інформацію в модулі є мікросхема електрично перепрограммируемой пам'яті (далі FFD - Fastwel Flash Disk) розміром 512 Кбайт з підтримкою файлової системи.

Годинник реального часу RTC. RTU188-BS має годинник реального часу, реалізовані на мікросхемі DS1307. Ця мікросхема складається з 56 доступних користувачеві байт незалежній статичної пам'яті. Для харчування мікросхеми DS1307 передбачена вбудована літієва батарея.

Послідовні порти. Мікроконтролер має 2 асинхронних послідовних порту.

Порт ізольованого дискретного введення. Мікроконтролер має 16 каналів оптоізолірованного дискретного введення. У всіх каналів загальна земля.

Порт ізольованого аналогового введення. Модуль RTU188-BS має ізольований порт аналогового введення і дозволяє вимірювати 8 аналогових входів з точністю 12 біт в діапазонах 0 ... 5, 0 ... 10, +5, +10 В (Діапазон встановлюється програмно будь-яким каналом) або 0 ... 20 мА.

Універсальний порт дискретного вводу-виводу RTU188-BS містить 16 неізольованих каналів дискретного введення-виведення. рівні сигналів будь-якого каналу відповідають рівням транзисторних-транзисторної логіки (ТТЛ). Здатність навантаження кожного каналу 12 мА.

Порт розширення мінімальної конфігурації UNIO48. Універсальний порт введення-виведення UNIO48 сумісний з вихідних контактів і управління з модулем UNIO48-5 фірми Fastwel. Порт зібраний на програмованих логічних мікросхемах FPGA і служить для вводу виведення 48 логічних сигналів. Схема порту може змінюватися безпосередньо в системі без відключення живлення.

### **3.4 Модуль релейного комутації TBR8**

Призначення модуля релейного комутації TBR8. Плата призначена для комутації силових ланцюгів змінного і постійного струму за допомогою електромагнітних реле. Вона застосовується в складі пристроїв і

функціональних блоків, виконаних на базі мікроконтролерів, процесорних і периферійних модулів фірм Octagon Systems і Fastwel. Плата має вісім нормально розімкнутих однополюсних (SPST) каналів, які забезпечують можливість комутації ланцюгів при струмі навантаження до 10 А при 270 В змінного струму та / або 30 В постійного струму. Управління каналами релейного комутації здійснюється виходами портів дискретного вводу-виводу загального призначення, що мають рівні ТТЛ або КМОП.

При підключенні плати до портів дискретного введення-виведення, виконаних на базі мікросхем, функціонально сумісних з адаптерами паралельного інтерфейсу 82C55 (580BB55), 16 ліній порту, які не задіяні для управління каналами релейного комутації, можуть використовуватися для роботи з іншими пристроями через додатковий 26-контактний з'єднувач, що входить до складу плати.

### **Технічні дані модуля релейного комутації TBR8**

Кількість каналів релейного комутації – 8. Тип контактних груп реле – нормально розімкнуті однополюсні (SPST-NO).

Параметри комутованій навантаження:

- 1) 270 В при 10 А змінного струму частотою 50 Гц.
- 2) 30 В при 10 А постійного струму.
- 3) Номінальний час спрацьовування реле 8 мс.
- 4) Номінальний час відпускання реле 5 мс.
- 5) Опір замкнутих контактів реле не більше 50 мОм.
- 6) Напруга пробою ізоляції між котушкою управління і комутованими ланцюгами щонайменше 2500 В.

Параметри варисторних захисту вихідних ланцюгів від перенапруги:

- максимальна робоча напруга варистора - 400 В змінного струму;
- класифікаційне напруга варистора - 610 В при постійному струмі 1 мА;



- максимальний піковий струм варистора 1200 А при тривалості імпульсу не більше 20 мкс.

Тип індикації стану реле - індикація стану ланцюгів управління реле.

Вимоги до живлення:

1. Напруга харчування ланцюгів управління реле - 24 В постійного струму з допустимим відхиленням  $\pm 10\%$  при споживаній струмі не більше 300 мА;
2. Напруга живлення логічних ланцюгів плати - 5 В постійного струму з допустимим відхиленням  $\pm 5\%$  при споживаній струмі не більше 20 мА.

### Пристрій і робота плати

Структурна схема плати TBR8 приведена на Рис.3.4.

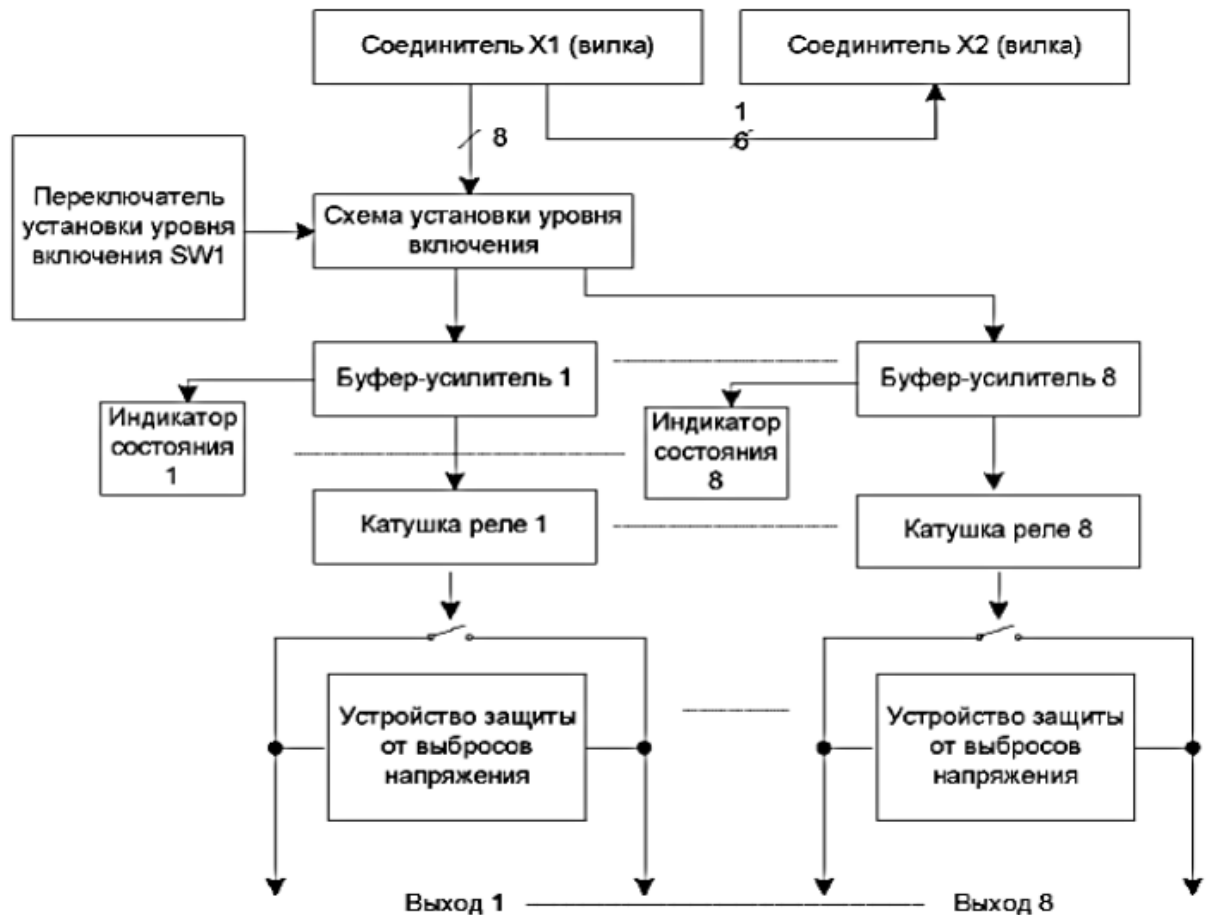


Рисунок 3.4 – Структурна схема плати TBR8

З'єднання плати з 24-канальним портом дискретного вводу-виводу реалізується через 26-контактний з'єднувач X1 з'єднувальним кабелем FC-26.

Для того, щоб управляти 8 каналами релейного комутації плати використовуються 8 каналів порту, які налаштовані на висновок. решта 16 каналів порту виведено в 26-канальний роз'єм X2. якщо для управління платою застосовується порт дискретного введення-виведення, який

сумісний з адаптером паралельного інтерфейсу 82C55 (580BB55), то включення / вимикання каналів релейного комутації плати здійснюється лініями групи С порту дискретного вводу-виводу. Сигнали управління каналами релейного комутації, які мають рівні ТТЛ, приходять на схему установки рівня включення, яка складається з восьми елементів виключе Або. Якщо при цьому перемикач SW1 перебуває в закритому стані, то включення каналів релейного комутації (замикання контактних груп реле) здійснюється сигналом з рівнем логічної 1. Якщо перемикач SW1 в розімкнутому положенні, то включення каналу релейного комутації супроводжується рівнем логічного 0.

Виходи схеми установки рівня включення з'єднані з буферами-підсилювачами, виконані на основі напівпровідникових ключів з підвищеної навантажувальної здатністю в інтегральному виконанні і призначені для управління котушками реле.

Індикатори стану каналів релейного комутації включені паралельно катушок реле. При включенні каналу релейного комутації здійснюється включення відповідного світлодіодного індикатора стану.

Паралельно з контактною групою реле включено пристрій захисту від короткочасних викидів напруги, що відбуваються при комутації контактною групою високоіндуктивних навантажень і знижують ресурс контактної групи.

### **Електричне живлення плати**

Електричне живлення логічних ланцюгів плати напругою 5 В здійснюється від модуля дискретного вводу-виводу, який управляє платою, через 26-контактний з'єднувач X1.

Якщо напруга 5 В подано на плату то це супроводжується світінням світлодіодного індикатора «+ 5V». Струм, споживаний платою по ланцюгу 5 В, становить не більше 20 мА. Електричне живлення котушок реле здійснюється напругою  $(24,0 \pm 2,4)$  В зовнішнього джерела живлення.

Приєднання позитивного полюса зовнішнього джерела живлення 24 В проводиться до одного з клемних з'єднувачів «+ 24V». Загальний провід приєднується до одного з клемних з'єднувачів «GND». Наявність напруги 24В, яке подано на плату, відбивається світінням світлодіодного індикатора «+ 24V».

Струм, який споживає плата по ланцюгу 24 В, виходить не більше 300 мА. Допустима площа перетину дроту не більше 2,5 мм<sup>2</sup>.

Місцезнаходження з'єднувачів показано на Рис.3.5

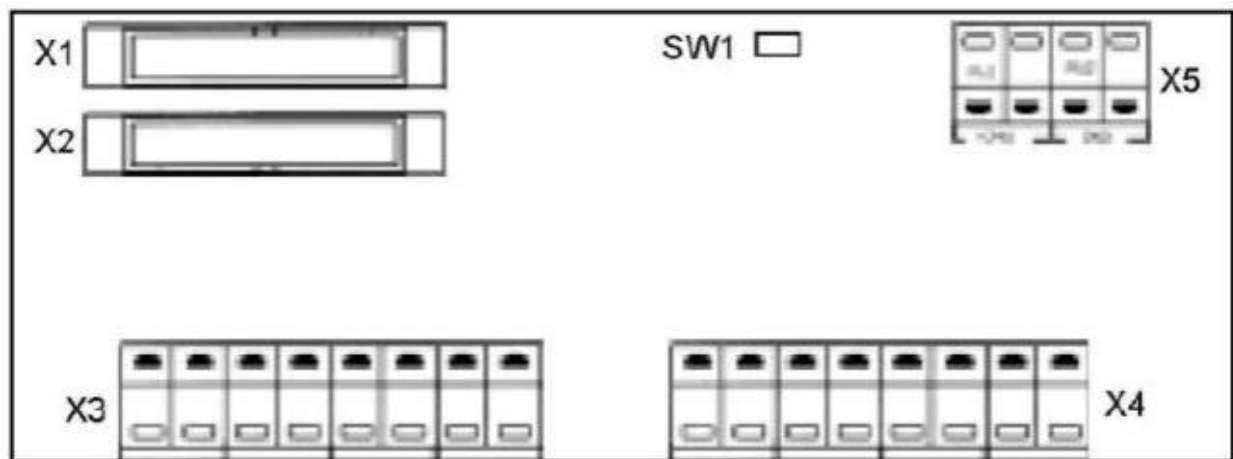


Рисунок 3.5. Розташування з'єднувачів на панелі релейного комутації TBR8

### Налаштування модуля релейного комутації

Перемикачем W1 встановлюється рівень сигналу, при якому спрацьовують реле. Якщо перемикач W1 знаходиться в замкнутому положенні, реле спрацьовують при низькому логічному рівні керуючого сигналу; якщо перемикач розімкнута, то реле спрацьовують при високому логічному рівні керуючого сигналу.

Вхідні сигнали управління станом реле подаються на контакти соединителя X1 плати. Сигнали управління мають рівень ТТЛ або КМОП-логіки, і володіти здатністю навантаження не менше 2 мА.

Призначення і нумерація контактів з'єднувача X1 плати відповідають прийнятим в модулях введення-виведення фірм Octagon Systems і Fastwel. Плата TBR8 використовує 8 ліній порту С адаптера паралельного інтерфейсу 82C55 (580BB55). Невикористані 16 ліній портів В і А транслуються на лінії портів С і В відповідно в соединителе X2.

З'єднувач X2 використовується для підключення додаткових термінальних плат до невикористаної платою TBR8 каналах введення-виведення.

Підключення навантаження повинне проводитися до клем з'єднувачів X3, X4. Допустима площа перетину дроту не більше 2,5 мм<sup>2</sup>. Тип з'єднувачів X3, X4 - пружинний контакт 256502 фірми WAGO.

### **3.5 Тензодатчик серії С**

Датчик складається з пружного елемента Z-подібної форми, штуцера для введення кабелю, тензорезисторів на клейовій основі, з'єднаних по бруківці схемою, і елементів термокомпенсації і нормування. Місце наклейки тензорезисторів і розташування елементів термокомпенсації і нормування загерметизовані і закрито пластиною, що кріпиться до пружного елемента двома гвинтами для захисту від механічних напруг.

Вимірюється зусилля, впливаючи через сіловводящій вузол на пружний елемент датчика, викликає поява деформації в місцях наклейки фольгових тензорезисторів. На діагональ харчування подається живить напруга, з діагоналі вимірювання знімається вихідна напруга. Деформація викликає зміна опорів тензорезисторів, преобразуемое бруківці електричною схемою в

коефіцієнт передачі датчика (відношення зміни напруги на діагоналі вимірювання до напруги харчування), пропорційний вимірюваній зусиллю.

### 3.6 Оптимізація контуру швидкості

Лінеаризоване структурна схема системи перетворювач частоти-асинхронний двигун (ПЧ-АД), наведена на Рис.3.6.

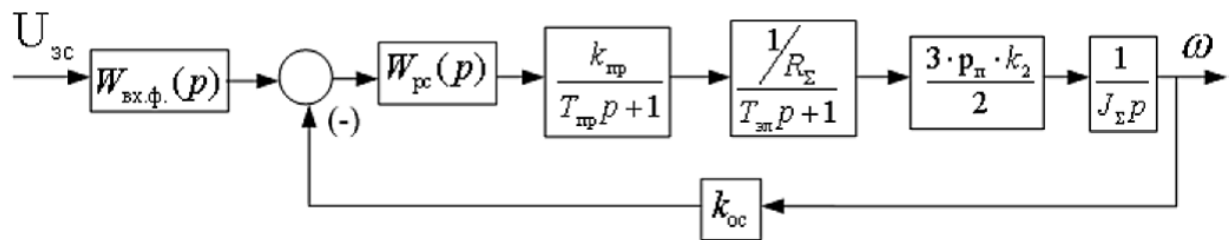


Рисунок 3.6. – Лінеаризоване структура системи ПЧ-АД

На Рис.3.6. прийняті наступні позначення:

$W_{рс}(p)$  – передавальна функція регулятора швидкості;

$K_{нр}$  – коефіцієнт перетворювача частоти  $K_{нр} = 40$ ;

$T_{нр}$  – постійна часу перетворювача частоти

$$T_{нр} = \frac{1}{f_{нр}} = \frac{1}{5000} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ с} ;$$

$$T_{эл} = \frac{L_{1\delta} + L_m - \frac{L_m^2}{L_{2\delta} + L_m}}{R_\Sigma}$$

$p_{п} = 1$  – число пар полюсів;

$k_2$  – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора

$$k_2 = \frac{L_m}{L_2} ;$$

$$R_\Sigma = R_1 + R_2' \cdot k_2 ;$$

$k_{ос}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості

$$k_{OC} = \frac{U_{p\text{макс}} \cdot 9.55}{n_H}$$

$J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції

$$J_{\Sigma} = J_{ДВ} + J_M = J_{ДВ} + \frac{1.5 \cdot J_{ДВ}}{i^2}$$

### 3.7 Синтез регулятора швидкості на модульний оптимум

Розімкнутий контур швидкості, налаштований на модульний оптимум, повинен мати наступну передавальну функцію:

$$W_{co}(\rho) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu c} \cdot \rho \cdot (T_{\mu c} \cdot \rho + 1)}$$

де  $T_{\mu c} = T_{np}$

Передавальну функцію розімкнутого контуру швидкості прирівнюємо до бажаного і вирішуємо щодо передавальної функції регулятора швидкості.

$$W_{pc}(p) = \frac{(T_{эл} \cdot p + 1) \cdot R_{\Sigma} \cdot 2 \cdot J_{\Sigma}}{k_{np} \cdot 3 \cdot p_{II} \cdot k_2 \cdot k_{OC} \cdot 2 \cdot T_{\mu c}}$$

В даному випадку виходить пропорційний регулятор з коефіцієнтом посилення

$$K_{pc} = \frac{R_{\Sigma} \cdot 2 \cdot J_{\Sigma}}{k_{np} \cdot 3 \cdot p_{II} \cdot k_2 \cdot k_{OC} \cdot 2 \cdot T_{\mu c}} = \frac{22 \cdot 2 \cdot 0,003}{40 \cdot 3 \cdot 1,9,35 \cdot 0,34 \cdot 2 \cdot 0,0005} = 0,35$$

і фільтром на вході  $(T_{эл} \cdot p + 1)$ .

### 3.8 Оптимізація контуру ваги

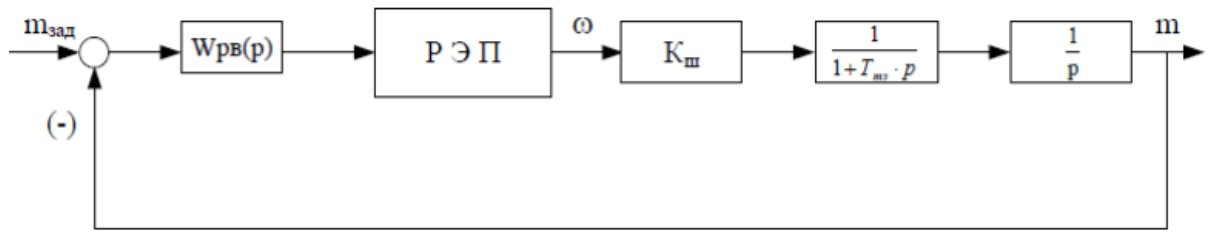


Рисунок 3.7 – Структурна схема лінеаризованого контуру ваги

На структурній схемі, зображеної на Рс.3.7. прийняті такі позначення:

$W_{рв}(p)$  – передавальна функція регулятора ваги;

$K_{ш}$  – коефіцієнт передачі шнека;

$T_{тз}$  – постійна часу транспортної затримки.

### Синтез регулятора ваги на модульний оптимум

Розімкнутий контур ваги, налаштований на модульний оптимум, повинен мати наступну передавальну функцію:

$$W_{МО}(\rho) = \frac{1}{4 \cdot T_{\mu B} \cdot \rho (T_{\mu B} \cdot \rho + 1)}$$

де  $T_{\mu B}$  – мала постійна часу контуру ваги.

Приймаємо малу некомпенсировану постійну контуру ваги рівну величиною транспортної затримки шнекового живильника  $T_{\mu B} = T_{тз} = 0,33$  с.

Перебіг процесів по контуру ваги має повільний характер по порівняно з процесами регульованого електроприводу. Тому в даній автоматизованій паспортної системи регульований привід (частотний перетворювач) можна уявити, як пропорційне ланка.

$$K_{РЭП} = \frac{\omega_{МАКС}}{U_{рв.макс}} = \frac{15,6}{10} = 1,56$$

Передавальна функція розімкнутого контуру ваги даної системи визначається наступним чином:

$$W_{разкв}(\rho) = W_{рв}(\rho) \cdot K_{рэн} \cdot \frac{k_{ш}}{\rho} \cdot \frac{1}{1 + T_{тз} \cdot \rho}$$

Передавальну функцію розімкнутого контуру ваги прирівнюємо до бажаного і вирішуємо щодо передавальної функції регулятора ваги.

Прирівнюємо  $TTЗ = T_{\mu B}$  і отримуємо:

$$W_{PB}(p) = \frac{(T_{TЗ} \cdot p + 1)}{k_{Ш} \cdot k_{PЭП} \cdot 4 \cdot T_{\mu B} \cdot (T_{\mu B} \cdot p + 1)} = \frac{1}{k_{Ш} \cdot k_{PЭП} \cdot 4 \cdot T_{\mu B}}$$

Де

$$k_{PB} = \frac{1}{k_{Ш} \cdot k_{PЭП} \cdot 4 \cdot T_{\mu B}} = \frac{1}{0,0019 \cdot 1,56 \cdot 4 \cdot 0,33} = 255,1$$

Тобто, при налаштуванні контуру ваги на модульний оптимум, отримуємо регулятор ваги пропорційного типу з коефіцієнтом крв.

### **Синтез регулятора ваги на симетричний оптимум**

Розімкнутий контур ваги, налаштований на симетричний оптимум, повинен мати наступну передавальну функцію:

$$W_{TO}(\rho) = \frac{4 \cdot T_{\mu B} \cdot \rho + 1}{8 \cdot T_{\mu B} \cdot \rho^2 (T_{\mu B} \cdot \rho + 1)}$$

Передавальну функцію розімкнутого контуру ваги прирівнюємо до бажаного і вирішуємо щодо передавальної функції регулятора ваги.

$$W_{TO}(\rho) = \frac{4 \cdot T_{\mu B} \cdot \rho + 1}{4 \cdot T_{\mu B} \cdot \rho} = \frac{1 \cdot (T_{TЗ} \cdot \rho + 1)}{k_{Ш} \cdot k_{PЭП} \cdot 2 \cdot T_{\mu B} \cdot (T_{\mu B} \cdot \rho + 1)}$$

Де

$$k_{PB} = \frac{1}{k_{Ш} \cdot k_{PЭП} \cdot 2 \cdot T_{\mu B}} = \frac{1}{0,0019 \cdot 1,56 \cdot 2 \cdot 0,33} = 510,2$$

коефіцієнт посилення регулятора ваги

$$T_{PB} = 4T_{\mu B} = 4 \cdot 0,33 = 1,32$$

постійна часу регулятора ваги

Таким чином, при налаштуванні контуру ваги на симетричний оптимум, отримуємо регулятор ваги пропорційно - інтегрального типу.



### 3.9 Розробка імітаційної моделі автоматичної системи дозування сипких матеріалів

Імітаційна модель автоматичної системи дозування сипких матеріалів представлена на Рис.3.8.

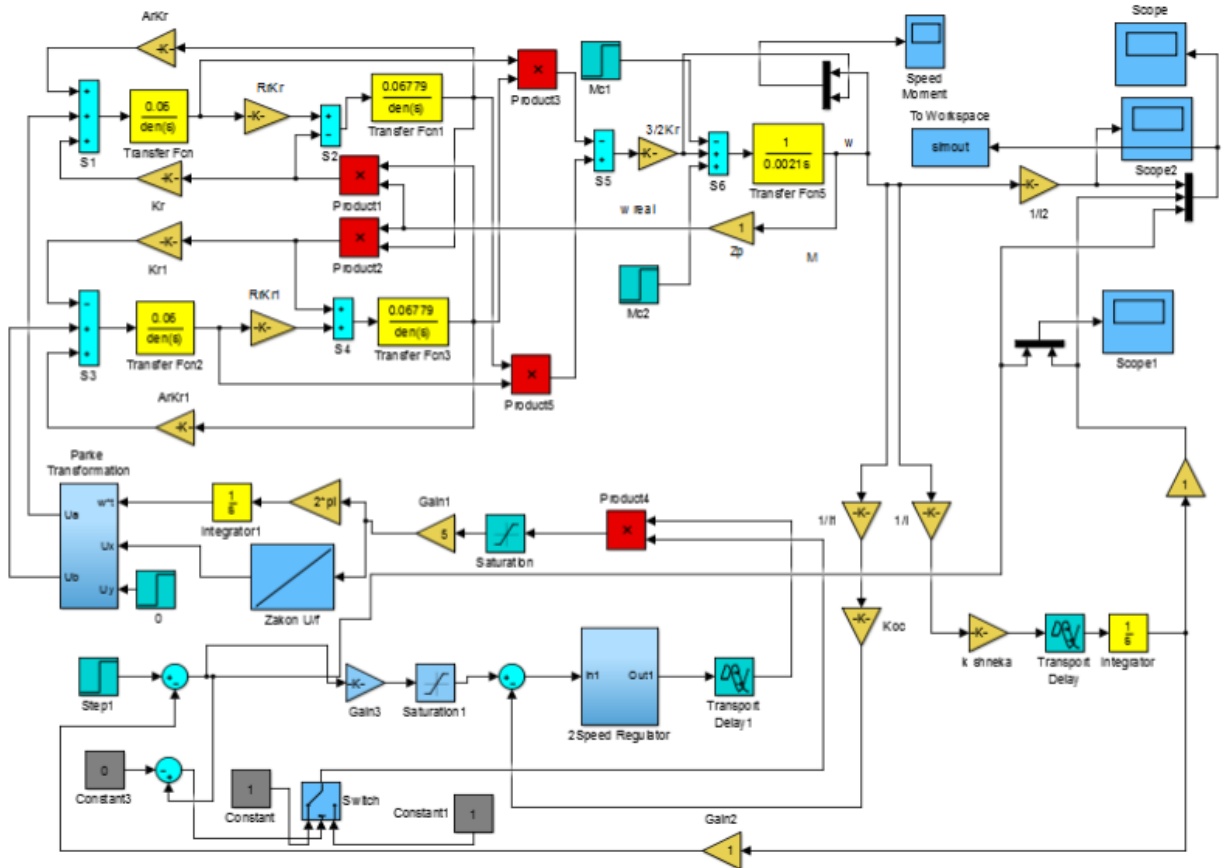


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель автоматизованої системи дозування сипких матеріалів

Блок ПКП являє собою прямий перетворювач координат з обертаються в нерухомі (Parke Transform). Вміст блоку видно на Рис.3.9. На вхід йде подача напруги під обертається системі координат  $U_x$ ,  $U_y$ , які представляють собою постійні величини, а також  $\omega t$ . На виході блоку відбувається формування синусоїдальних напруг, керуючих моделлю асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в нерухомій системі координат.

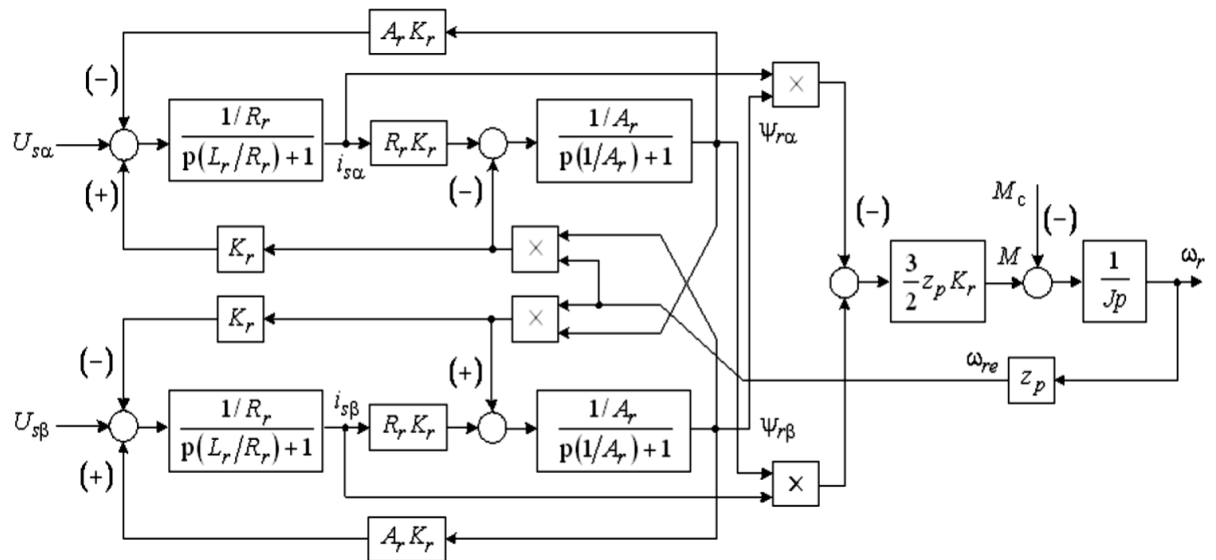


Рисунок 3.9 – Структурна схема імітаційної моделі АД при використанні нерухомої системи координат

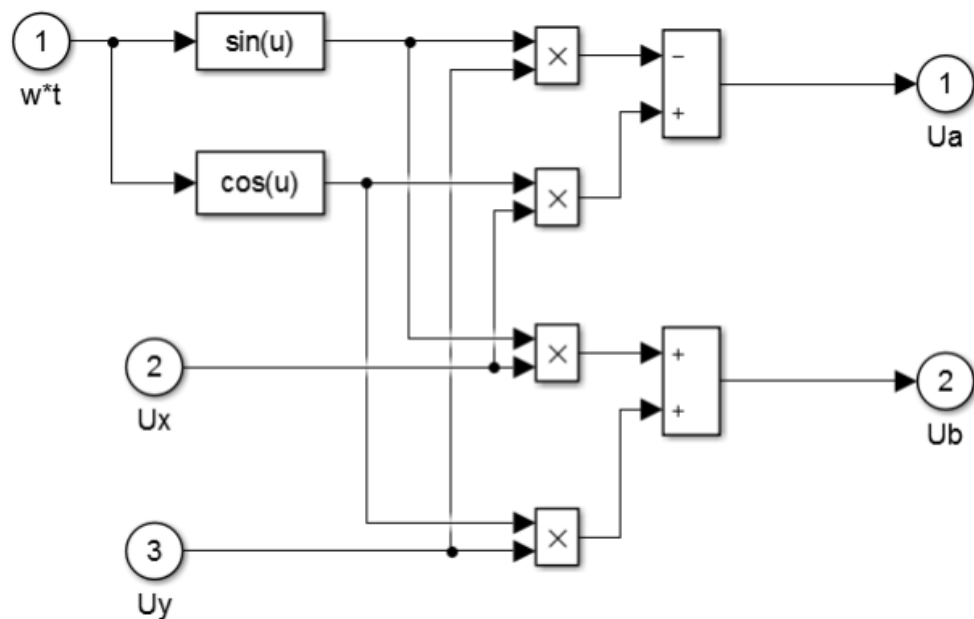


Рисунок 3.10 Прямий координатний перетворювач (Parke Transform)

Закон управління перетворювачем частоти  $U / f = \text{const}$  реалізується з допомогою блоку Lookup Table, де в віконці "Input values" задаються значення частоти, а в "Output values" значення напруги. потрібно ставити лінійну залежність для дотримання пропорції  $U / f = \text{const}$ .

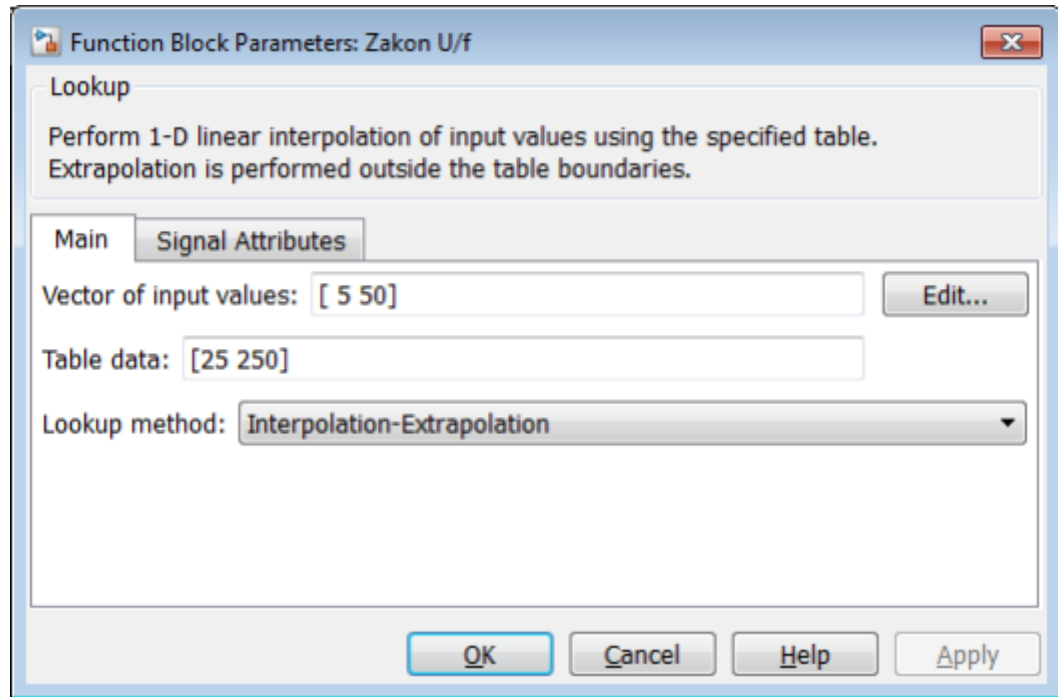


Рисунок 3.11 – Реалізація закону  $U / f = \text{const}$

При моделюванні пропорційно – інтегрального регулятора використовується функція Subsystem, з вмістом, показаним на Рис.3.12. Тут індивідуально задаються значення коефіцієнта регулятора і  $1 / T_{\text{рег}}$ .

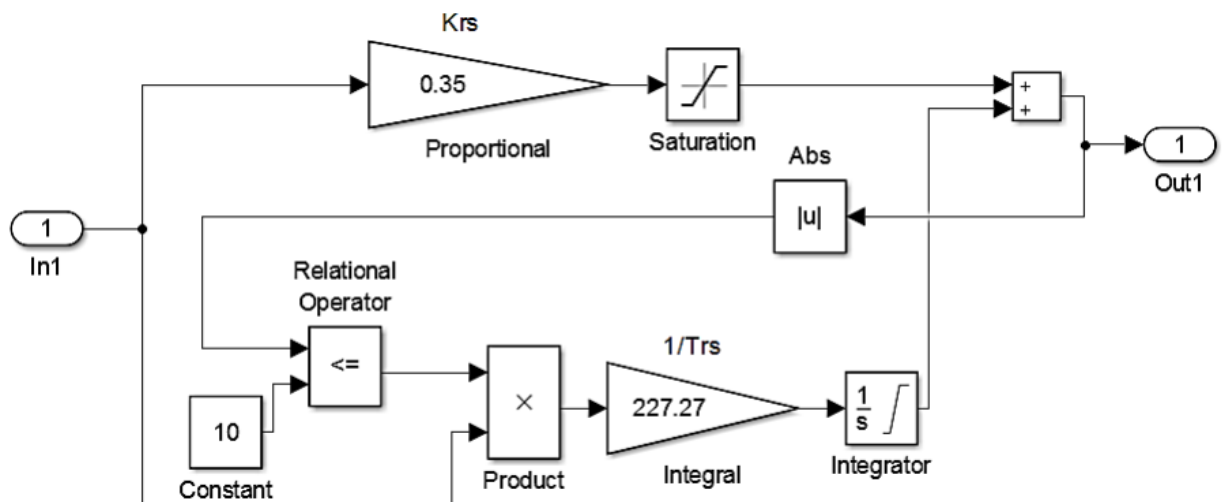


Рисунок 3.12 – Пропорційно-інтегральний регулятор

За допомогою імітаційної моделі автоматичної системи дозування сипучих матеріалів (Рис.3.8.) зображені результати дозування 50, 10, 5, 1 кг матеріалу.

Регулятор ваги налаштований на модульний оптимум.

Далі налаштуємо регулятор ваги на симетричний оптимум і побудуємо графіки, що відображають результати дозування.

## 4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 4.1 Результати дозування

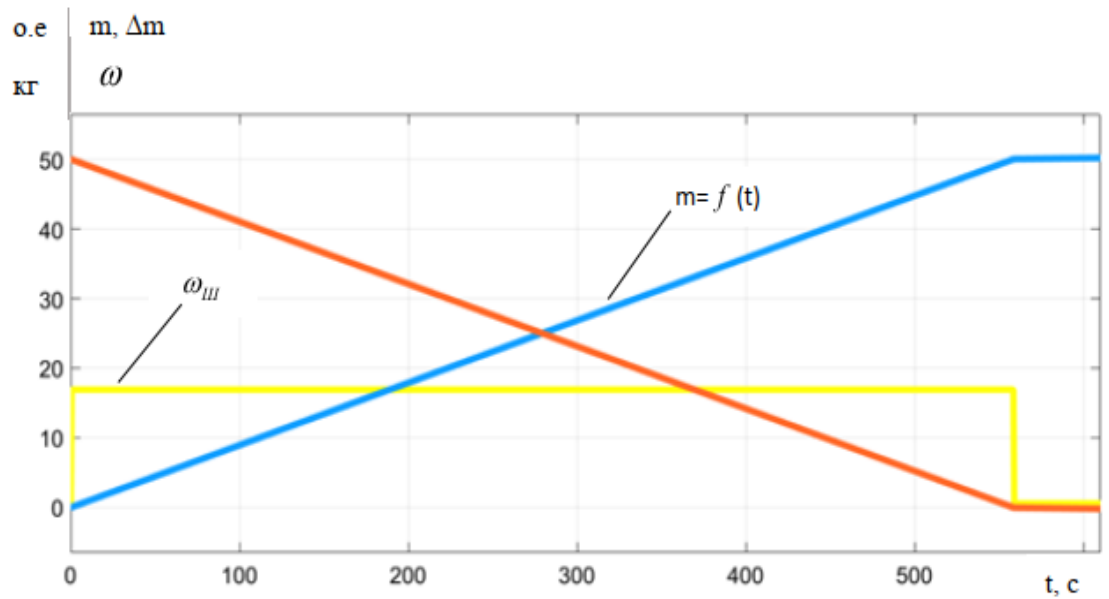


Рисунок 4.1 – Результати дозування 50 кг матеріалу з П-регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості

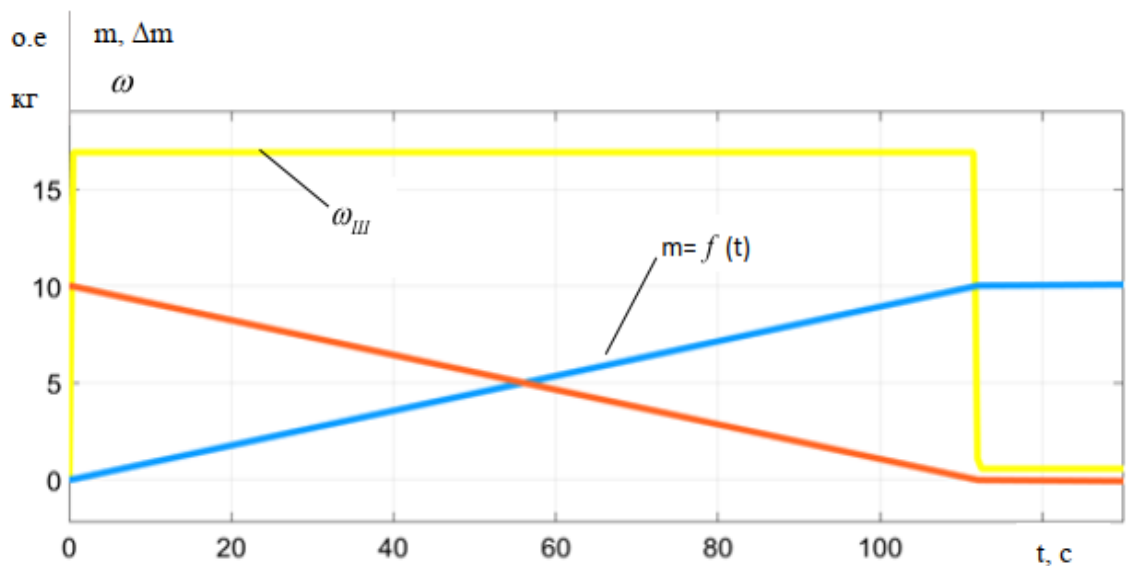


Рисунок 4.2 – Результати дозування 10 кг матеріалу з П-регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості

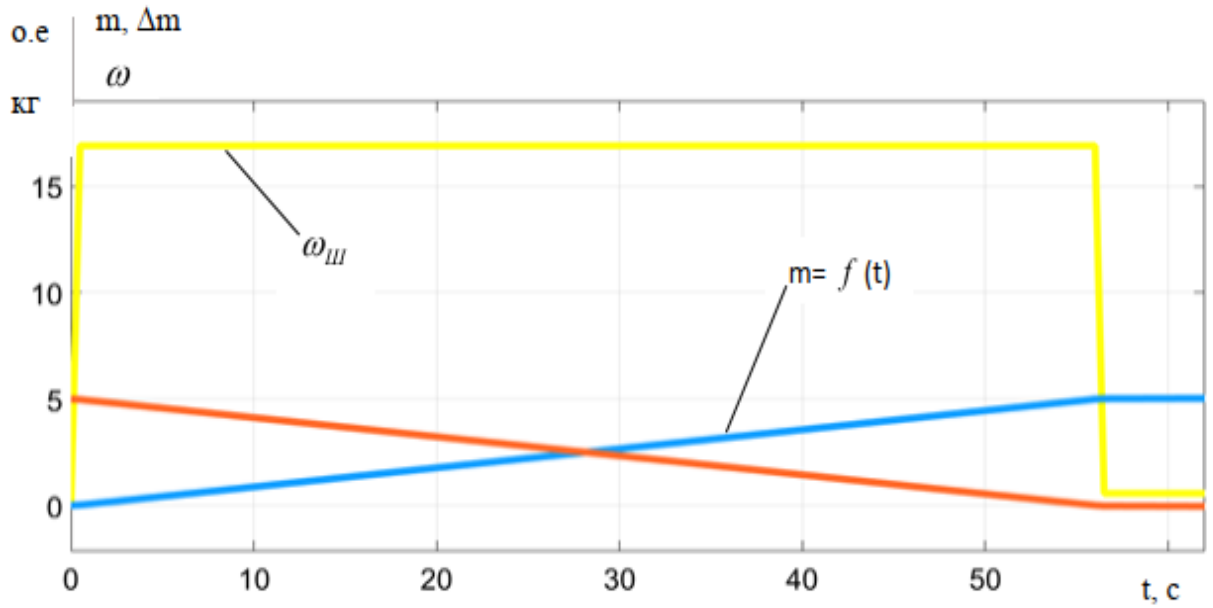


Рисунок 4.3 – Результати дозування 5 кг матеріалу з П-регулятором ваги і ПІІ-регулятором швидкості

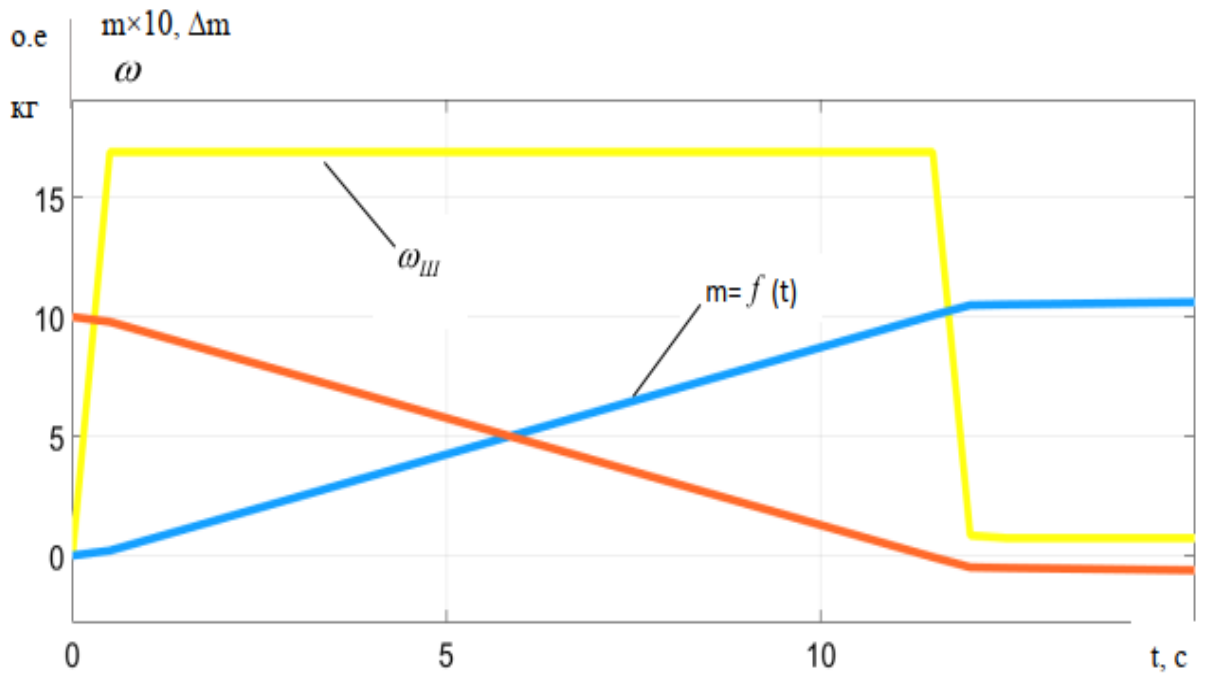


Рисунок 4.4 – Результати дозування 1 кг матеріалу з П-регулятором ваги і ПІІ-регулятором швидкості

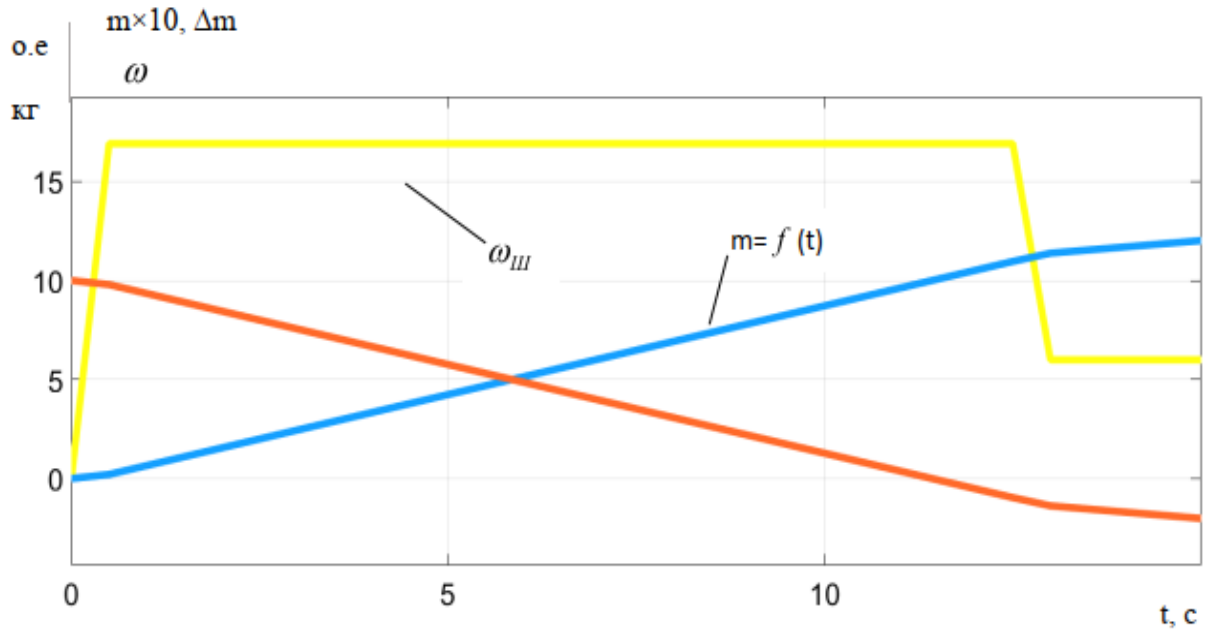


Рисунок 4.5 – Результати дозування 1 кг матеріалу з ПІ- регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості

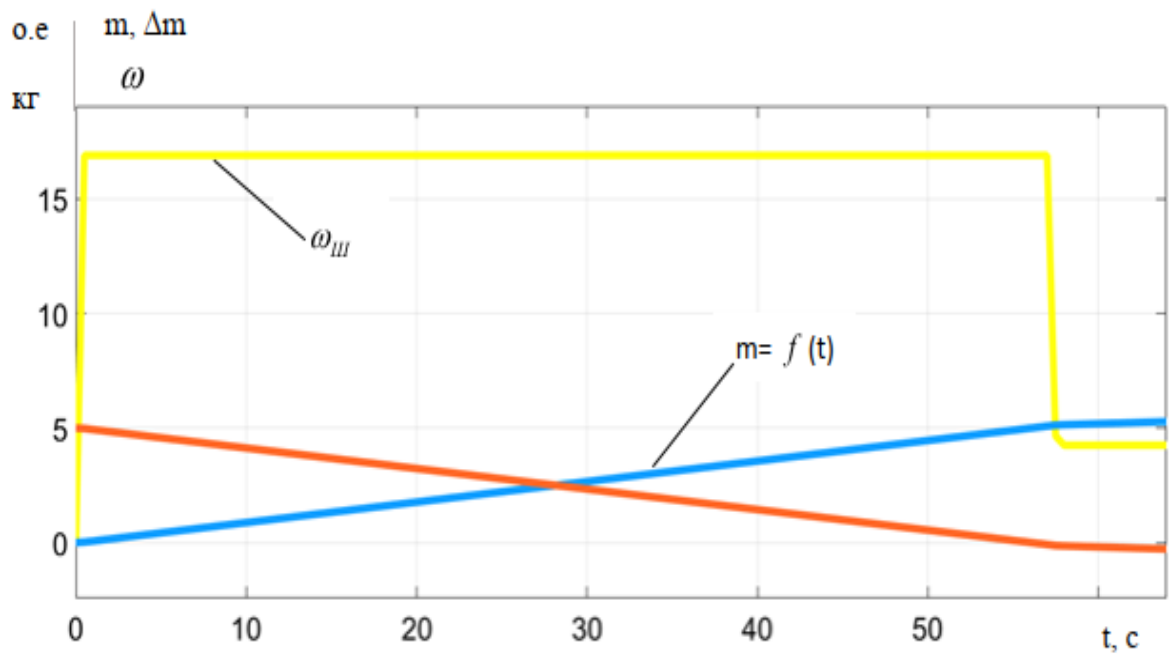


Рисунок 4.6 – Результати дозування 5 кг матеріалу з ПІ- регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості

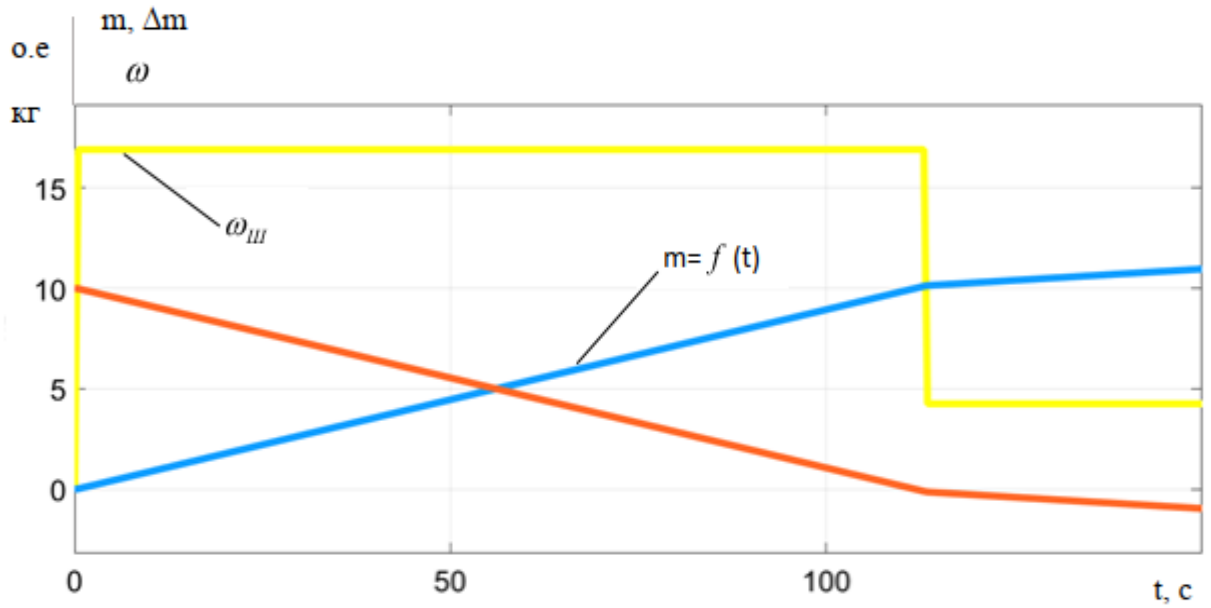


Рисунок 4.7 – Результати дозування 10 кг матеріалу з ПІ- регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості

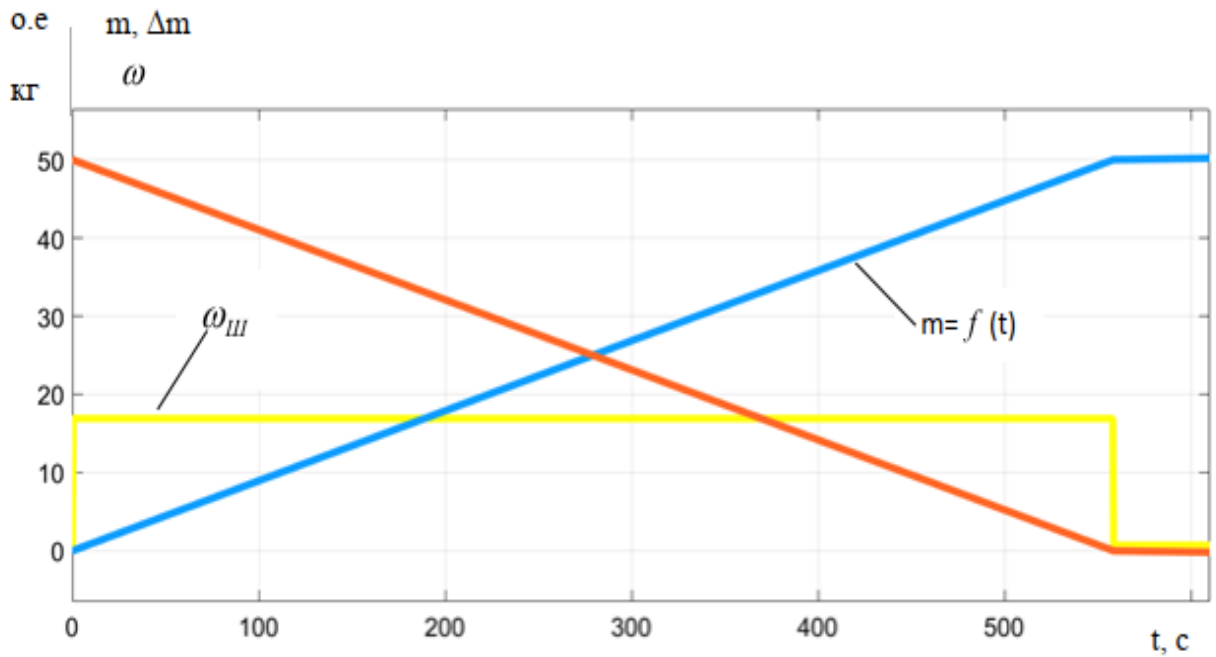


Рисунок 4.8 – Результати дозування 10 кг матеріалу з ПІ- регулятором ваги і ПІ-регулятором швидкості



## 5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### 5.1. Розрахунок статичних характеристик приводу при частотному управлінні

При частотному регулюванні швидкості АД потрібно враховувати, що реактивні опору двигуна залежать від частоти живлячої напруги. При зниженні частоти  $f_1$  активний опір  $R_1$  стає порівнянним з реактивними опорами машини. Для даної системи підходить регулювання класу  $U_1\phi / f_1j = \text{const}$ . На Рис.5.1 зображені електромеханічні характеристики з IR-компенсацією, що визначають залежність струму статора від ковзання.

Залежність струму статора від ковзання:

$$I_{111}(s) := \sqrt{I_0^2 + \Gamma'_{211}(s)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot \Gamma'_{211}(s) \cdot \sin \left[ \frac{X_{\text{кн}} \cdot f_{1ж1}}{\sqrt{\left( R_{1\text{экв}1} + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot f_{1ж1}^2}} \right]}$$

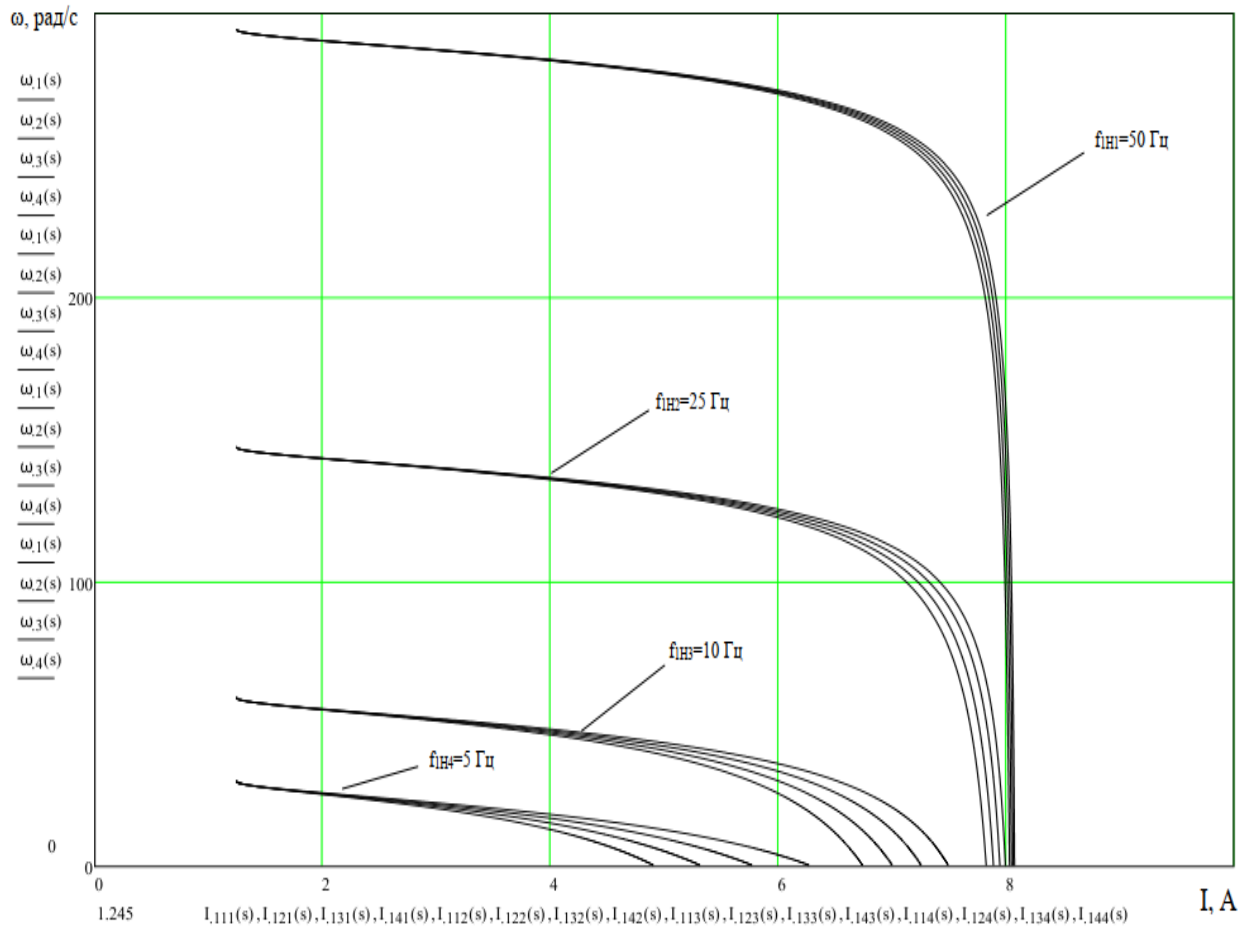


Рисунок 5.1 – Електромеханічні характеристики асинхронного двигуна при змінних значеннях величини частоти і напруги живлення

Також необхідно розрахувати і побудувати механічні характеристики АД при змінних значеннях величини і частоти напруги харчування. Будуємо аналогічно тій характеристиці, що зображена на Рис.5.1. На Рис.5.2 зображені механічні характеристики асинхронного двигуна з ІR - компенсацією при змінних значеннях величини і частоти напруги харчування.

Залежність наведеного струму ротора від ковзання:

$$\Gamma_{211}(s) := \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}1} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2 \cdot f_{1ж1}^2 + \left(\frac{R_{1\text{экв}1} \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1ж1}}\right)^2}}$$

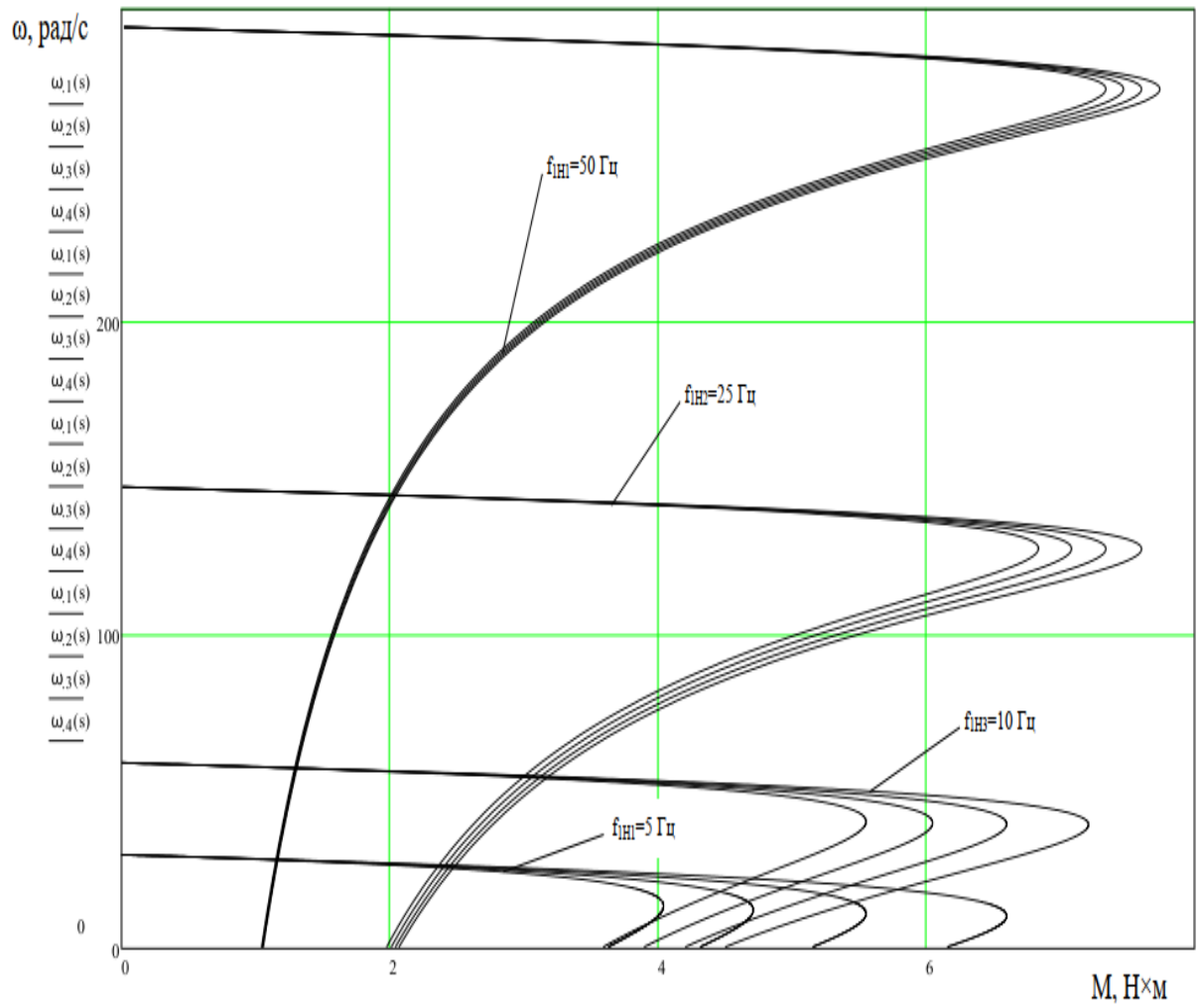


Рисунок 5.2 – Механічні характеристики АД з IR-компенсацією при змінних значення величин частоти і напруги живлення

## **6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **6.1 Система управління охороною праці на підприємстві**

Мета впровадження системи управління охороною праці (УОП) — це всебічне сприяння виконанню вимог, які повністю ліквідують, нейтралізують або знижують до допустимих норм вплив на працюючих небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища, забезпечують усунення джерел небезпеки, ізолювання від них персоналу, використання засобів, що усувають небезпечні ситуації та підвищують технічну безпеку, створюють надійні санітарно-гігієнічні та ергономічні умови. УОП передбачає встановлення конкретних кількісних показників діяльності виробничих підрозділів, підтримування котрих в заданих межах забезпечує досягнення основної мети щодо організації безпечних та нешкідливих умов праці.

Власник зобов'язаний створити в кожному структурному підрозділі і на робочому місці умови праці відповідно до вимог нормативних актів, а також забезпечити дотримання прав працівників, гарантованих законодавством про охорону праці.

З цією метою власник забезпечує функціонування системи управління охороною праці, для чого:

- створює відповідні служби і призначає посадових осіб, які забезпечують вирішення конкретних питань охорони праці, затверджує інструкції про їх обов'язки, права та відповідальність за виконання покладених на них функцій;
- розробляє за участю профспілок і реалізує комплексні заходи для досягнення встановлених нормативів з охорони праці, впроваджує професійні технології, досягнення науки і техніки, засоби механізації та

автоматизації виробництва, вимоги ергономіки, позитивний досвід з охорони праці, тощо;

- забезпечує усунення причин, що призводять до нещасних випадків, професійних захворювань і виконання профілактичних заходів, визначених комісіями за підсумками розслідування цих причин;

- організовує проведення лабораторних досліджень умов праці, атестації робочих місць на відповідність нормативним актам про охорону праці в порядку і строки, що встановлюються законодавством, вживає за їх підсумками заходів щодо усунення небезпечних і шкідливих для здоров'я виробничих факторів;

- розробляє і затверджує положення, інструкції, інші нормативні акти про охорону праці, що діють у межах підприємства та встановлюють правила виконання робіт і поведінки працівників на території підприємства, у виробничих приміщеннях, на будівельних майданчиках, робочих місцях відповідно до державних міжгалузевих та галузевих нормативних актів про охорону праці, забезпечує безкоштовно працівників нормативними актами про охорону праці;

- здійснює постійний контроль за дотриманням працівниками технологічних процесів, правил поводження з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, використанням засобів колективного та індивідуального захисту, виконанням робіт відповідно до вимог щодо охорони праці;

- організовує пропаганду безпечних методів праці та співробітництво з працівниками в галузі, охорони праці.

У випадку відсутності в нормативних актах про охорону праці вимог, які необхідно виконати для забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці на певних роботах, власник зобов'язаний вжити погоджених з органами державного нагляду заходів, що забезпечують безпеку працівників.

У разі виникнення на підприємстві надзвичайних ситуацій і нещасних випадків власник зобов'язаний ужити термінових заходів для допомоги потерпілим, залучити при необхідності аварійно-рятувальні формування.

На рівні виробничих об'єднань та підприємств визначаються цілі тактичного характеру: установлення складу та структури підрозділів, методів взаємодії, аналіз рівня безпеки праці стимулювання. З переходом на госпрозрахунок та самофінансування виробничі об'єднання та підприємства повинні ставити стратегічні цілі.

На рівні цехів і дільниць встановлюються цілі оперативного характеру: послідовність оперативного виконання окремих функцій тощо.

Окремі виконавці, що впливають на умови праці, організаційно та технічно забезпечують їх оптимізацію і цілі безпеки праці.

Основні завдання, вирішення яких забезпечує досягнення цілей УОП на різних рівнях управління і стадіях організаційно-виробничої діяльності, полягають у виконанні комплексу послідовних взаємопов'язаних дій щодо попередження травматизму та виробничих зумовлених захворювань.

Вирішення задач управління охороною праці має бути забезпечене взаємодією усіх структурних підрозділів, служб і фахівців, які визначаються керівником підприємства. Функції структурних підрозділів і служб, посадові обов'язки керівних та інженерно-технічних працівників щодо виконання задач управління охороною праці встановлюються на місцях на всіх рівнях, виходячи з структури, штатів і конкретних умов діяльності установи (підприємства).

## **6.2 Основні принципи та функції управління охороною праці на виробництві**

Організація роботи щодо управління охороною праці базується на принципах теорії управління, основними з котрих є: системність,

оптимальність, динамічність, наступність та стандартизація. Принцип системності полягає в тому, що процеси технології та безпеки розглядаються у взаємозв'язку.

Системність реалізації завдань управління охороною праці полягає у поєднанні розрізаних заходів із безпеки праці в єдину систему цілеспрямованих, постійно здійснюваних дій на всіх рівнях і стадіях управління виробництвом. Створюється система стандартів підприємства.

Управління охороною праці здійснюється шляхом збору та оцінки інформації, виявлення відхилень від установлених вимог та здійснення керуючих впливів на об'єкт управління за допомогою організаційно-розпоряджувальних, соціально-розпоряджувальних, соціально-психологічних і економічних методів.

Керуючим органом є служба охорони праці, керівники структурних підрозділів усіх рівнів керування галуззю, об'єднанням, підприємством. Управління здійснюється шляхом збору та оцінки інформації, виявлення відхилень від установлених вимог і здійснення керуючих впливів на об'єкт управління за допомогою організаційно-розпоряджувальних, економічних та соціально-психологічних методів.

УОП — це ієрархічна багаторівнева система, яка встановлює такі рівні управління:

- галузь (керівництво, науково-технічна рада, відділ охорони праці);
- об'єднання (керівництво, науково-технічна рада, відділ охорони праці);
- виробничі підприємства;
- цехи, дільниці цехів;
- робочі місця(конкретні виконавці) Управління охороною праці здійснюється реалізацією наступних функцій:
- прогнозування та планування заходів щодо забезпечення безпеки праці;

- створення організаційної структури;
- кількісна оцінка рівня безпеки праці;
- збір та оформлення вихідної інформації про стан умов та безпеки праці;
- розробка та формування переліку управляючих впливів;
- стимулювання роботи щодо безпеки праці. Відповідальність за здійснення управління охороною праці в галузі та в підрозділах покладається на їх керівників в межах їх посадової компетенції.

Планування заходів з охорони праці — один з основних методів економічного управління. Планування роботи з безпеки праці передбачає постановку цілі, розробку програми, спрямованої на її досягнення, та оцінку досягнутої ефективності. Пошук основних шляхів вирішення завдань безпеки праці та вибору потрібних заходів для їх реалізації слід узгодити з результатами прогнозування.

Планування в масштабі об'єднань і підприємств передбачає вирішення питань механізації та автоматизації виробничих процесів, ліквідацію ручної праці, розробку засобів часткової механізації, поліпшення вентиляції, впровадження засобів контролю техніки безпеки, створення комфортних умов на робочих місцях, заходів щодо попередження професійних захворювань і травматизму.

Комісія складається з представників власника, профспілок, уповноважених трудового колективу, спеціалістів із безпеки, гігієни праці і представників інших служб підприємства.

Контроль за станом умов і безпекою праці працюючих дозволяє виявити відхилення від вимог законодавства про працю, стандартів безпеки праці, якість виконання службами і підрозділами своїх обов'язків в галузі забезпечення належних умов та безпеки праці.

Ефективність контролю залежить від якості метрологічного забезпечення вимірювання параметрів небезпечних і шкідливих виробничих



факторів, визначення рівня безпеки виробничого обладнання і технологічних процесів, а також коефіцієнтів безпеки праці.

Моральне і матеріальне стимулювання працівників за роботу щодо вдосконалення умов і безпеки праці має велике значення для підвищення ефективності виробництва, зниження рівня травматизму та захворювань, поліпшення умов праці та її безпеки. Обсяг матеріального заохочення диференціюється залежно від ролі службової особи та міри її впливу на безпеку праці.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

В результаті дослідження даної системи були виконані всі необхідні завдання.

У процесі розрахунку параметрів двигуна були визначені наступні значення: номінальний момент двигуна  $M_{дв.н} = 2,582 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , номінальний фазний струм  $I_{фн} = 1,969 \text{ А}$ . Були побудовані різні характеристики, що відображають роботу двигуна і характеристики системи перетворювач частоти-асинхронний двигун при різних значення напруги і частоті мережі живлення.

Зроблено вибір і розрахунок всього необхідного обладнання: перетворювача частоти, інвертора, випрямляча, а також захисних апаратів: автоматичного повітряного вимикача, магнітного пускача.

Вже згадана система побудована на базі мікроконтролера RTU 188BS, яка в свою чергу була вивчена і розглянута в даній роботі.

Дана система дозування була випробувана за допомогою імітаційної моделі в Matlab Simulink. Були побудовані характеристики, які доводять адекватність побудованої моделі при різних значеннях маси дозованого матеріалу.

## БІБЛІОГРАФІЯ

1. .12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
2. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
3. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
4. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05с.
5. Гусев Н.В., С.В Ляпушкин, М.В. Коваленко. Автоматизація технологічних комплексів і систем в промисловості. Навчальний посібник по курсовому проектування / Н.В. Гусев, С.В. Ляпушкин, М.В. Коваленко; Національний дослідницький Томський політехнічний університет. - Томськ: Изд-во Томського політехнічного університету, 2013. - 186 с ..
6. Ляпушкін, Сергій Вікторович. Підвищення ефективності керування електроприводом автоматизованого комплексу дозування сипких матеріалів: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 05.09.03 / С. В. Ляпушкин; Національний дослідницький Томський

політехнічний університет (ТПУ); науч. рук. В. Г. Букрєєв. -  
Захищена 16.12.2015 р - Томськ: 2015. - 146 л. : іл. - Бібліогр. : с.  
123-130.

7. Черних І.В. Моделювання електротехнічних пристроїв в  
MATLAB, SimPowerSystems і Simulink. - М. : ДМК Пресс; СПб:  
Пітер, 2008. - 288 с.
8. Видинєєв Юрій Дмитрович. автоматичне безперервне дозування  
матеріалів. Москва - Ленінград, видавництво "Енергія", 1965.  
Бібліотека по автоматичі, випуск 145.