

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Удосконалений метод керування технологічною лінією

Назва теми

КВРАКІТ. 2022169.01.02.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

Виконала:

студентка 2 курсу, група АКІТ<sub>м</sub>-22-1

  
Підпис

Олександр НЕСТЕРЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник:

д-р техн. наук, проф.

  
Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

зав. кафедри автоматизації,  
комп'ютерно-інтегрованих  
технологій та робототехніки

  
Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«21» грудня 2023 р.

Хмельницький 2023

Хмельницький національний університет

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та  
робототехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

А.К.І.Т.Р.  
В. Морталов

« 01 » 09 20 23 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Нестерчуку Олександрю Руслановичу

1 Тема роботи: Удосконалений метод керування технологічною лінією  
керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор.

Затверджено наказом по університету від «15» 08 2023р. № 30.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2023р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування технологічною лінією.

Предмет дослідження: удосконалений метод керування технологічною лінією.





4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель  
процесу керування технологічною лінією. Алгоритм та програмна реалізація  
удосконаленого методу керування технологічною лінією. Дослідження  
удосконаленого методу керування технологічною лінією. Висновки.

Завдання отримав

Науковий керівник


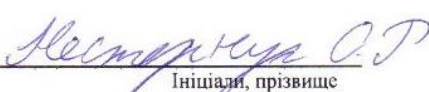
Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Микола ФЕДУЛА, доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Людмила КОРЕЦЬКА, доц. кафедри АКІТтаР		


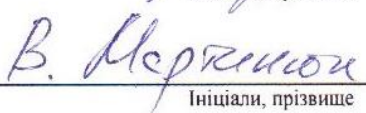
**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ п/п	Назва етапів (розділів) дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Вступ	10.09.2023р.	Виконано
2	Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2023р.	Виконано
3	Математична модель процесу керування технологічною лінією	15.10.2023р.	Виконано
4	Алгоритм та програмна реалізація удосконаленого методу керування технологічною лінією	30.10.2023р.	Виконано
5	Дослідження удосконаленого методу керування технологічною лінією	10.11.2023р.	Виконано
6	Висновки	15.11.2023р.	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки до ДР	20.11.2023р.	Виконано
7	Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2023р.	Виконано

Студент

 Підпис  Ініціали, прізвище

Керівник роботи

 Підпис  Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалений метод керування технологічною лінією».

Автор роботи: Нестерчук Олександр Русланович.

Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович.


Пояснювальна записка: 78 с., 45 рис., 2 табл., 1 дод., 40 джерел.

Графічна частина: 17 презентаційних слайдів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНА, ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА, ЧАСТОТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПІД КЕРУВАННЯ, СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

**Мета роботи:** – розробка удосконаленого методу керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеженні позиції за допомогою ПІД контролера, підвищення продуктивність шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

10.12.2023р.  
Підпис студента

  
Дата

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	11
1.1. Особливості технологічних ліній харчової промисловості .....	11
1.2. Загальна модель технологічної лінії .....	14
1.3 Висновки до першого розділу.....	18
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ.....	19
2.1 Математичні моделі складових компонентів технологічної лінії.....	19
2.2 Передавальна функція технологічної лінії .....	23
2.3 Удосконалений метод керування технологічною .....	29
2.4 Висновки до другого розділу .....	33
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ.....	34
3.1 Імітаційна модель процесу керування асинхронним двигуном за допомогою частотного перетворювача .....	34
3.2 Імітаційна модель процесу керування технологічною лінією за допомогою ПІД-регулятора.....	42
3.3 Висновки до третього розділу.....	51
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ .....	53
4.1 Особливості середовища моделювання технологічної лінії Factory I/O.....	53
4.2 Розробка технологічної лінії та програми керування в середовищі Factory I/O.....	56
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	70
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	73
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі .....	77

## ВСТУП

Технологічні лінії поширені в багатьох галузях промисловості, зокрема у харчовій промисловості. Ця висококонкурентна галузь потребує зниження виробничих витрат шляхом підвищення продуктивності. Однак поєднання простих механічних компонентів і стандартних тричленних контролерів може ускладнити точне керування положенням із збільшенням пропускної здатності.

Покращення швидкості виробництва за рахунок збільшення швидкості роботи обмежені, оскільки прискорення продукту швидко стає неприйнятним. Необхідно досягти подальших удосконалень шляхом мінімізації часу зупинки, необхідного для встановлення технологічної лінії. Цього можна досягти лише шляхом зменшення наступних помилок. Щоб досягти цього бажаного покращення керування, необхідно розглянути методи поза традиційним тричленним контролером.

Типи технологічних ліній, які зустрічаються в харчовій промисловості, складаються з компонентів, які містять низку нелінійностей. Як правило, рух забезпечується асинхронним двигуном, який має нелінійну характеристику, а зворотний зв'язок кодера створює квантування сигналу положення.

Використовуються прості механічні компоненти, які призводять до значного кулонівського тертя, а значення тертя та жорсткості змінюються зі зміною положення технологічної лінії.

Через експлуатаційні обмеження зазвичай немає датчика положення на конвеєрі чи дозаторі. Зворотний зв'язок доступний лише на валу двигуна, тому конвеєр і дозатор розміщені поза контуром керування. Конвеєр і дозатор утворюють двовісну систему, яка повинна залишатися синхронізованою.

Якщо рівень автоматизації заводу зростає, вимога швидкого, точного та надійного переміщення продукції навколо виробничого майданчика стає все більш критичною. Нещодавні досягнення в області технологій показали впровадження автоматичних транспортних засобів з дистанційним керуванням для переміщення продукту, але конвеєр все ще домінує в більшості

застосувань.

Його принципова простота в поєднанні з досягненнями в силовій електроніці та дизайні двигунів робить його ідеальним рішенням для транспортування матеріалів від автоматизації складського зберігання до транспортування вантажів на вугільних шахтах, кар'єрах і електростанціях.

Дуже різні застосування, для яких придатні конвеєри, також пред'являють дуже різні вимоги. Застосування для транспортування сипучих мас зазвичай потребують постійної швидкості, здатної переміщувати продукт на величезні відстані.

Основними труднощами при цій формі конвеєрів є пуск і безпека персоналу, що працює біля них, особливо це важливо в межах шахти [3, 4]. Ці системи часто базуються навколо стрічкових конвеєрів, і було показано, що за певних умов навантажена стрічка може демонструвати хаотичну поведінку [5, 6].

У обробній промисловості використовується широкий спектр конвеєрів, які описуються як підвісні, надпідлогові або підпідлогові, де найбільш поширеним є надпідлоговий тип [7]. Потім їх поділяють на три групи на основі їх конструкції: стрічкові, роликові або ланцюгові. Кожен тип конвеєра має переваги, які роблять його придатним для конкретного застосування.

Стрічкові конвеєри ідеально підходять там, де заготовку необхідно зняти та замінити на конвеєрі або де заготовка має складну форму. Зазвичай вони тихіші, ніж інші типи, і не потребують технічного обслуговування. Однак, оскільки між транспортуючою поверхнею та приводом існує лише з'єднання тертя, їх, як правило, обмежують додатками, де обмежене прискорення.

Роликові конвеєри складаються з великої кількості послідовних роликів. Для задовільної роботи предмети, розміщені на конвеєрі, повинні мати плоску нижню сторону, достатньо велику, щоб поширюватися щонайменше на три ролики, інакше потрібен певний лоток для транспортування. Якщо застосування потребує падіння з висоти, то безприводні ролики забезпечують просте рішення.

Роликовий конвеєр може працювати за допомогою стрічки для з'єднання роликів із валом, розміщеним під ними. Нещодавня розробка в технології роликового конвеєра полягає в тому, щоб створити ролик як невеликий асинхронний двигун. Зовнішня частина ролика утворює ротор, потужність якого подається на статор через фіксовані точки на кінцях.

Деякі програми, особливо в гнучких виробничих системах, вимагають, щоб продукти на конвеєрі затримувалися перед тим, як досягти наступного процесу.

Роликові конвеєри досягають цього шляхом ковзання або використання пружинних муфт, які відключаються від приводу, коли навантаження стає занадто високим. Черги можуть створюватися шляхом блокування просування одного блоку, що призводить до ковзання або роз'єднання роликів під навантаженням. Оскільки конвеєр все ще працює, додатковий продукт буде подаватися позаду першого, таким чином накопичується продукція.

Там, де конвеєр повинен дотримуватися профілю зупинки/пуску, потрібне з'єднання між приводом і поверхнею транспортування.

Ланцюгові конвеєри відповідають цій вимозі та використовуються в ряді галузей промисловості, де потрібні або високі навантаження, або високі прискорення. Їх міцна конструкція робить їх надзвичайно придатними для систем, що працюють з корозійними хімічними речовинами або там, де гігієнічні вимоги передбачають регулярне очищення.

Простота конструкції дозволяє простий і недорогий дизайн конвеєрів, які відповідають конкретним завданням, і виробники ланцюгів розробили широкий спектр насадок, щоб прискорити це.

Останні розробки розглядають використання пластмас у конструкції ланцюга та пов'язаних з ним компонентів [8]. Схоже, що зірочки, виготовлені з нейлону, забезпечують збільшення терміну служби порівняно зі сталевими [9].

Пластикові компоненти, очевидно, становлять інтерес, коли можуть бути побоювання щодо забруднення продукту мастилом ланцюга. Невелика кількість

мастила на більшості ланцюгів робить цю проблему непотрібною, якщо немає прямого контакту між ланцюгом і продуктом.

Керування конвеєрами може здійснюватися електронним або механічним способом. Системи, засновані на кулачках або гідравлічній крокуючій балці [10], можуть запропонувати рішення, яке забезпечує точний і повторюваний індекс при мінімальній складності. Кулачкові системи дійсно забезпечують дуже високу швидкість, точний індекс і використовуються в легких системах великого обсягу, таких як збірка друкованих плат. Однак вони схильні до зносу і потребують регулярного догляду. Зміна профілю індексації може бути досягнута лише заміною кулачка.

Докладні огляди типів конвеєрів та їх вибір опубліковано [11, 12, 13]. Простота конструкції конвеєра означає, що є дуже мало опублікованих матеріалів у цій галузі з конвеєрами, які описуються як продукт, який може побудувати будь-яка невелика інженерна компанія [14].

Більшість опублікованих матеріалів, які стосуються конвеєрів, стосуються статистичного моделювання для визначення найбільш ефективної компоновки виробничого підприємства [15, 16]. Причина відсутності досліджень інженерних аспектів конвеєрів, зокрема контролю, частково може бути пов'язана з відсутністю інвестицій у передові технології виробництва.

Ланцюгові конвеєри складаються з дуже простих механічних компонентів, таких як ланцюг і зірочка. Ланцюгові конвеєри базуються на стандартному роликовому ланцюзі, що приводиться в рух від косозубої коробки передач або через пасову передачу.

Спочатку рух забезпечувався сервоприводом постійного струму, але вимога високого рівня гігієни вимагає використання під час очищення шлангів води під високим тиском або пари. Двигун постійного струму, здатний витримувати такі екологічні вимоги, дорогий і потребує тривалого простою для обслуговування.

З появою недорогої силової електроніки використання асинхронних двигунів набуло широкого використання. Зворотний зв'язок за положенням забезпечується оптичним енкодером, розміщеним на валу двигуна з керуванням,

що забезпечується промисловим стандартом пропорційного, інтегрального та диференціального (ПІД) контролера, також відомого як тричленний контролер.

Цей підхід має ряд обмежень. Налаштування контролера здійснюється вручну, що навряд чи дасть оптимальне рішення.

Зміна динаміки системи з часом призведе до зниження продуктивності, якщо контролер не буде повторно налаштований вручну. Вони працюють належним чином, але не можуть безпосередньо врахувати ефекти вищого порядку, які можуть бути внесені нелінійністю.

Використання сучасних накопичувачів може бути використано для подолання деяких із цих проблем. Стверджується, що керування потоком вектора асинхронних двигунів забезпечує продуктивність, яку можна порівняти з сервоприводом постійного струму, а використання інверторів, стає все більш поширеним. Заміна існуючих приводів на версії вектора потоку часто є небажаною через витрати та необхідне перенавчання.

Зворотній зв'язок для контролера забезпечує шифратор, встановлений на валу двигуна. Це залишає механічні компоненти системи поза контуром керування, що спричиняє низку труднощів керування. Коли ланцюг старіє, втулки зношуються, через що ланцюг фактично стає довшим.

Зуби в коробці передач і зірочках зношуються, а приводні паси розтягуються, створюючи люфт у системі. Чистим ефектом є зниження точності руху індексування, і це може бути причиною відмови від використання ланцюгових конвеєрів [21]. В даний час вплив перешкод у відкритому контурі долається регулярним ручним скиданням або автоматичним переналаштуванням системи один раз на кожен оберт конвеєра. Обидва методи є небажаними, оскільки під час переміщення конвеєра виробництво затримується і пропускну здатність зменшується.

Автоматична компенсація збурень позиції, яку зазвичай називають дрейфом, підвищить ефективність виробництва системи, але має бути досягнута без значного збільшення вимог до зондування. Будь-яке вимірювання має бути без втручання в роботі системи і несприйнятливим до забруднення такими

факторами навколишнього середовища, як вода, пара або електромагнітні перешкоди.

Автоматична компенсація збурень позиції не потребуватиме довгих шляхів дорогого багатожильного екранованого кабелю. Енкодер, розміщений на механічному вихідному валу, є неприйнятним з міркувань кабелю та труднощів у досягненні точного монтажу. Система на основі оптики також неприйнятна, оскільки вона може бути легко закрита пролитим продуктом.

Метою цього дослідження є вирішення деяких із цих проблем для покращення продуктивності системи. Продуктивність у промисловості вимірюється кількістю виконаних одиниць за годину. Покращення можна досягти шляхом збільшення швидкості роботи, однак це обмежено прискоренням.

Занадто швидкі прискорення ускладнюють утримання позиції продукту на конвеєрі, хоча можливі незначні збільшення швидкості, якщо точність позиції не погіршується. Щоб отримати найбільш істотне збільшення пропускної здатності, точність слідування траєкторії позиції повинна бути покращена.

Наразі необхідно ввести часову затримку, щоб конвеєр осів. Наприклад, якщо час видачі продукту становить 0,3 с, перед початком видачі можна додати затримку в 0,1 с, щоб переконатися, що система знаходиться в правильному положенні.

Якщо точність, з якою конвеєр слідував профілю руху, була покращена, цей час затримки можна було б скоротити. Для кожної окремої одиниці скорочення може бути лише часткою секунди, але протягом 15-годинного дня цей час накопичується до значної кількості завершених додаткових одиниць. Таким чином, проблема керування полягає в точному відстеженні позиції за допомогою ПД контролера.

Щоб мати можливість визначити продуктивність будь-якого нового регулятора, спочатку необхідно визначити продуктивність ПД-системи. Розглянемо двоосьову технологічну лінію, яка складається з короткої секції ланцюгового конвеєра з дозатором нагорі, що приводиться в рух через пасові передачі асинхронними двигунами. Керування обома осями здійснюється за

допомогою одного ПК, оснащеного відповідними пристроями введення/виведення.

**Мета роботи** – розробка удосконаленого методу керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеженні позиції за допомогою ПД контролера, підвищення продуктивність шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити завдання:

- виконати огляд літературних джерел та патентних даних про методи керування технологічною лінією;
- розробити математичну модель процесу керування технологічною лінією;
- розробити алгоритм та програмну реалізацію удосконаленого методу керування технологічною лінією;
- розробити імітаційну модель удосконаленого методу керування технологічною лінією та дослідити її переваги та недоліки.

**Об'єкт дослідження** – процес керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеженні позиції за допомогою ПД контролера, підвищення продуктивність шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

**Предмет дослідження** – удосконалений метод керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеженні позиції за допомогою ПД контролера, підвищення продуктивність шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

**Методи досліджень.** При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У результаті проведеного дослідження:

Розроблено удосконалений метод керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеженні позиції за допомогою ПД контролера,

підвищення продуктивність шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

## 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

### 1.1 Особливості технологічних ліній харчової промисловості

Технологічні лінії є основою харчової промисловості. Вони складаються з короткої секції ланцюгового конвеєра, що працює в поєднанні з дозатором продуктів. Такі системи мають два режими роботи: індексування та синхронізацію. Під час індексування конвеєр послідовно розміщує предмети, які встановлені на ньому, під дозатором продуктів у режимі стоп/старт.

Продукт видається лише тоді, коли конвеєр нерухомий. Синхронізація вимагає, щоб конвеєр рухався з постійною швидкістю, а дозатор прискорювався.

Продукт видається, коли швидкості конвеєра та дозатора синхронізовані. Потім дозатор швидко повертається до початкової точки, готовий до наступного кроку. На рисунку 1.1 показано графіки зміни координати та швидкості в режимі синхронізації та індексування.

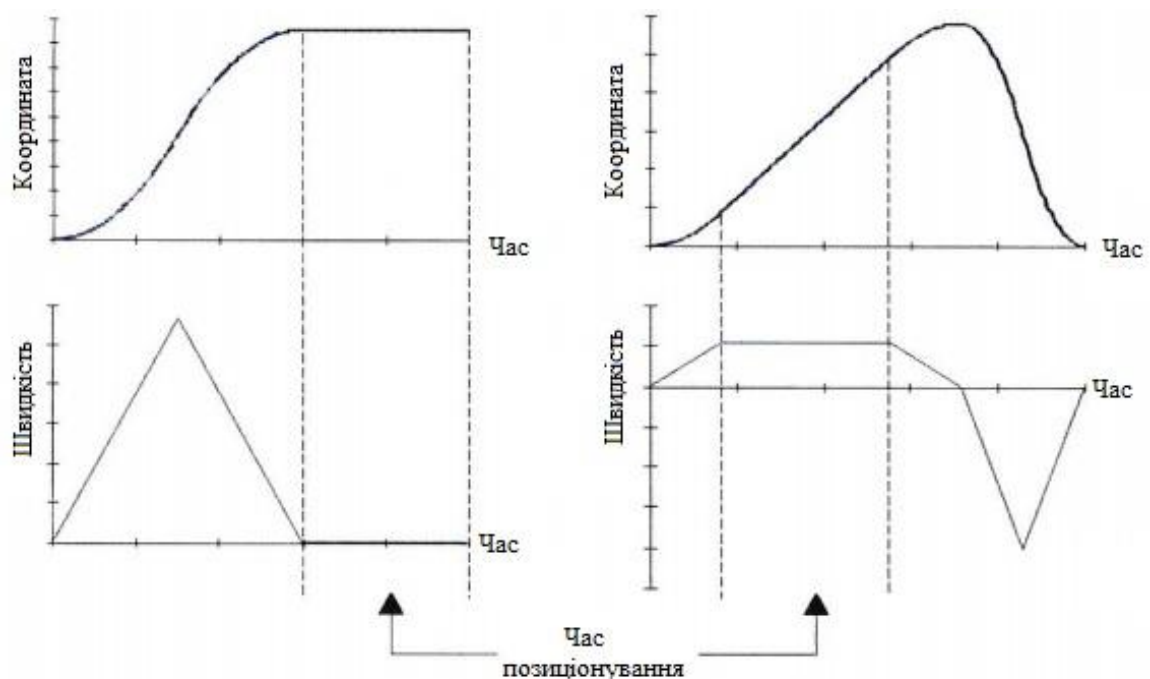


Рисунок 1.1 - Графіки зміни координати та швидкості в режимі синхронізації та індексування

В обох режимах роботи необхідний точний контроль положення, особливо протягом часу дозування. Типовими вимогами є точність позиціонування  $\pm 1$  мм, що дорівнює приблизно  $\pm 0,05$  рад на валу двигуна з часом дозування 0,4с.

Ланцюговий конвеєр складається з двох паралельних відрізків сталевих роликів ланцюга з конвеєрною поверхнею, утвореною з алюмінієвих пластин, прикріплених до поперечних деталей через рівні проміжки, як зображено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Ланцюговий конвеєр [22]

Електроживлення забезпечується асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором, з'єднаним «трикутником», який працює через зубчастий ремінь 5:2. Додаткове кріплення валів пасового приводу мінімізує нелінійні ефекти, спричинені змінами міжцентрових відстаней ведучого шківів [24].

Зворотний зв'язок за положенням забезпечується 500 імпульсами на оберт інкрементальним квадратурним енкودером із диференціальними виходами, встановленими безпосередньо на валу двигуна.

Ланцюг фактично є ланкою кінцевої довжини. Коли він рухається навколо зірочки, виникають періодичні коливання сил ланцюга. Динаміка внаслідок цього ефекту, відомого як полігональна дія, була мінімізована шляхом відповідного вибору ведучої зірочки [25, 26].

Дозатор складається із зварної каретки, що проходить над конвеєром, напрямком якої забезпечується алюмінієвими напрямними. Каретка з'єднана з петлею зубчастого ременя, що приводиться в рух з одного кінця за допомогою системи двигуна/пасового приводу, подібної до системи конвеєра. Підпружинені ролики в кутах каретки спираються на краї полозів і підтримують центрування каретки під час руху. На рисунку 1.3 зображено приклад дозатора для морозива [23].



Рисунок 1.3 – Дозатор для морозива [23]

Запити можуть бути обчислені в повному обсязі перед ініціюванням контролера та збережені в таблиці пошуку. Більш ефективний метод полягає у визначенні необхідного запиту в кожен момент вибірки. Слід уникати множення, щоб забезпечити максимальну кількість часу в кожному періоді вибірки для виконання контролером і обслуговування.

Якщо одиниці вимірювання визначені в термінах підрахунків кодувальника та періодів вибірки, тоді можна генерувати запит на позицію в кожен момент вибірки шляхом послідовного додавання. Щоб досягти цього, значення

прискорень, швидкостей, позицій і часу ключових точок у профілі запитів обчислюються до початку роботи контролера та зберігаються в двовимірному масиві.

У кожен момент вибірки необхідне значення прискорення додається до попереднього запиту швидкості, який, у свою чергу, додається до попереднього запиту положення.

Таким чином можна отримати інформацію про положення та швидкість з мінімальними обчислювальними витратами. Щоб уникнути дрейфу сигналу запиту через помилки округлення, у передостанній момент вибірки алгоритм визначає швидкість, яку необхідно повернути, щоб гарантувати, що загальний запит позиції дорівнює остаточній бажаній позиції на одиницю.

## 1.2 Загальна модель технологічної лінії

До складу загальної моделі технологічної лінії входить інвертор, асинхронний двигун, енкодер, приводний ремінь і відповідні шківів, а також конвеєр і дозатор. На рисунку 1.4 зображена загальна модель технологічної лінії.

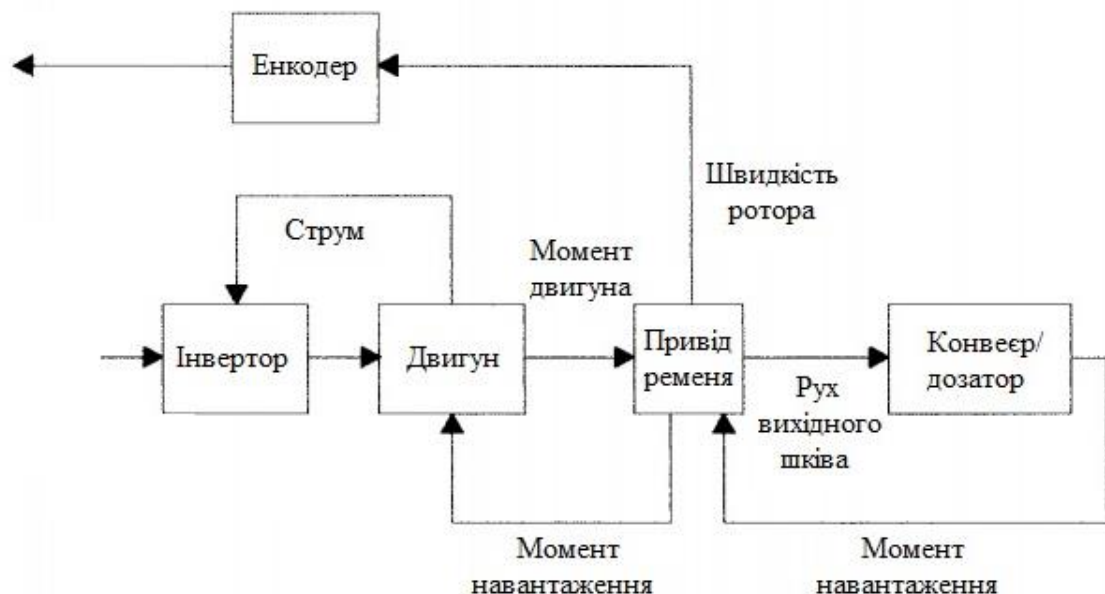


Рисунок 1.4 - Загальна модель технологічної лінії

Кожен із цих компонентів описується своєю моделлю. Нелінійне тертя властиве частині компонентів загальної моделі технологічної лінії, а його вплив описує окрема модель. Тертя можна описати як таке, що складається з трьох компонентів, як зображено на рисунку 1.5 [29, 30].



Рисунок 1.5 – Графіки залежності сили тертя від швидкості

1. Статичне тертя - існує лише при нульовій швидкості.
2. Сила тертя постійного крутного моменту, яка називається кулонівським тертям.
3. Сила лінійного в'язкого тертя.

Усі три компоненти присутні в технологічній лінії, причому кулонівське тертя є домінуючим при нормальних робочих швидкостях. Статичне тертя протидіє прискорювальному крутному моменту до заданого рівня, який становить 1,1 коефіцієнта кулонівського тертя. Коли швидкість більша за нуль, нелінійна складова тертя падає до рівня кулонівського тертя, після чого залишається постійною, доки швидкість не повернеться до нуля.

Для оцінки залежності сили тертя від швидкості розглянемо експериментально виміряні залежності крутного моменту від швидкості для дозатора (1.1) та для конвеєра (1.2) [31].

$$T_k = 0,0066\omega + 0,4687 \quad (1.1)$$

$$T_d = 0,0046\omega + 0,3329 \quad (1.2)$$

Можна представити трифазний асинхронний двигун безпосередньо за допомогою моделі фазової змінної [31, 32]. Однак, більш зручною математичною моделлю трифазного асинхронного двигуна є математична модель у двофазній нерухомій системі координат статора, яка використовує дві осі d і q [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40].

Математична модель у двофазній нерухомій системі координат статора, яка використовує дві осі d і q, вимагає менше обчислювальних зусиль, ніж інші математичні моделі [31].

Математична модель у двофазній нерухомій системі координат статора, яка використовує дві осі d і q, для N-полюсного двигуна описується системою (1.3):

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 & M_{sr} p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p & 0 & M_{sr} p \\ M_{sr} p & N\omega_r M_{sr} & R_r + L_r p & N\omega_r M_{sr} \\ -N\omega_r M_{sr} & M_{sr} p & -N\omega_r M_{sr} & R_r + L_r p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

де  $R_s$  та  $R_r$  – опори статора та ротора відповідно;

$L_s$ , та  $L_r$  – індуктивності статора та ротора відповідно;

$M_{sr}$  – взаємна індуктивності статора та ротора;

$\omega_r$  – кутова частота обертання ротора.

Для інвертора, що використовує синусоїдну широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), усуваються всі гармоніки менші за  $2h-1$  [33], де  $h$  - кількість імпульсів за півперіоду.

$$h = \frac{f_H}{f_B}, \quad (1.4)$$

де  $f_H$  та  $f_B$  – носійна та вихідна частоти відповідно.

Електричну схему асинхронного двигуна можна вважати фільтром низьких частот із смугою пропускання в кілька десятків герц [34], тому що інвертор можна представити як ідеальну синусоїду зі змінною частотою та змінною амплітудою.

$$v_0(t) = \sqrt{2}V_{\text{СК}} \alpha \sin(\beta t), \quad (1.5)$$

де  $V_{\text{СК}}$  – середньоквадратична напруга;

$\alpha$  - це скаляр амплітуди, який дає правильну V/f характеристику;

$\beta$  - необхідна вихідна частота.

З'єднання двигуна з конвеєром/дозатором забезпечує передавальне число, яке зменшує швидкість двигуна лише в 2 рази. Таким чином, приводу не потрібно буде працювати на високих швидкостях, тому модель є адекватною для імітації реакції часу системи.

Модель інвертора, яка зображена на рисунку 1.6, складається з блоку керування для визначення необхідної напруги та частоти, а також потужного інвертора для генерації 3 фазної напруги.

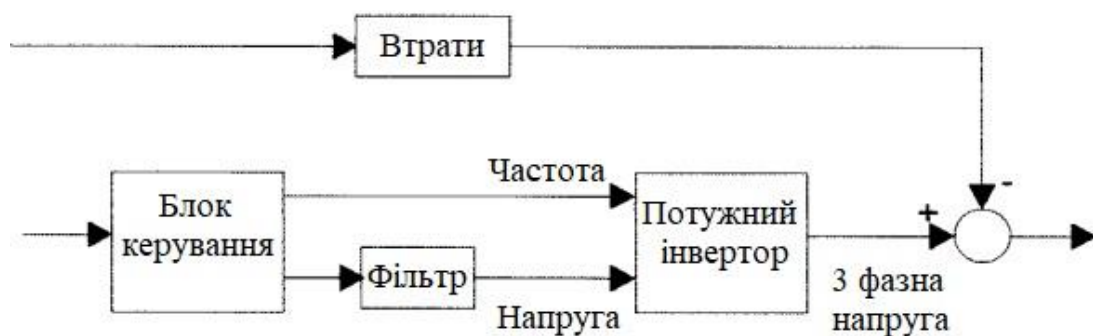


Рисунок 1.6 - Модель інвертора

Опір і ємність лінії зв'язку по постійному струмі аналогічні фільтру низьких частот на сигналі встановлення значення напруги. Струм навантаження використовується для визначення втрат інвертора, які потім віднімаються з фазних напруг.

### 1.3 Висновки до першого розділу

1. Технологічні лінії є основою харчової промисловості. Вони складаються з короткої секції ланцюгового конвеєра, що працює в поєднанні з дозатором продуктів. Такі системи мають два режими роботи: індексування та синхронізацію. Під час індексування конвеєр послідовно розміщує предмети, які встановлені на ньому, під дозатором продуктів у режимі стоп/старт.

2. Ланцюговий конвеєр складається з двох паралельних відрізків сталевих роликів ланцюга з конвеєрною поверхнею, утвореною з алюмінієвих пластин, прикріплених до поперечних деталей через рівні проміжки.

3. Дозатор складається із зварної каретки, що проходить над конвеєром, напрямком якої забезпечується алюмінієвими напрямними. Каретка з'єднана з петлею зубчастого ременя, що приводиться в рух з одного кінця за допомогою системи двигуна/пасового приводу, подібної до системи конвеєра. Підпружинені ролики в кутах каретки спираються на краї полозів і підтримують центрування каретки під час руху.

4. До складу загальної моделі технологічної лінії входить інвертор, асинхронний двигун, енкодер, приводний ремінь і відповідні шківи, а також конвеєр і дозатор.

5. З'єднання двигуна з конвеєром/дозатором забезпечує передавальне число, яке зменшує швидкість двигуна лише в 2 рази. Таким чином, приводу не потрібно буде працювати на високих швидкостях, тому модель є адекватною для імітації реакції часу системи.

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ

### 2.1 Математичні моделі складових компонентів технологічної лінії

Технологічні лінії складаються з короткої секції ланцюгового конвеєра, що працює в поєднанні з дозатором продуктів. Дозатор складається із зварної каретки, що проходить над конвеєром, напрямком якої забезпечується алюмінієвими напрямними. Каретка з'єднана з петлею зубчастого ременя, що приводиться в рух з одного кінця за допомогою системи двигуна/пасового приводу, подібної до системи конвеєра.

Модель ременя складається з пружини, маси та амортизатора, які зображені на рисунку 2.1 [24, 35]. Демпфування можна включити паралельно з кожним пружинним елементом, але воно незначне у порівнянні з іншими демпфуючими елементами в системі. Вхідний шків містить інерцію, лінійне та нелінійне демпфування, як для двигуна, так і для вхідного шківа.

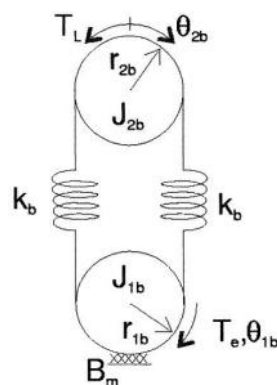


Рисунок 2.1 - Модель ременя [24, 35]

Рівняння для лінійної моделі, яка базується на наведених вище припущеннях, мають вигляд:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{1b} \\ \ddot{\theta}_{2b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2r_{1b}^2 k_b}{J_{1b}} & \frac{-B_m}{J_{1b}} & \frac{2r_{1b} r_{2b} k_b}{J_{1b}} & 0 \\ \frac{2r_{1b} r_{2b} k_b}{J_{2b}} & 0 & \frac{-2r_{1b} r_{2b} k_b}{J_{1b}} & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_{1b}} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_{1b}} \end{bmatrix} u(t) \quad (2.1)$$

$$y(t) = [\theta_{2b}, \dot{\theta}_{2b}, \ddot{\theta}_{2b}, J_{1b} \ddot{\theta}_{1b}, T_1, \dot{\theta}_{1b}]^T, \quad (2.2)$$

$$\text{де } x(t) = \begin{bmatrix} \theta_{1b} \\ \dot{\theta}_{1b} \\ \theta_{2b} \\ \dot{\theta}_{2b} \end{bmatrix};$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} T_e \\ T_l \end{bmatrix};$$

$T_e$  - електричний момент двигуна;

$T_l$  - крутний момент навантаження від механічної системи.

Загальний момент навантаження описується виразом:

$$T_{lb} = T_1 + J_{1b} \ddot{\theta}_{1b}. \quad (2.3)$$

Для того, щоб отримати прискорювальний момент, потрібно відняти загальний крутний момент навантаження від електричного крутного моменту двигуна.

Математичною моделлю ланцюгового конвеєра є поєднання ланцюга із конвеєрною поверхнею у вигляді послідовного з'єднання пружини, маси та амортизатора однакової довжини, як зображено на рисунку 2.2 [31].

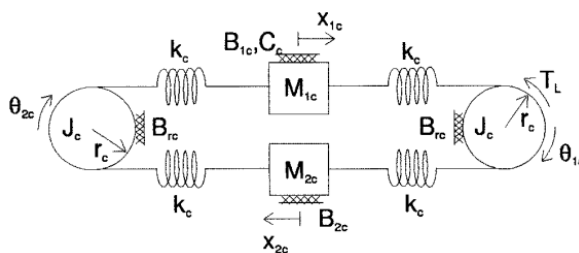


Рисунок 2.2 - Математична модель ланцюгового конвеєра [31]

Додаткові інерційні та амортизаційні умови представляють зірочки. Вхідними даними системи є рух вихідного шківa з моментом навантаження. Рівняння моделі конвеєра мають вигляд:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{1c} \\ \ddot{\theta}_{2c} \\ \ddot{x}_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2k_c}{M_{1c}} & \frac{-B_c}{M_{1c}} & \frac{r_c k_c}{M_{1c}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_c k_c}{J_c} & 0 & \frac{-r_c^2 2k_c}{J_c} & \frac{-B_{rc}}{J_c} & \frac{r_c k_c}{J_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_c k_c}{M_{1c}} & 0 & \frac{-2k_c}{M_{2c}} & \frac{-B_{2c}}{M_{2c}} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{r_c k_c}{M_{1c}} \\ 0 \\ \frac{r_c k_c}{M_{2c}} \end{bmatrix} u(t) \quad (2.4)$$

$$T_l = J_c \ddot{\theta}_{1c} + B_{rc} \dot{\theta}_{1c} + 2r_c^2 k_c \theta_{1c} - r_c k_c (x_{1c} + x_{2c}). \quad (2.5)$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta_{1b} \\ \dot{\theta}_{1b} \\ \theta_{2b} \\ \dot{\theta}_{2b} \end{bmatrix}; u(t) = [\theta_{1c}]. \quad (2.6)$$

Модель дозатора передбачає, що стрічка може бути представлена лінійною безмасовою пружиною. Оскільки ремінь під час стиснення демонструє незначну силу, можна об'єднати обидві сторони приводу та зворотний бік ременя в одну пружину, причому дві пружини використовуються в моделі, щоб представляти ремінь з обох боків візка, як зображено на рисунку 2.3.

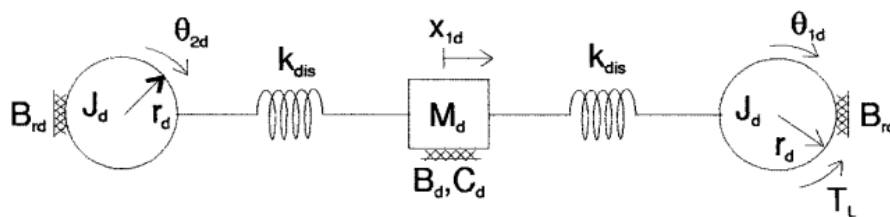


Рисунок 2.3 - Модель дозатора

Лінійні рівняння для такої системи задаються виразами:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{1d} \\ \ddot{\theta}_{2d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2k_{dis}}{M_d} & \frac{-B_d}{M_d} & \frac{r_d k_{dis}}{M_d} & 0 \\ \frac{r_d k_{dis}}{J_d} & 0 & \frac{-r_d^2 k_{dis}}{J_d} & \frac{-B_{rd}}{J_d} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} \frac{r_d k_{dis}}{M_d} \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \quad (2.7)$$

$$T_l = J_d \ddot{\theta}_{1d} + B_{rd} \dot{\theta}_{1d} + r_d k_{dis} (r_d \theta_{1d} - x_{1d}), \quad (2.8)$$

$$\text{де } x(t) = \begin{bmatrix} x_{1d} \\ \dot{x}_{1d} \\ \theta_{2d} \\ \dot{\theta}_{2d} \end{bmatrix}; u(t) = [\theta_{1d}].$$

Для того, щоб мати можливість порівняти продуктивність практичних контролерів, необхідно оцінити результати їх роботи за допомогою індексу ефективності. Для всіх контролерів кожна вісь починається з однієї точки та безперервно запускалася протягом 40 разів, положення останніх 20 одиниць реєструвалося на 100 Гц і усереднювалося.

Кожне випробування було проаналізовано для визначення середньої квадратичної помилки для всього профілю  $e_{\Pi}^2$ , середньої квадратичної помилки протягом часу дозування  $e_{\text{д}}^2$  і часу встановлення  $T_{\text{в}}$ . Час встановлення вимірюється від початку часу дозування до точки, коли система досягає та підтримує своє положення.

Щоб визначити продуктивність контролера, кожний параметр усереднюється в діапазоні показників. Значення для трьох середніх параметрів потім комбінуються за допомогою функції вартості, щоб отримати єдине значення, що вказує на загальну продуктивність контролера. Функція витрат  $J$  визначається за допомогою виразу (2.9).

$$J = \alpha_1 e_{\Pi}^2 + \alpha_2 T_{\text{в}} + \alpha_3 e_{\text{д}}^2, \quad (2.9)$$

де  $e_{\Pi}^2$  - середньо квадратична помилки для всього профілю;

$T_{\text{в}}$  - час встановлення;

$e_{\text{д}}^2$  - середньо квадратична помилка протягом часу дозування;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - вагові коефіцієнти, які дорівнюють 1, 2 і 3 відповідно.

Вважається важливим, щоб контролер утримував систему в межах специфікації протягом часу дозування, отже, тому його вага найвища. Короткий

час встановлення також дуже важливий, тоді як точність по всьому профілю є скоріше наслідком хороших результатів для попередніх двох значень.

Значення вагових параметрів, які були вищими за вказані, як правило, приділяли занадто багато уваги одному параметру, пригнічуючи вплив інших параметрів. Менший ваговий коефіцієнт не підкреслює належним чином ті параметри, які вважаються важливими.

## 2.2 Передавальна функція технологічної лінії

Складовими передавальної функції технологічної лінії є передавальні функції ланок технологічної лінії. Першою ланкою технологічної лінії є асинхронний двигун ланцюгового конвеєра технологічної лінії.

На кафедрі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Хмельницького національного університету за підтримки компанії АВВ створена лабораторія технічних засобів автоматизації. У складі лабораторії технічних засобів автоматизації є лабораторний макет, до складу якого входить асинхронний двигун M2AA112MB2 і частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, а також інтелектуальне реле Zelio Logic SR2 A201FU компанії Schneider Electric, які зображені на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Лабораторний макет технічних засобів автоматизації

В процесі розробки удосконаленого методу керування технологічною лінією, в якості приводного двигуна ланцюгового конвеєра технологічної лінії виберемо асинхронний двигун M2AA112MB2 компанії АВВ. Асинхронний двигун M2AA112MB2 має наступні технічні параметри, які наведені в таблиці 2.1 [32].

Таблиці 2.1 – Параметри асинхронного двигуна M2AA112MB2 [32]

Тип двигуна	$P_H$ , кВт	Маса, кг	$n_H$ , об/хв	$\eta$	$\cos$ $\varphi$	$I_H$ , А	$\frac{I_K}{I_H}$	$\frac{M_K}{M_H}$	$\frac{M_{max}}{M_H}$	J, кг·м <sup>2</sup>
M2AA112MB2	4,0	26	2895	0,848	0,89	7,6	7,2	2,7	3,3	0,0061

Виходячи із технічні параметри, які наведені в таблиці 2.1, визначимо номінальне ковзання асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.10):

$$s_H = \frac{n_s - n_H}{n_s} = \frac{3000 - 2895}{3000} = 0,035, \quad (2.10)$$

де  $n_s$  - синхронна швидкість;

$n_H$  - номінальна швидкість.

Визначимо критичне ковзання асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.11):

$$s_K = \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) s_H = \left( 2,7 + \sqrt{2,7^2 - 1} \right) 0,035 = 0,1823, \quad (2.11)$$

$$\text{де } m_k = \frac{M_K}{M_H} = 2,7.$$

Номінальна кутову швидкість асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.12):

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{2\pi n_{\text{H}}}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 2895}{60} = 303,203 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.12)$$

Кутова швидкість холостого ходу асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.13):

$$\omega_0 = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 3000}{60} = 314,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.13)$$

Номинальний момент асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.14):

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{H}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{4000}{303,203} = 13,192 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.14)$$

Критичний момент асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.15):

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,7 \cdot 13,192 = 35,62 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.15)$$

Розглянемо спрощену структурну схему асинхронного двигуна, яка складається з електромагнітної та механічної ланок, а також кола від'ємного зворотного зв'язку за кутовою швидкістю. Зовнішнє механічне навантаження на асинхронний двигун моделюється статичним механічним моментом  $M_{\text{с}}$ , як зображено на рисунку 2.5 [33].

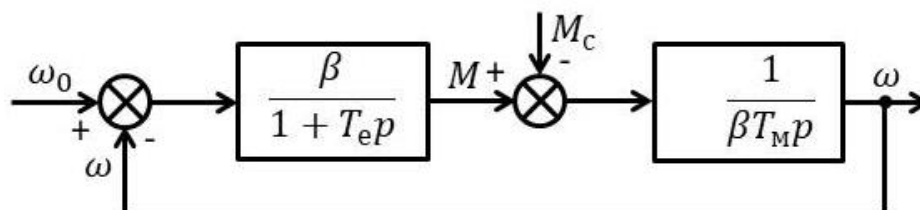


Рисунок 2.5 - Спрощена структурна схема асинхронного двигуна [33]

Модуль жорсткості  $\beta$  лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.16):

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{\text{ном}} s_k} = \frac{2 \cdot 35,62}{303,203 \cdot 0,1823} = 1,289. \quad (2.16)$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу  $T_e$  електричних кіл статора та ротора асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.17):

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 s_k} = \frac{1}{314,2 \cdot 0,1823} = 0,017 \text{ с}. \quad (2.17)$$

Електромеханічна постійна часу асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу (2.18):

$$T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{0,0061}{1,289} = 4,732 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \quad (2.18)$$

Спрощеній структурній схемі асинхронного двигуна відповідає спрощена передавальна функція асинхронного двигуна, яка описується виразом (2.19):

$$W_d(p) = \frac{1}{T_m T_t p^2 + T_m p + 1}. \quad (2.19)$$

Для керування швидкістю руху ланцюгового конвеєра технологічної лінії використаємо частотний перетворювач, який буде керувати частотою обертання асинхронного двигуна.

Оберемо частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ (рисунок 2.6), який входить до складу лабораторного макету, що розміщений у лабораторії технічних засобів автоматизації разом із асинхронний двигун M2AA112MB2 компанії АВВ.

Особливістю частотного перетворювача ACS150 є можливість його під'єднання з 1-фазним і 3-фазною напругою живлення. Перевагою частотного перетворювача ACS150 є те, що він має ряд вбудованих функцій, таких як ПД-регулятор, вбудований гальмівний резистор, ЕМС фільтр.



Рисунок 2.6 – Частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, який входить до складу лабораторного макету, що розміщений у лабораторії технічних засобів автоматизації

Передавальна функція частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу (2.20):

$$W_{\text{чп}}(p) = \frac{k_{\text{чп}}}{1 + T_{\text{чп}}p}. \quad (2.20)$$

Коефіцієнт передачі  $k_{\text{чп}}$  частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу (2.21):

$$k_{\text{чп}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_M}{p_{\text{п}} \cdot u_{\text{чпном}}} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50}{2 \cdot 10} = 15,708, \quad (2.21)$$

де  $f_M = 50$  Гц – частота мережі;

$p_{\text{п}} = 2$  – число пар полюсів асинхронного двигуна M2AA112MB2

$u_{\text{чпном}} = 10$  В – номінальна напруга на вході частотного перетворювача ACS150.

Постійна часу кола керування частотного перетворювача ACS150 при високих частотах модуляції вихідної напруги дорівнює  $T_{\text{чп}} = 0,001$ .

Враховуючи вище наведені параметри, передавальну функцію частотного перетворювача ACS150 можна записати у вигляді (2.22):

$$W_{\text{чп}}(p) = \frac{15,708}{1 + 0,001p}. \quad (2.22)$$

Особливістю частотного перетворювача ACS150 є реалізація ПІД керування за допомогою спеціального макросу. ПІД-регулятор задає пропорційний, інтегральний та диференціальний закон регулювання, який описується виразом (2.23):

$$U_{\text{ПІД}}(t) = k_{\text{п}} \varepsilon(t) + k_{\text{i}} \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_{\text{д}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2.23)$$

де  $k_{\text{п}}$  - коефіцієнт пропорційної ланки ПІД-регулятора;

$\varepsilon(t)$  - похибка керування;

$k_{\text{i}}$  - коефіцієнт інтегральної ланки ПІД-регулятора;

$k_{\text{д}}$  - коефіцієнт диференційної ланки ПІД-регулятора.

Передавальна функція ПІД-регулятора частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу (2.24):

$$W_{\text{ПІД}}(p) = \frac{k_{\text{д}} p^2 + k_{\text{п}} p + k_{\text{i}}}{p}. \quad (2.24)$$

Враховуючи передавальні функції усіх складових технологічної лінії, спрощена структурна схема керування технологічною лінією зображена на рисунку 2.7. До складу спрощеної структурної схеми керування технологічною лінією входить ланка від'ємного зворотного зв'язку із коефіцієнтом передачі  $k_{зз}$ .

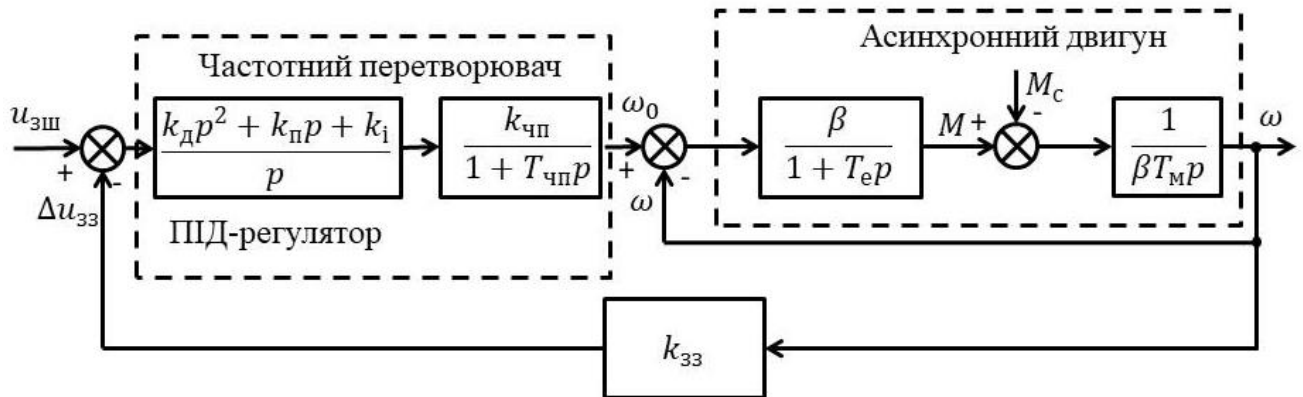


Рисунок 2.7 - Спрощена структурна схема керування технологічною лінією

Коефіцієнт передачі  $k_{зз}$  ланки від'ємного зворотного зв'язку визначається за допомогою виразу (2.25):

$$k_{зз} = \frac{u_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{1}{303,203} = 0,0033. \quad (2.25)$$

### 2.3 Удосконалений метод керування технологічною лінією

Пропонується удосконалений метод керування технологічною лінією для забезпечення точного відстеження позиції за допомогою ПІД контролера, підвищення продуктивності шляхом збільшення швидкості роботи технологічної лінії.

Особливістю запропонованого удосконаленого методу керування технологічною лінією є те, що використовується частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, до складу якого входить ПІД-регулятор.

Розглянемо налаштування ПІД-регулятора частотного перетворювача ACS150 компанії АВВ у відповідності до його інструкції використання [34]. На

рисунку 2.8 зображені стандартні кола входів/виходів частотного перетворювача ACS150 компанії ABB.

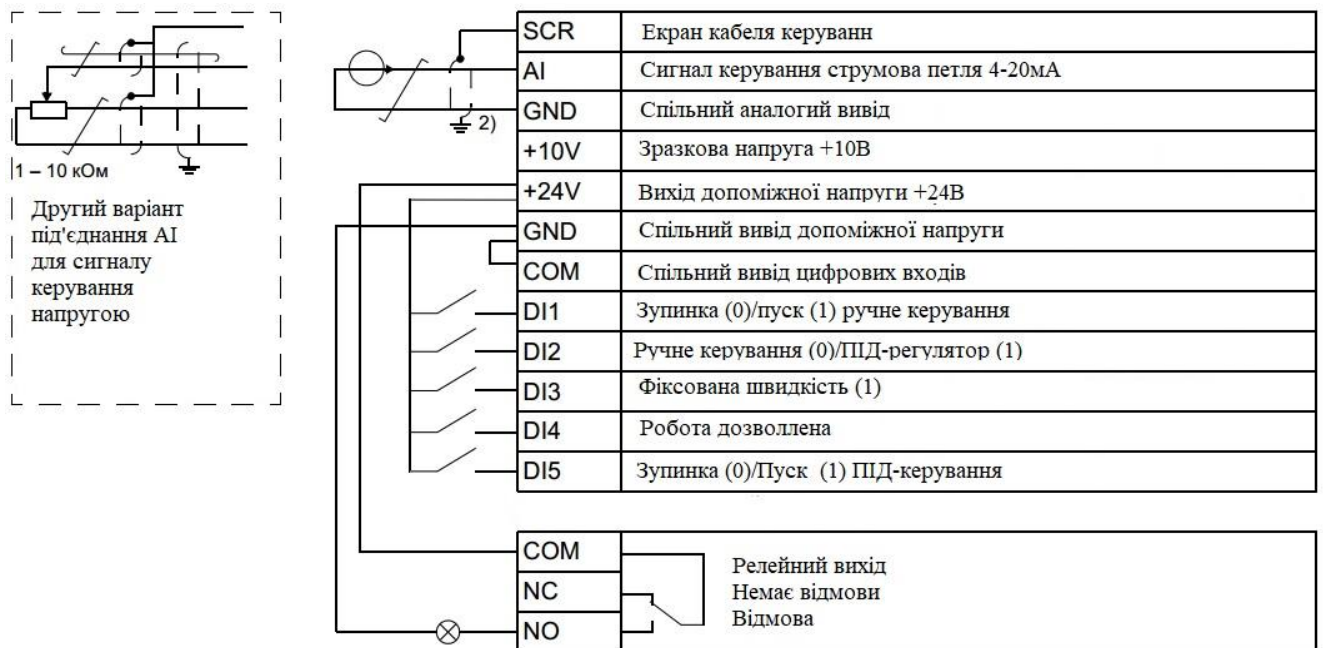


Рисунок 2.8 - Стандартні кола входів/виходів частотного перетворювача ACS150 компанії ABB [34]

ПД-регулятор частотного перетворювача ACS150 може використовуватися для регулювання таких змінних технологічного процесу, як швидкість руху конвеєра. При ПД-керуванні завдання змінної технологічного процесу (уставка) формується вбудованим потенціометром приводу.

Поточне значення (сигнал зворотного зв'язку по регульованій величині) подається на аналоговий вхід приводу. Функція ПД-керування процесом встановлює швидкість обертання приводу таким чином, щоб підтримувати технологічний параметр (поточне значення) на заданому рівні (уставка).

Можливе перемикання між регулюванням параметра технологічного процесу та регулюванням швидкості обертання двигуна. Декілька входів і виходів сигналів керування закріплюються за регулюванням технологічного процесу, інші - за регулюванням швидкості. Один цифровий вхід служить для вибору між регулюванням процесу та регулюванням швидкості обертання двигуна.

Для налаштування ПІД-регулятор частотного перетворювача ACS150 використовується макрос ПІД-керування користувача. Користувач може зберегти у постійній пам'яті стандартний макрос, налаштований на конкретне застосування, тобто встановлені значення параметрів та згодом використовувати ці дані.

Цей макрос забезпечує налаштування параметрів для систем регулювання зворотним зв'язком, наприклад швидкості руху ланцюгового конвеєра. Можливе також перемикання на регулювання швидкості за допомогою цифрового входу.

Прикладні макроси – це попередньо запрограмовані набори параметрів. При запуску частотного перетворювача ACS150 користувач за допомогою параметра 9902 ПРИКЛ. МАКРОС вибирає макрос, який найкраще підходить для реалізації функції керування, вносить необхідні зміни та зберігає результат як макрос користувача.

Привід частотного перетворювача ACS150 має шість стандартних макросів та три макроси користувача. Розгляне методику налаштування частотного перетворювача ACS150 для реалізації ПІД-керування. Схематично, послідовність налаштування частотного перетворювача ACS150 для реалізації ПІД-керування зображена на рисунку 2.9.

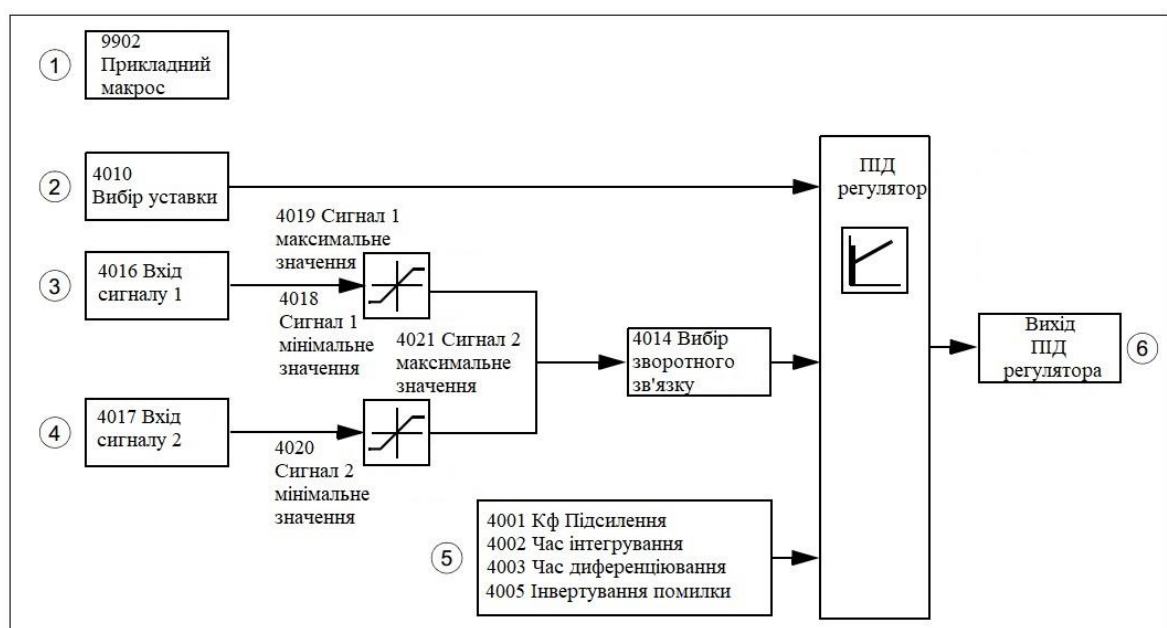


Рисунок 2.9 - Послідовність налаштування частотного перетворювача ACS150

Основними параметрами ПД-регулятора частотного перетворювача ACS150 є коефіцієнт підсилення ПД-регулятора. Занадто велике значення коефіцієнт підсилення ПД-регулятора може спричинити коливання швидкості.

Якщо значення коефіцієнт підсилення ПД-регулятора дорівнює 0,1, то зміна вихідного сигналу ПД-регулятора становить 1/10 величини помилки (узгодження). Якщо значення коефіцієнт підсилення ПД-регулятора дорівнює 100, то зміна вихідного сигналу ПД-регулятора у 100 разів перевищує величину неузгодженості.

Час інтегрування ПД-регулятора визначає швидкість зміни вихідного сигналу регулятора швидкості за постійного значення неузгодженості.

Що коротший час інтегрування ПД-регулятора, то швидше компенсується тривале неузгодженість. Занадто малий час інтегрування може спричинити нестійке регулювання.

Час диференціювання ПД-регулятора визначає час, протягом якого здійснюється операція диференціювання.

Операція диференціювання служить збільшення вихідного сигналу регулятора за зміни величини неузгодженості. Чим більший час диференціювання, тим більше зростає вихідний сигнал у процесі зміни. Диференціювання збільшує чутливість системи управління до збурюючих впливів.

Інвертування помилки здійснює вибір залежності між сигналом зворотного зв'язку та швидкістю приводу (вихідною частотою приводу). Пряма залежність: зменшення сигналу зворотного зв'язку збільшує швидкість приводу (вихідну частоту приводу). Розузгодження=завдання-сигнал зворотного зв'язку. Зворотна залежність: Зменшення сигналу зворотного зв'язку зменшує швидкість приводу (вихідну частоту приводу). Узгодження=сигнал зворотного зв'язку-завдання.

## 2.4 Висновки до другого розділу

1. Математичною моделлю ланцюгового конвеєра є поєднання ланцюга із конвеєрною поверхнею у вигляді послідовного з'єднання пружини, маси та амортизатора однакової довжини.

2. Складовими передавальної функції технологічної лінії є передавальні функції ланок технологічної лінії. Першою ланкою технологічної лінії є асинхронний двигун ланцюгового конвеєра технологічної лінії.

3. Спрощена структурна схема асинхронного двигуна складається з електромагнітної та механічної ланок, а також кола від'ємного зворотного зв'язку за кутовою швидкістю.

4. Для керування швидкістю руху ланцюгового конвеєра технологічної лінії використано частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, який буде керувати частотою обертання асинхронного двигуна.

5. Особливістю запропонованого удосконаленого методу керування технологічною лінією є те, що використовується частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, до складу якого входить ПД-регулятор.

6. Для налаштування ПД-регулятор частотного перетворювача ACS150 використали макрос ПД-керування користувача. Користувач може зберегти у постійній пам'яті стандартний макрос, налаштований на конкретне застосування, тобто встановлені значення параметрів та згодом використовувати ці дані.

7. Макрос забезпечує налаштування параметрів для систем регулювання зворотним зв'язком, наприклад швидкості руху ланцюгового конвеєра. Можливе також перемикання на регулювання швидкості за допомогою цифрового входу.

### 3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ

#### 3.1 Імітаційна модель процесу керування асинхронним двигуном за допомогою частотного перетворювача

Імітаційне моделювання – це метод дослідження об'єктів, який базується на тому, що досліджуваний об'єкт замінюється імітуючим об'єктом. Для проведення імітаційного моделювання моделі процесу керування технологічною лінією будемо використовувати середовище MATLAB (аббревіатура від «MATrix LABoratory»), яке розроблене компанією MathWorks. Розробку імітаційної моделі процесу керування технологічною лінією будемо виконувати у середовищі Simulink.

Simulink - це середовище графічного програмування на основі MATLAB для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем. Головним компонентом технологічної лінії є асинхронний двигун M2AA112MB2 компанії ABB. Для моделювання асинхронних двигунів в середовищі MATLAB/Simulink є модель асинхронної машини, яка зображена на рисунку 3.1.

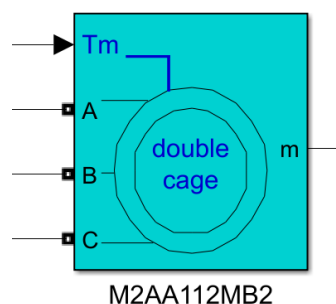


Рисунок 3.1 - Модель асинхронної машини в середовищі MATLAB/Simulink

Обмотки статора і ротора асинхронної машини в середовищі MATLAB/Simulink з'єднані зіркою з внутрішньою нейтральною точкою. Блок працює в режимі генератора або двигуна. Режим роботи визначається знаком механічного крутного моменту  $T_m$ : якщо  $T_m$  додатне, машина працює як двигун, а якщо  $T_m$  від'ємне, машина працює як генератор.

Електрична частина асинхронної машини представлена моделлю простору станів четвертого порядку (або шостого порядку для машини з подвійною білячою кліткою), а механічна частина - системою другого порядку. Усі електричні змінні та параметри відносяться до статора, який позначається штрихами в рівняннях асинхронної машини. Усі величини статора та ротора знаходяться в довільній двовісній системі відліку (dq-система).

В процесі створення моделі асинхронного двигуна M2AA112MB2 в середовищі MATLAB/Simulink відкривається вікно встановлення параметрів моделі, яке зображено на рисунку 3.2.

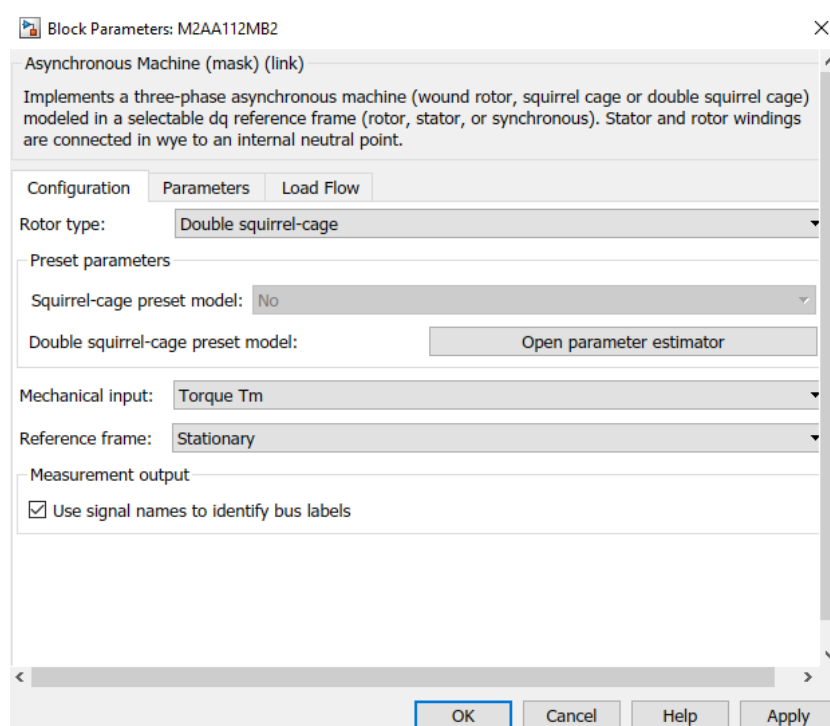


Рисунок 3.2 - Вікно встановлення параметрів моделі асинхронного двигуна M2AA112MB2

Першою вкладкою є конфігурація моделі асинхронного двигуна (Configuration), у якій встановлюємо тип ротора (Rotor type) - подвійна білчина клітка (Double squirrel-cage). Далі потрібно задати попередньо встановлені параметри (Preset parameters) шляхом вибору попередньо встановленої моделі подвійної білчиної клітки (Double squirrel-cage preset model) та розрахунку параметрів моделі асинхронного двигуна за допомогою функції `power_AynchronousMachineParams`.

Функції `power_AynchronousMachineParams` відкриває графічний інтерфейс користувача для обчислення параметрів моделі асинхронного двигуна на основі стандартних специфікацій виробника.

Компанія АВВ, яка є виробником асинхронного двигуна M2AA112MB2, надає параметри, що наведені в таблиці 3.1 [32].

Таблиці 3.1 – Параметри асинхронного двигуна M2AA112MB2 [32]

Тип двигуна	$P_n$ , кВт	Маса, кг	$n_n$ , об/хв	$\eta$	$\cos$ $\varphi$	$I_n$ , А	$\frac{I_k}{I_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	J, кг·м <sup>2</sup>
M2AA112MB2	4,0	26	2895	0,848	0,89	7,6	7,2	2,7	3,3	0,0061

На рисунку 3.3 зображено вигляд інтерфейсу користувача функції `power_AynchronousMachineParams` із введеними параметрами асинхронного двигуна M2AA112MB2, які наведені в таблиці 3.1, та обчисленими параметрами моделі асинхронного двигуна.

Вхідні параметри функції `power_AynchronousMachineParams`.

1. Номінальна середньоквадратична напруга між лініями  $V_n=400$  В.
2. Номінальна частота  $f_n=50$  Гц.
3. Номінальний струм лінії (при повному навантаженні)  $I_n=7,6$  А.

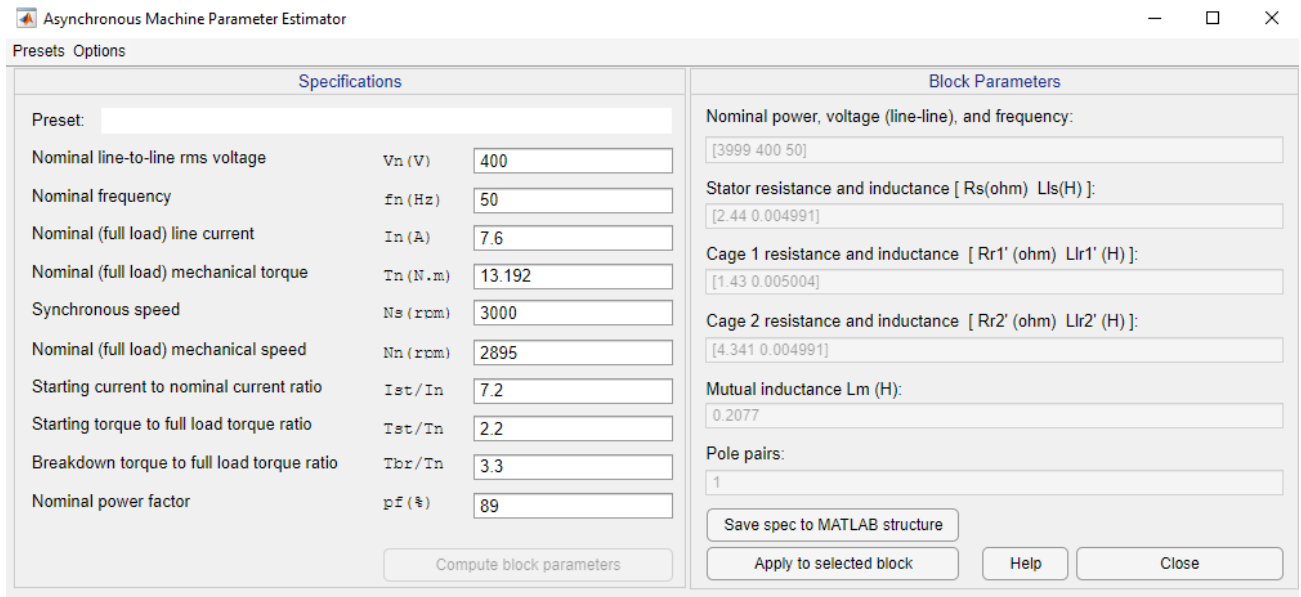


Рисунок 3.3 - Інтерфейс користувача функції power\_AsynchronousMachineParams

4. Номінальний крутний момент (при повному навантаженні)  
 $T_n = 13,192 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

5. Синхронна швидкість  $N_s = 3000$  об/хв.

6. Номінальна механічна швидкість (при повному навантаженні)  
 $N_n = 2895$  об/хв.

7. Співвідношення пускового струму до номінального  $I_{st}/I_n = 7,2$ .

8. Співвідношення пускового крутного моменту до повного навантаження  
 $T_{st}/T_n = 2,7$ .

9. Співвідношення крутного моменту руйнування до моменту повного навантаження  $T_{br}/T_n = 3,3$ .

10. Номінальний коефіцієнт потужності  $pf = 89\%$ .

В результаті обчислень отримуємо блок параметрів (Block parameters).

1. Номінальна потужність, напруга (лінія-лінія) і частота: [3999 400 50].

2. Опір та індуктивність статора: [2,44 0,004991].

3. Опір і індуктивність клітки 1: [1,43 0,005004].
4. Опір і індуктивність клітки 2: [4,341 0,004991].
5. Взаємна індуктивність  $L_m=0,2077$ .
6. Пари полюсів: 1.

Побудуємо графіки залежності крутного моменту та струму статора від швидкості обертання ротора за допомогою команд:

```
>> options.DrawGraphs = 1;
```

```
>> options.DisplayDetails = 0;
```

```
>> params = power_AsynchronousMachineParams(spec,options);
```

Графіки залежності крутного моменту та струму статора від швидкості обертання ротора зображені на рисунку 3.4

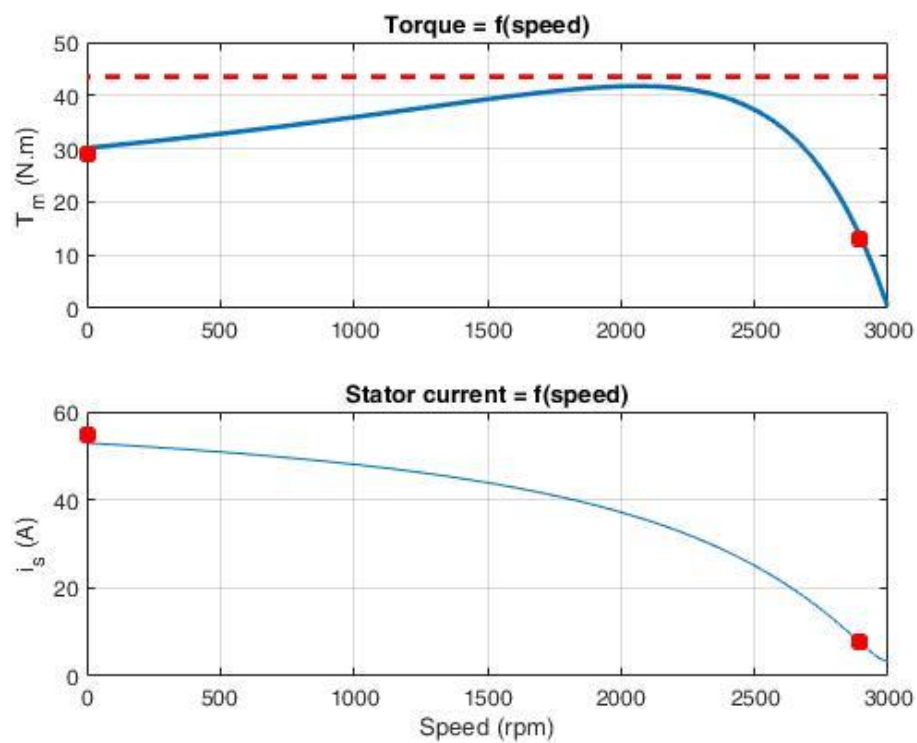


Рисунок 3.4 - Графіки залежності крутного моменту та струму статора від швидкості обертання ротора



імітувати ефект згладжуючої реактивності, розміщеної між інвертором і двигуном.

Момент навантаження, прикладений до валу двигуна, є постійним і встановлено на номінальне значення 13,192 Н·м. Задане значення швидкості встановлено на 1,0 р/с або 2895 об/хв. Ця швидкість досягається через 0,25 с, як зображено на рисунку 3.6.

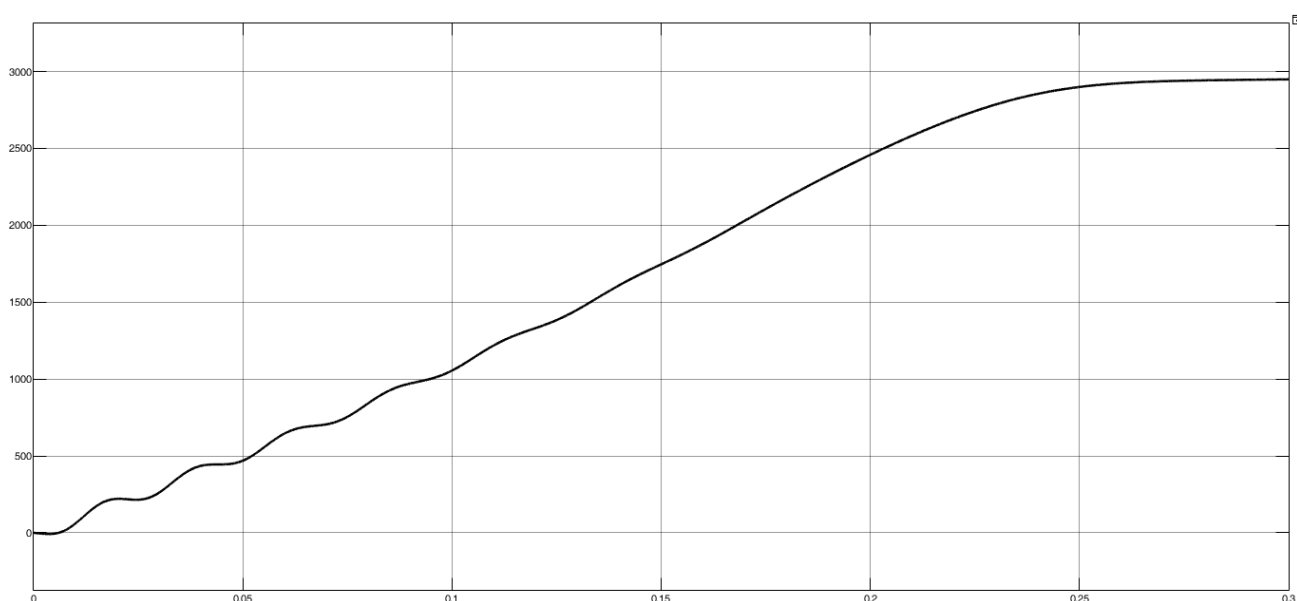


Рисунок 3.6 - Зміна швидкості обертання асинхронним двигуном M2AA112MB2

Крок максимального часу обмежено 10 мікросекундами. Це необхідно через відносно високу частоту комутації 1650 Гц інвертора.

Струми ротора та статора характеризуються високим рівнем шуму, незважаючи на використання згладжувального фільтра, як зображено на рисунку 3.7. Шум, створений ШІМ-інвертором, також спостерігається на графіку сигналу Те електромагнітного моменту, який зображений на рисунку 3.8. Однак інерція двигуна запобігає появі цього шуму на графіку сигналу швидкості двигуна, який зображений на рисунку 3.6.

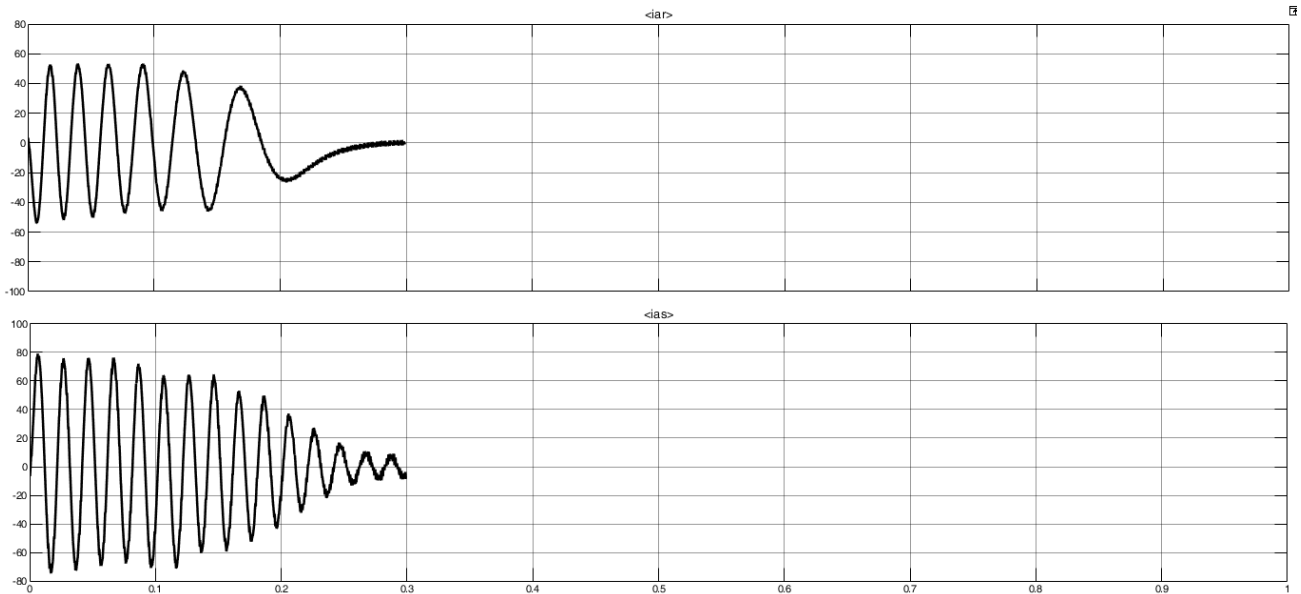


Рисунок 3.7 – Графік зміни струмів ротора та статора у часі

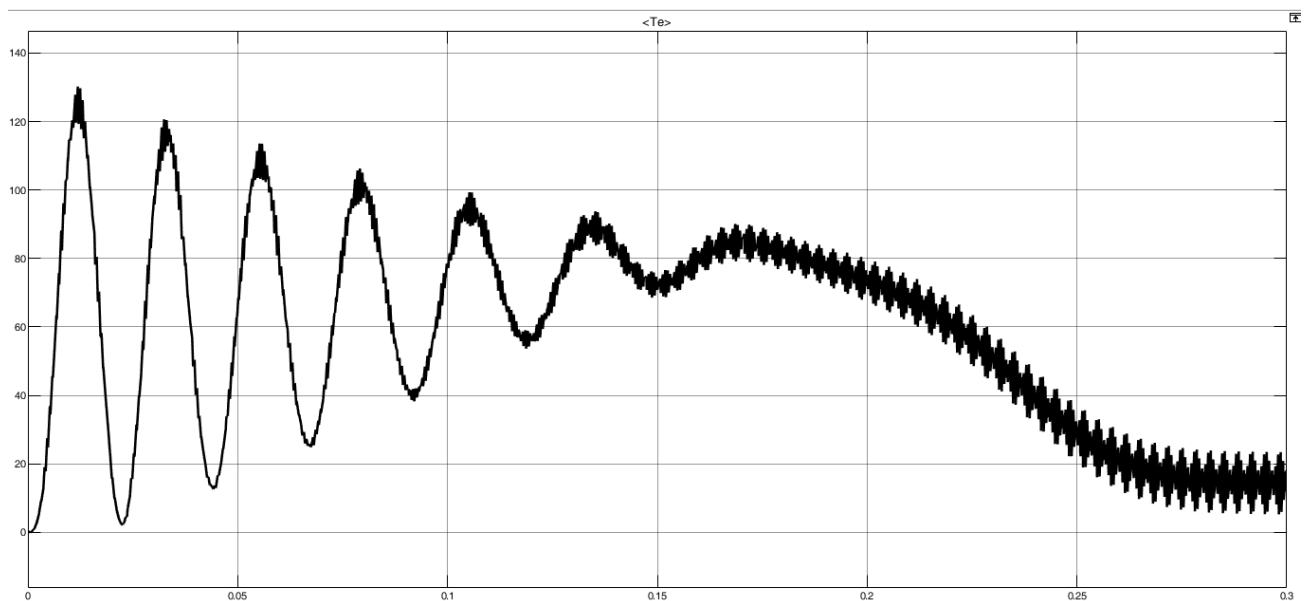


Рисунок 3.8 – Графік зміни електромагнітного моменту в часі

Середньоквадратичне значення основної складової лінійної напруги на клеммах статора асинхронного двигуна M2AA112MB2 вимірюється блоком Фур'є. Вихідний сигнал ШІМ-інвертора зображений на рисунку 3.9.

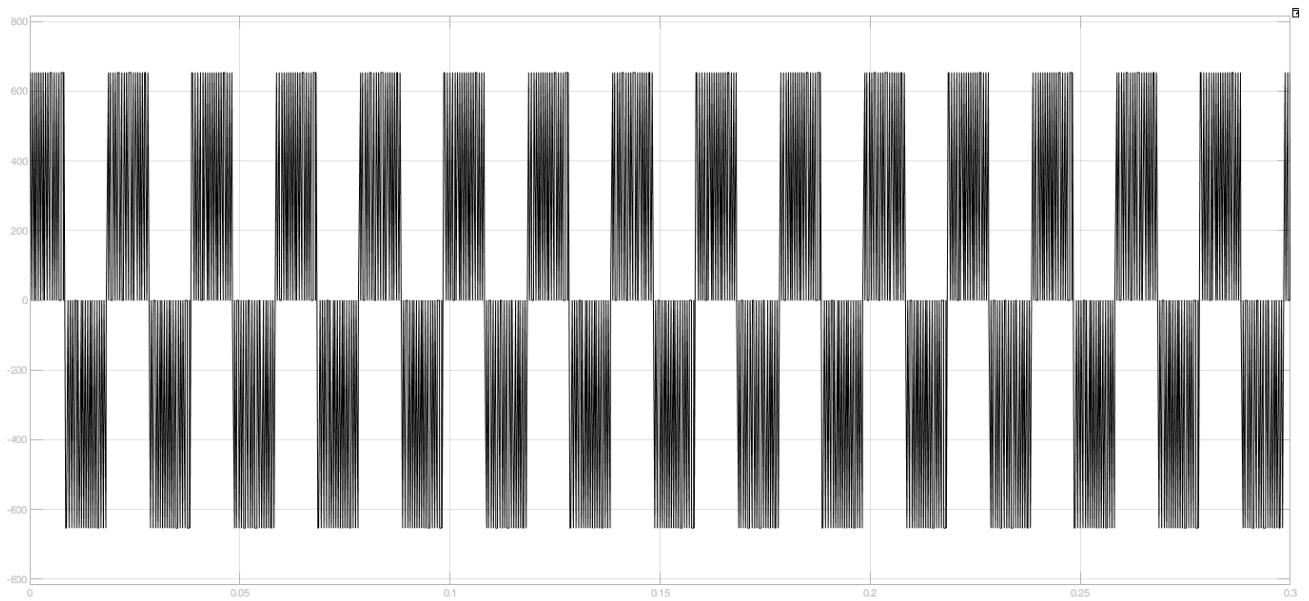


Рисунок 3.9 – Графік зміни вихідного сигналу ШІМ-інвертора в часі

### 3.2 Імітаційна модель процесу керування технологічною лінією за допомогою ПІД-регулятора

Процес керування технологічною лінією за допомогою ПІД-регулятора полягає у регулюванні швидкості руху ланцюгового конвеєра технологічної лінії шляхом регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна M2AA112MB2 за допомогою ПІД-регулятора частотного перетворювача ACS150.

Розглянемо імітаційну модель процесу налаштування ПІД регулятора частотного перетворювача ACS150 для керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 за допомогою кола зворотного зв'язку, яка зображена на рисунку 3.10.

Імітаційна модель процесу налаштування ПІД регулятора частотного перетворювача ACS150 базується на поле-орієнтованому методі керування. У поле-орієнтованому методі керування здійснюється управління 3-фазними струмами статора у векторній формі.

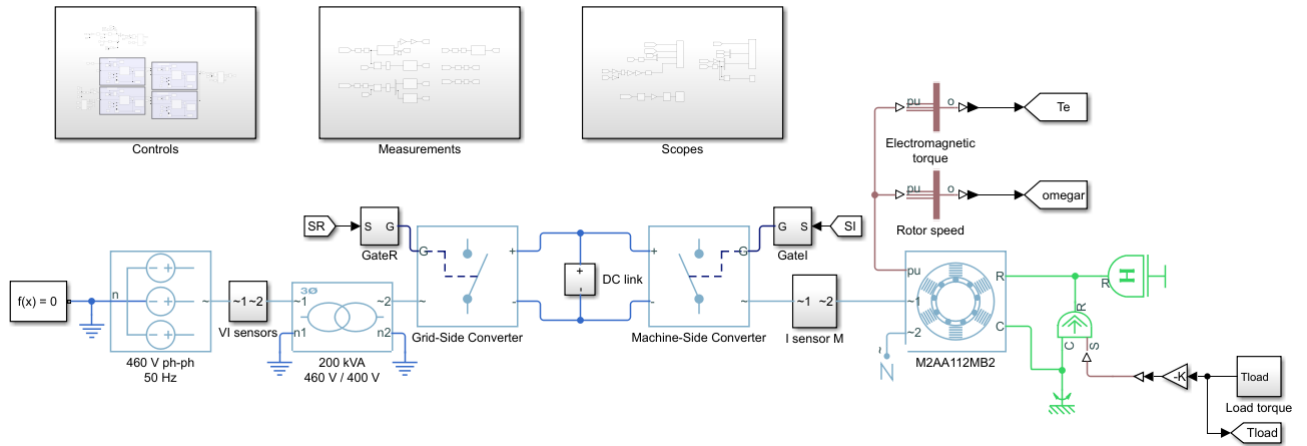


Рисунок 3-10 - Імітаційна модель процесу налаштування ПД регулятора частотного перетворювача ACS150

Поле-орієнтований метод керування базується на проєкціях, які перетворюють 3-фазову систему, залежну від часу та швидкості, у двокоординатну систему, яка не змінюється в часі. Поле-орієнтований метод керування базується на перетворенні Кларка, перетворенні Парка та їх відповідними обернених перетвореннях. Ці перетворення реалізовані у вигляді блоків у підсистемі Controls, імітаційна модель якої зображена на рисунку 3.11.

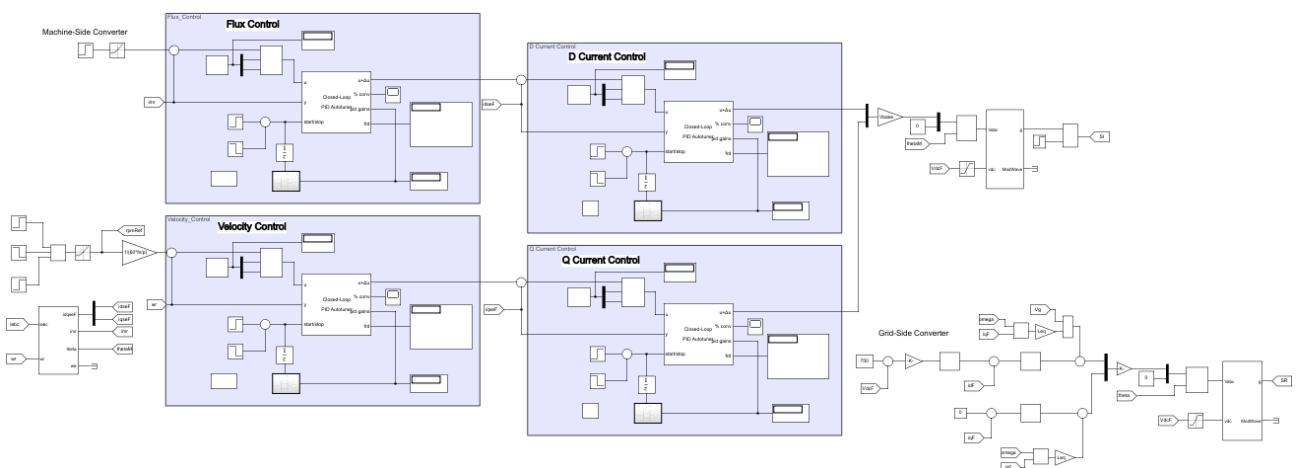


Рисунок 3.11 - Імітаційна модель підсистеми Controls

Переваги поле-орієнтованого методу керування двигунами змінного струму полягають в наступному.

1. Крутний момент і потік контролюються безпосередньо та окремо.
2. Точне керування перехідними і стаціонарними режимами.
3. Ефективність керування наближається до ефективності керування двигунами постійного струму.

Підсистема Controls містить усі чотири ПД-контролери. ПД-регулятор зовнішнього контуру регулює швидкість двигуна. ПД-регулятор потоку зовнішнього контуру регулює потік статора. Два ПД-контролери внутрішнього контуру окремо керують струмами по осі  $d$  і осі  $q$ . Команда від ПД-регулятора швидкості зовнішнього контуру безпосередньо подається на вісь  $q$  для керування крутним моментом. Команда для осі  $d$  відмінна від нуля для двигуна змінного струму і є результатом ПД-регулятора потоку зовнішнього контуру.

В імітаційній моделі ПД регулятора частотного перетворювача ACS150 використовувалися наступні коефіцієнти ПД-регуляторів.

1. Коефіцієнти ПД-регулятора швидкості:  $P=65,47$ ,  $I=3134,24$  та  $D=0$ .
2. Коефіцієнти ПД-регулятора потоку:  $P=52,22$ ,  $I=2790,51$  та  $D=0$ .
3. Коефіцієнти ПД-регулятора по осі  $D$ :  $P=1,08$ ,  $I=207,58$  та  $D=0$ .
4. Коефіцієнти ПД-регулятора по осі  $Q$ :  $P = 1,08$ ,  $I = 210,02$  та  $D=0$ .

Коефіцієнти ПД-регулятора контролера зберігаються в блоці пам'яті сховища даних і надаються зовні для кожного блоку ПД-регулятора. Після завершення процесу налаштування контролера нові налаштовані коефіцієнти записуються в блок пам'яті сховища даних. Ця конфігурація дозволяє оновлювати підсилення контролера в режимі реального часу під час симуляції.

Блок ПД-регулятора замкнутого кола зворотного зв'язку дозволяє налаштовувати один ПД-регулятор за один процес симуляції. Блок ПД-

регулятора вводять синусоїдальні сигнали збурення на вході системи та вимірюють вихідну потужність двигуна змінного струму під час експерименту із замкнутим контуром.

Коли експеримент зупиняється, блок обчислює коефіцієнти ПІД-регулятора контролера на основі частотних характеристик двигуна змінного струму, оцінених у невеликій кількості точок поблизу бажаної смуги пропускання. Для цієї моделі поле-орієнтованого методу керування двигуном змінного струму блок автоналаштування ПІД-регуляторів із замкнутим контуром керування може використовуватися для кожного з чотирьох ПІД-регуляторів.

Цей процес застосовується, якщо у є початкові контролери, які необхідно переналаштувати за допомогою блоку автонастроювання ПІД-регулятора із замкнутим контуром керування. Переваги методу автоналаштування ПІД-регуляторів полягають у наступному.

Якщо під час експерименту виникає несподіване порушення, воно відхиляється існуючим контролером для забезпечення безпечної роботи.

Існуючий контролер підтримує роботу системи поблизу її номінальної робочої точки, пригнічуючи сигнали збурень.

При використанні замкнутого блоку автоналаштування ПІД-регуляторів як для моделювання, так і для додатків у реальному часі необхідно дотримуватися наступних умов.

1. Об'єкт повинен бути або асимптотично стійким (всі полюси суворо стабільні), або інтегруючим. Блок автоналаштування ПІД-регуляторів не працює при нестабільному об'єкті керування.

2. Контур зворотного зв'язку з контролером керування повинен бути також стабільним.

Щоб точніше оцінити частотні характеристики двигуна змінного струму в реальному часі, потрібно звести до мінімуму виникнення будь-яких збурень у

моделі поле-орієнтованого методу керування під час експерименту. Блок автоналаштування очікує, що вихідний сигнал двигуна змінного струму буде відповіддю лише на введені сигнали збурення.

Оскільки під час експерименту контур зворотного зв'язку замкнутий, наявний контролер також пригнічує введені сигнали збурення. Перевага використання експерименту із замкнутим контуром зворотного зв'язку полягає в тому, що контролер підтримує роботу двигуна змінного струму поблизу номінальної робочої точки та підтримує безпечну роботу. Недоліком є те, що це знижує точність оцінки частотної характеристики, якщо цільова смуга пропускання далека від поточної смуги пропускання.

Оскільки блок ПІД-регулятора замкнутого контуру зворотного зв'язку налаштовує лише один ПІД-регулятор за раз, чотири контролери повинні налаштовуватися окремо в моделі поле-орієнтованого методу керування двигуном змінного струму. Спочатку здійснюється налаштування контролерів внутрішнього контуру, а потім здійснюється налаштування контролерів зовнішнього контуру.

Регулятор струму осі  $d$  налаштовується між 3,5 і 3,55 с.

Регулятор струму по осі  $q$  налаштовується між 3,6 і 3,65 с.

Регулятор потоку налаштовується між 3,7 і 4,7 с.

Регулятор швидкості налаштований між 4,8 і 5,8 с.

Після налаштування кожного ПІД-регулятора його коефіцієнти оновлюються через блок пам'яті сховища даних.

Сценарії симуляції включають процес прискорення та зміни навантаження крутного моменту двигуна змінного струму величиною 1 р.у. На рисунку 3.12 зображено графіки зміни у часі струмів статора, електричного моменту та моменту навантаження, швидкості обертання ротора та заданої швидкості обертання ротора двигуна змінного струму.

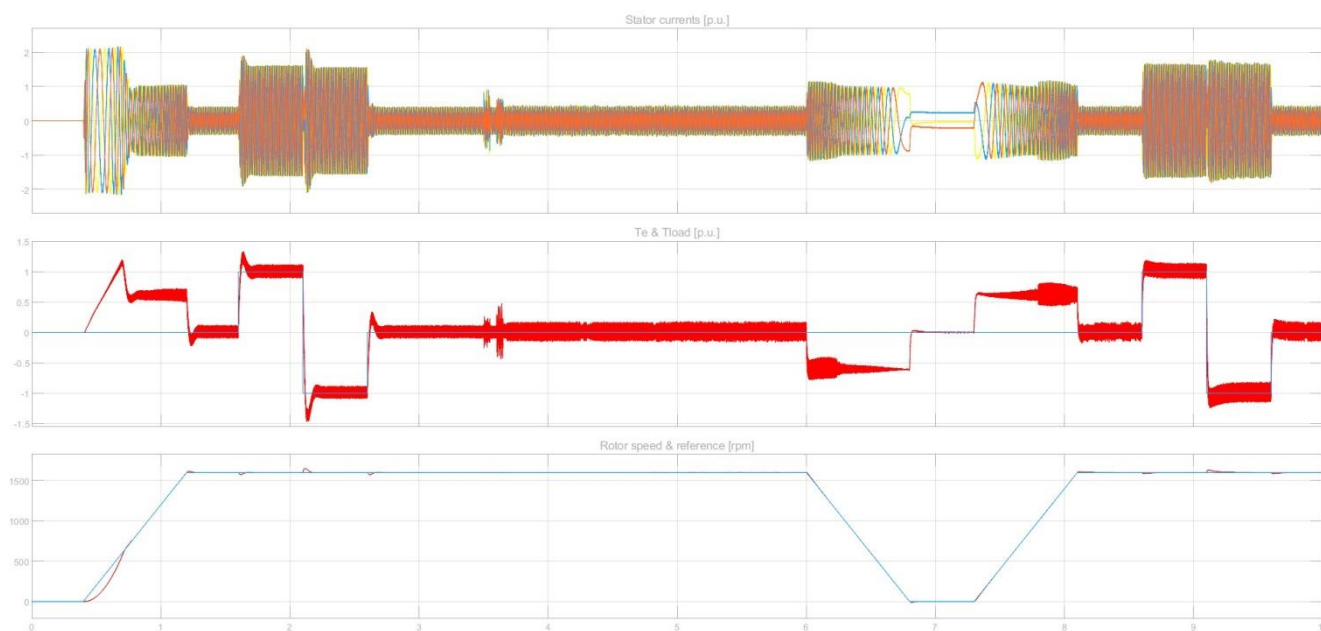


Рисунок 3.12 - Графіки зміни у часі струмів статора, електричного моменту та моменту навантаження, швидкості обертання ротора та заданої швидкості обертання ротора двигуна змінного струму

До та після процесу автонастроювання застосовуються однакові опорні значення швидкості ротора та навантаження крутного моменту. На рисунку 3.13 зображені графіки похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора 1600 об/хв до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПІД-регулятора із замкнутим контуром.

Аналіз графіків похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора 1600 об/хв до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПІД із замкнутим контуром показує, що при зростанні частоти обертання ротора до 1600 об/хв. максимальне значення похибки складає 25 об/хв. у відповідності до синьої кривої на рисунку 3.13.

Після налаштування автоналаштування ПІД-регулятора максимальне значення похибки складає близько 13 об/хв. при зростанні частоти обертання ротора до 1600 об/хв. у відповідності до червоної кривої на рисунку 3.13.

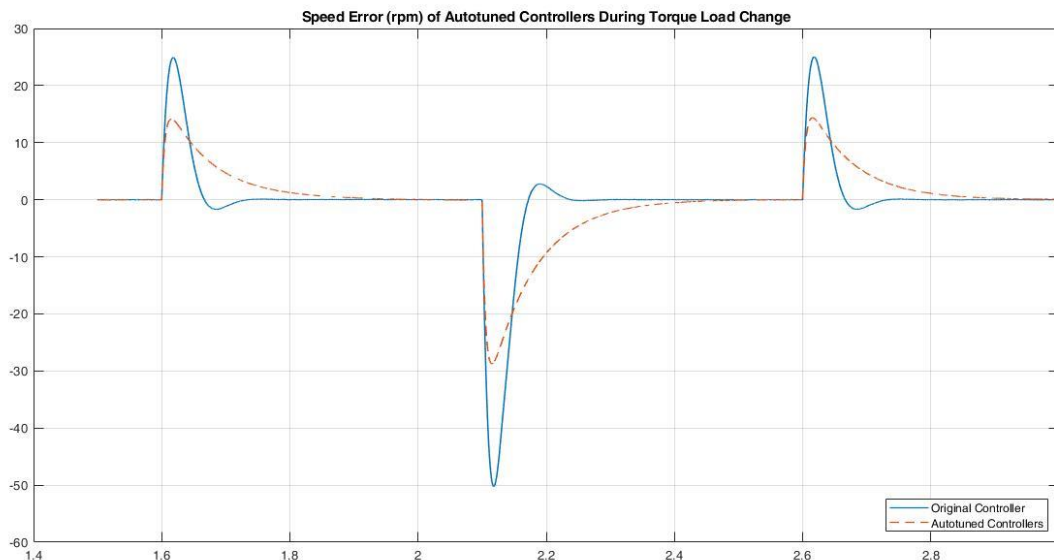


Рисунок 3.13 - Графіки похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора 1600 об/хв до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром

В процесі дії на двигун моменту навантаження в момент часу 2,1 с, максимальне значення похибки складає -60 об/хв. у відповідності до синьої кривої на рисунку 3.13.

Після налаштування автоналаштування ПД-регулятора максимальне значення похибки складає близько -28 об/хв. у відповідності до червоної кривої на рисунку 3.13.

Криві похибок швидкості вирівнюються в часі, щоб порівняти характеристики контролерів. Після налаштування контролерів швидкісна характеристика асинхронного двигуна має швидшу перехідну реакцію та меншу похибку сталого стану під час прискорення та коли змінюється навантаження крутного моменту.

На рисунку 3.14 зображені графіки похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів за

допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром в момент прискорення.

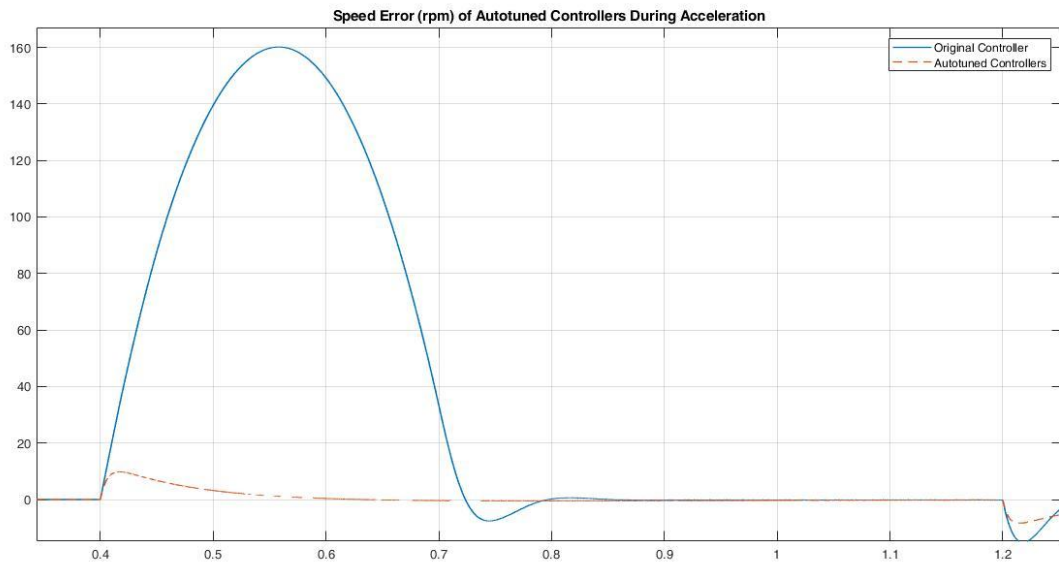


Рисунок 3.14 - Графіки похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром в момент прискорення.

Аналіз графіків похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром показує, що в момент прискорення максимальне значення похибки складає 160 об/хв. у відповідності до синьої кривої на рисунку 3.14.

Після налаштування автоналаштування ПД-регулятора максимальне значення похибки в момент прискорення складає близько 10 об/хв. у відповідності до червоної кривої на рисунку 3.14.

Окрім підсистеми Controls до складу імітаційної моделі процесу налаштування ПІД регулятора частотного перетворювача ACS150 входять також підсистеми Measurements та Scores.

Імітаційна модель підсистеми Measurements зображена на рисунку 3.15.

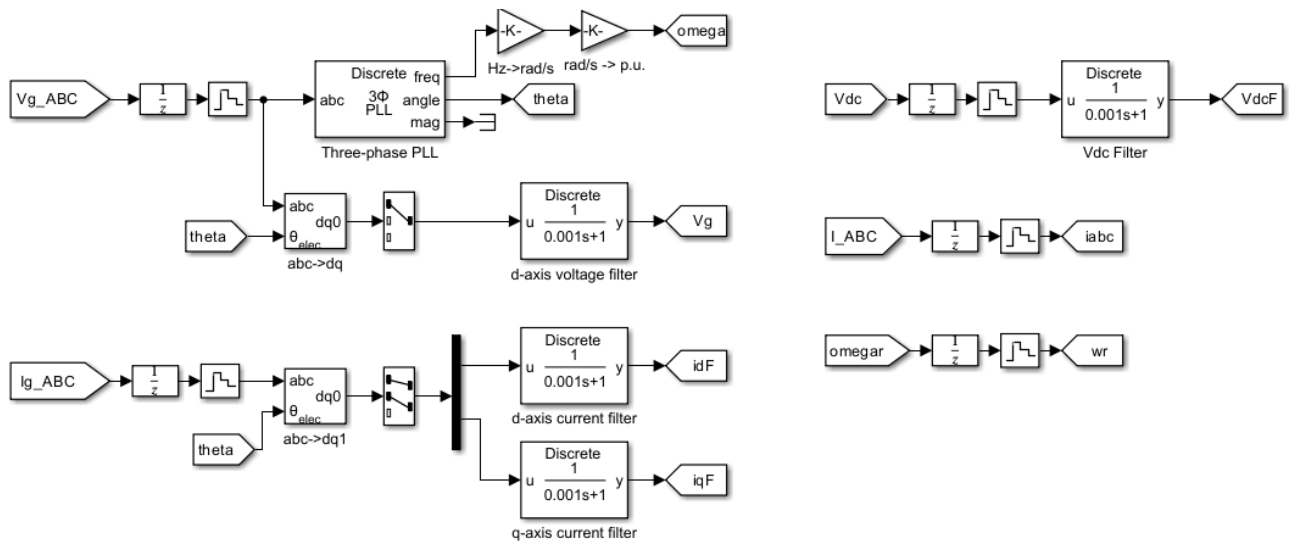


Рисунок 3.15 - Імітаційна модель підсистеми Measurements імітаційної моделі процесу налаштування ПІД регулятора частотного перетворювача ACS150

До складу імітаційної моделі підсистеми Measurements входять блоки вимірювання частоти обертання ротора, блоки вимірювання струмів та напруг статора двигуна змінного струму, а також блоки фільтрів та затримок.

На рисунку 3.16 зображено імітаційну модель підсистеми Scores, яка призначена для відображення графіків зміни струмів, напруг та швидкості обертання ротора двигуна змінного струму.

Також за допомогою підсистеми Scores відображуються графіки зміни похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів

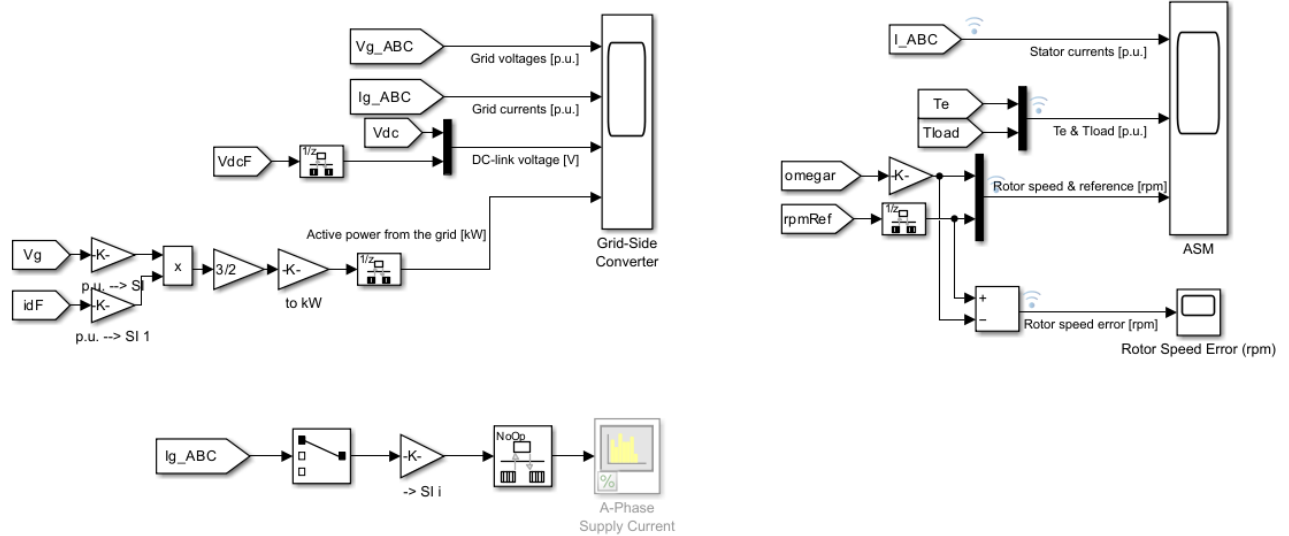


Рисунок 3.16 - Імітаційна модель підсистеми Scores імітаційної моделі процесу налаштування ПД регулятора частотного перетворювача ACS150

### 3.3 Висновки до третього розділу

1. При розробці імітаційної моделі процесу керування технологічною лінією була розроблена імітаційна модель процесу керування асинхронним двигуном за допомогою частотного перетворювача. За допомогою функції `power_AynchronousMachineParams` були обчислені параметри моделі асинхронного двигуна M2AA112MB2 на основі двигуна стандартних специфікацій виробника компанії АВВ.

2. На основі обчислених параметрів моделі асинхронного двигуна M2AA112MB2 були побудовані графіки залежності крутного моменту та струму статора від швидкості обертання ротора.

3. Було промодельовано процес керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 за допомогою частотного перетворювача ACS150 компанії АВВ. На першому кроці моделювання виконано без врахування ПД регулятора та кола зворотного зв'язку. Була розроблена імітаційна модель процесу керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 за допомогою частотного перетворювача ACS150 без врахування ПД регулятора та кола зворотного зв'язку.

4. Досліджена імітаційна модель процесу керування технологічною лінією за допомогою ПД-регулятора, до складу якої входять підсистеми Controls, Measurements та Scopes. Особливість підсистеми Controls полягає у тому, що вона містить усі чотири ПД-контролери. ПД-регулятор зовнішнього контуру регулює швидкість двигуна.

5. ПД-регулятор потоку зовнішнього контуру регулює потік статора. Два ПД-контролери внутрішнього контуру окремо керують струмами по осі  $d$  і осі  $q$ . Команда від ПД-регулятора швидкості зовнішнього контуру безпосередньо подається на вісь  $q$  для керування крутним моментом. Команда для осі  $d$  відмінна від нуля для двигуна змінного струму і є результатом ПД-регулятора потоку зовнішнього контуру.

6. Застосовано блок автоналаштування ПД-регуляторів із замкнутим контуром керування для кожного з чотирьох ПД-регуляторів. Було проведено моделювання процесу прискорення та зміни навантаження крутного моменту двигуна змінного струму величиною 1 р.и.

7. Аналіз графіків похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром показує, що використання автоналаштування ПД-регуляторів значно зменшує похибку швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора після налаштування ПД-контролерів.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ

### 4.1 Особливості середовища моделювання технологічної лінії Factory I/O

Factory I/O - це програмне забезпечення, яке використовується для моделювання систем керування технологічної лінії. FACTORY I/O використовується для технологій автоматизації навчання процесам керування технологічних ліній. Factory I/O можна використовувати як платформу для з різними типами контролерів, включаючи SoftPC, мікроконтролери, TCP/IP та інші технології, але загальною метою його використання є як платформа для навчання та вивчення ПЛК та їх програмування.

Real Games - це компанія, яка розробляє програмне забезпечення, і вони створюють його таким, щоб воно було простим у використанні. За допомогою Factory I/O можна швидко побудувати віртуальну фабрику з елементами, справжньої фабрики, яка містить конвеєри, датчики та різні типи ящиків. Крім того, більшість із них мають цифровий і аналоговий вхід/вихід. Factory I/O має більше 20 сцен, готових до використання, які імітують реальні ситуації.

Сценарій - це промисловий об'єкт, де за допомогою компонентів, які постачаються разом із програмним забезпеченням, користувач може побудувати віртуальну фабрику, а потім взаємодіяти з датчиком і приводами.

Оскільки Factory I/O має драйвери для контролерів, можна підключити програмне забезпечення до будь-якого ПЛК загального виробництва. Використовуючи Factory I/O, можна вчитися та тренуватися, створюючи віртуальну фабрику, а потім програмуючи ПЛК для створення автоматизованого процесу. Програмне забезпечення також можна використовувати з імітованим ПЛК, таким чином зменшуючи потребу в обладнанні або доступ до лабораторії.

Основні переваги використання Factory I/O.

1. Factory I/O містить 20 сцен, які готові до використання.
2. Factory I/O працює з усіма поширеними брендами ПЛК.

3. Factory I/O займає мало місця в порівнянні з традиційним обладнанням.

4. Студенти можуть працювати, експериментувати та редагувати віртуальну фабрику без жодного ризику.

Factory I/O забезпечення має три способи взаємодії з середовищем. Factory I/O має не лише камеру орбіти та літаючу камеру, які дозволяють користувачеві вільно переміщатися по всій сцені, але також камеру від першої особи, яка емулює вид з точки зору людини.

З метою створення багатофункціонального навчального середовища приводи та датчики мають три різні режими роботи. Перший - коли введення/виведення працює без проблем. Другий - це коли пристрій введення/виведення має збій - постійно увімкнений, що змушує пристрій працювати безперервно. Третій робочий стан є протилежним другому, у якому пристрій взагалі не працює. Ці три режими роботи є корисним для розробки стратегій запобігання збоєм або для пошуку альтернативних способів програмування.

З'єднання між ПЛК і комп'ютером із заводським програмним забезпеченням вводу/виводу здійснюватиметься через Ethernet, тому обидва пристрої мають бути в одній мережі. Для цього потрібно, щоб обидва комп'ютери мали відповідний Інтернет-протокол версії 4 (TCP/IPv4).

Є два способи запустити проект у Factory I/O. Це можна зробити або створити новий проект із самого початку, або використати одну з багатьох сцен, які постачаються разом із програмним забезпеченням. За допомогою обох методів сцену можна змінити та зберегти на майбутнє.

Програмне забезпечення було створено, щоб бути простим у використанні. Factory I/O має вікно палітри праворуч, яке містить усі компоненти, доступні для створення сцен. Їх можна додати до головної сцени, перетягнувши їх у потрібне місце.

Виконуючи те, що було згадано раніше щодо програмного забезпечення Factory I/O, можна створити сцену, але якщо метою є її підключення та керування за допомогою ПЛК, потрібні деякі додаткові кроки.

Оскільки метою було контролювати середовище за допомогою ПЛК, потрібна конфігурація драйвера. Factory I/O містить драйвери для найпоширеніших марок ПЛК.

Конфігурація ПЛК виконується у вкладці «Драйвери». Спочатку потрібно вибрати модель ПЛК, а потім буде доступна решта конфігурації для неї. Для того, щоб мати успішний проект, потрібно виконати такі налаштування.

1. Встановити адресу ПЛК.
2. Під'єднати мережевий адаптер.
3. Встановити зміщення точок вводу/виводу.

З метою уникнення перешкод між реальними входами/виводами та віртуальними входами/виводами, зміщення має бути встановлено з більшим числом, ніж число входів/виводів, доступних у ПЛК.

4. Встановити позначку «Автопідключення» необов'язково. Якщо його позначено, програмне забезпечення Factory I/O постійно намагатиметься підключитися до ПЛК. Якщо виникають проблеми з підключенням, то не буде з'являтися помилка.

Після підключення ПЛК до вводу/виводу Factory I/O потрібно встановити співвідношення входів і виходів. Це також робиться на вкладці «Драйвери» шляхом перетягування датчиків, які будуть використовуватися, за відповідною вхідною адресою (%I) і приводів за адресами виходів (%Q).

Існує два способи підключення ПЛК до вводу/виводу Factory I/O. Це можна зробити, поставивши галочку «Автопідключення» або натиснувши опцію підключення щоразу, коли це необхідно.

У будь-якому випадку, якщо пристрої підключено, зліва від моделі ПЛК з'явиться зелена галочка. Якщо опція «Автопідключення» не позначена і підключення не вдається встановити, з'явиться вікно з повідомленням про помилку з поясненням основних причин.

Після налаштування ПЛК настав час виконати частину програмування. Спочатку додайте весь список змінних до проекту, а потім програмування

основної програми. Після цього надішліть зміни до ПЛК, щоб його можна було використовувати для керування процесом, створеним на Factory I/O.

Нагадуємо, що ПЛК і Factory I/O будуть з'єднані через Ethernet з'єднання, тому важливо переконатися, що ПЛК і комп'ютер, на якому встановлено програмне забезпечення, знаходяться в одній мережі. Це можна зробити, відкривши центр мереж і спільного доступу та перевіривши деталі підключення Ethernet.

#### 4.2 Розробка технологічної лінії та програми керування у середовищі Factory I/O

Компоненти, які ми можемо використовувати для технологічної лінії Factory IO - це станції, оператори, пристрої попередження, доріжки, частини навантаження та інші частини для вільного налаштування середовища за нашим вибором.

Основним елементом, який використовується у сценаріях Factory IO, є конвеєрні стрічки, які використовуються на складальних лініях, що дозволяє нам працювати з легкими та важкими деталями. Обидва типи конвеєрної стрічки приводяться в дію за допомогою керуючого двигуна, що забезпечує односпрямований рух із фіксованою швидкістю без будь-якої спеціальної системи приводу, і пропонуються з трьома різними довжинами: 2, 4 або 6 метрів.

У наборі машин, доступних у програмному забезпеченні, доступний один робот-маніпулятор, який можна використовувати для обробки предметів або виконання певної роботи, а також ефективний для операцій завантаження чи розвантаження.

Технологічні лінії підтримуються призматичними з'єднаннями та мають обмежену кількість ступенів свободи на основі двох перпендикулярних осей: переміщення вгору/вниз і переміщення вперед/назад. Функції технологічних ліній реалізуються високорівневим програмуванням у спеціальних процедурах.

Factory IO надає інтерфейс для ефективного керування роботизованою рукою, конвеєрною стрічкою та в режимі реального часу або зовнішньої автоматизації його поведінки за допомогою запрограмованої логіки за допомогою активних вхідних і вихідних з'єднань.

Для побудови технологічної лінії у Factory IO, можна знайти декілька типів датчиків, а саме ємнісні, дифузні, індуктивні, ретрофлексивні, оптичні, світлові масиви та інші датчики.

Приводи можна знайти в інтегрованих станціях, таких як обробний центр, елеватор, підбір і розміщення, кран-штабелер, стелаж, палетизатор і резервуар. Завдяки цьому програмному забезпеченню немає необхідності підключати машини, конвеєрні стрічки, панелі до джерела живлення, моторних приводів, контролерів роботів або силової електроніки будь-якого типу, забезпечуючи чисте та спрощене середовище без кабелів.

Однією з найважливіших навичок, які потрібно навчитися у Factory I/O, є використання камер. Камери використовуються для навігації в 3D-просторі та є ключем до взаємодії з частинами або створення нових сцен. Можна використовувати три типи камер: орбітальна (1), «літаюча» (2) і камера від першої особи (3), як зображено на рисунку 4.1.

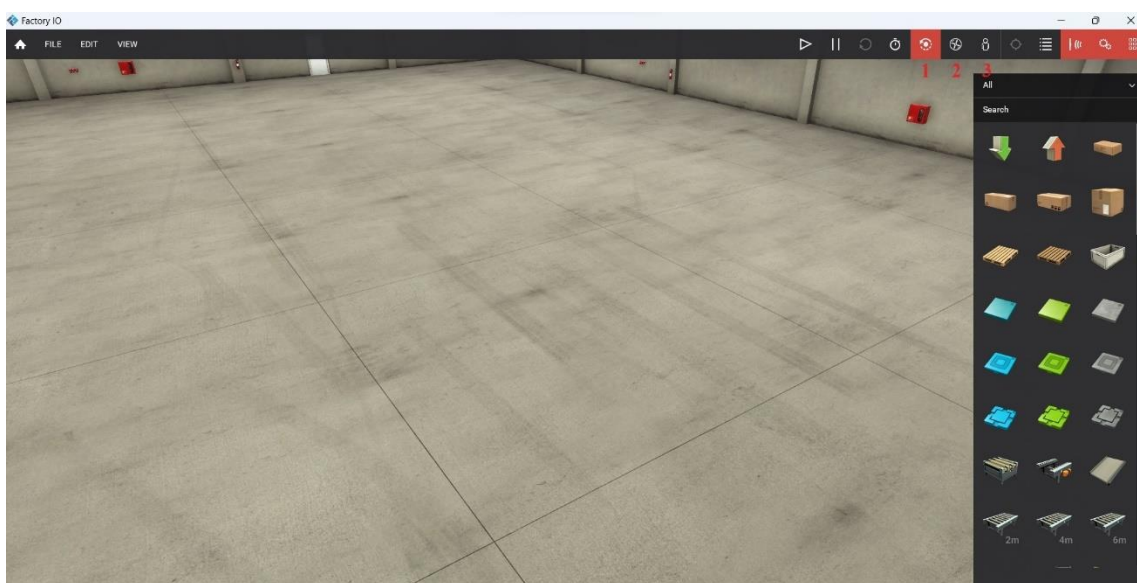


Рисунок 4.1 - Використання камер у Factory I/O

Factory I/O пропонує понад 80 елементів для додавання до сцен. Створимо нову сцену для моделювання технологічної лінії, використовуючи наступні кроки.

1. Натискаємо «Файл», а потім натискаємо «Відкрити». Далі з'являється можливість вибрати 1 із 21 існуючих сцен, які зображені на рисунку 4.2.

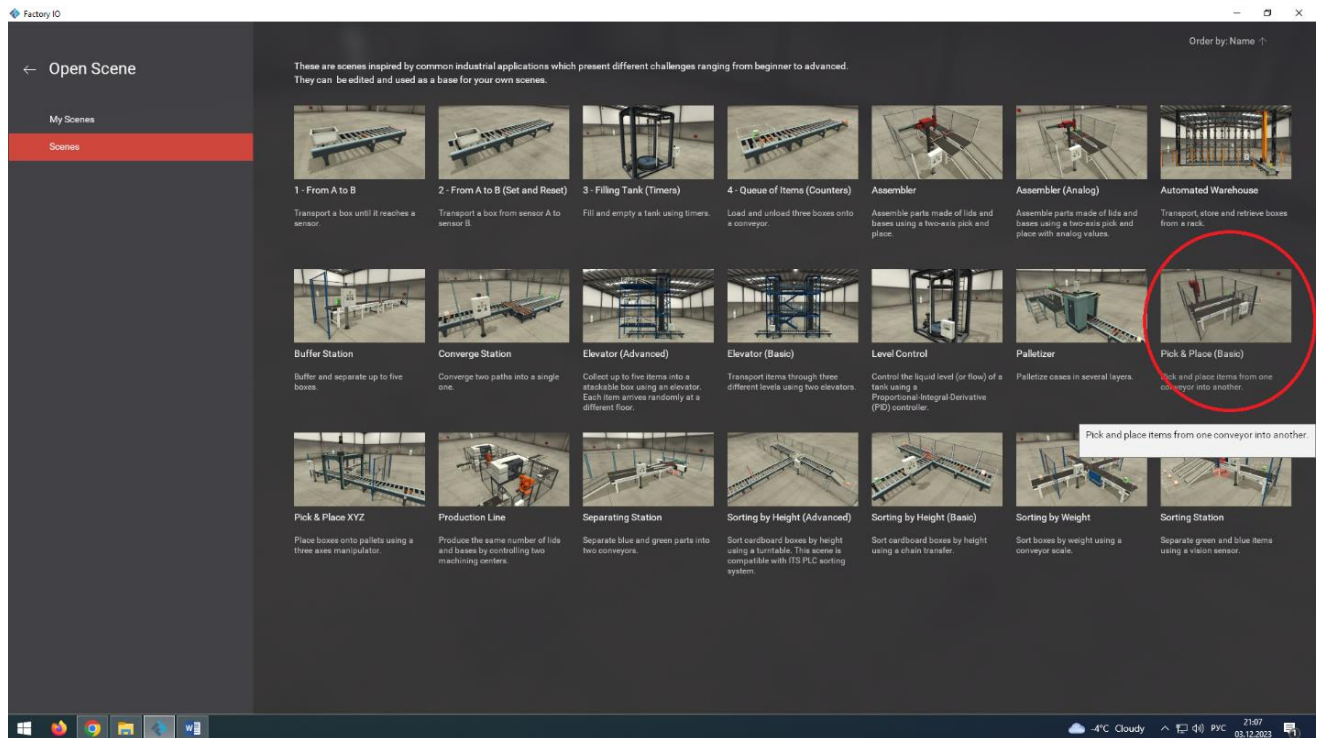


Рисунок 4.2 – Вибір сцени для моделювання технологічної лінії

2. Виберемо сцену Pick & Place (Basic) (Вибір і Розміщення (Базова)), яка вибирає та розміщує предмети з одного конвеєра на інший. В результаті відкриється сцена із розміщеною технологічною лінією, яка зображена на рисунку 4.3.

Для запуску та зупинки процесу в автоматичному режимі використовуються нормально відкриті кнопки запуску та нормально закриті кнопки зупинки, які зображені на рисунку 4.4. Після запуску вхідний конвеєр приведе деталь до елемента на вхідному датчику. Після цього конвеєр зупиниться. Рука робота опуститься, виявить деталь і активує захват.

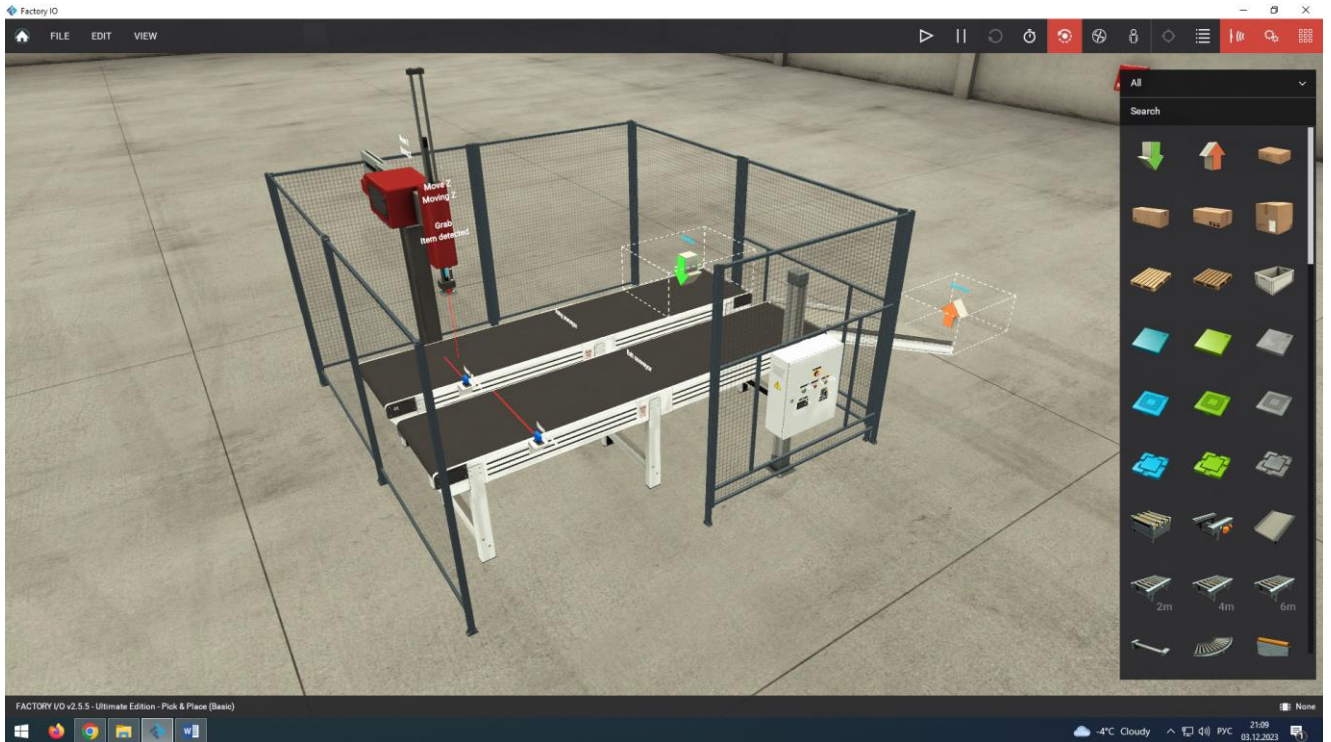


Рисунок 4.3 – Сцена Pick & Place (Basic)

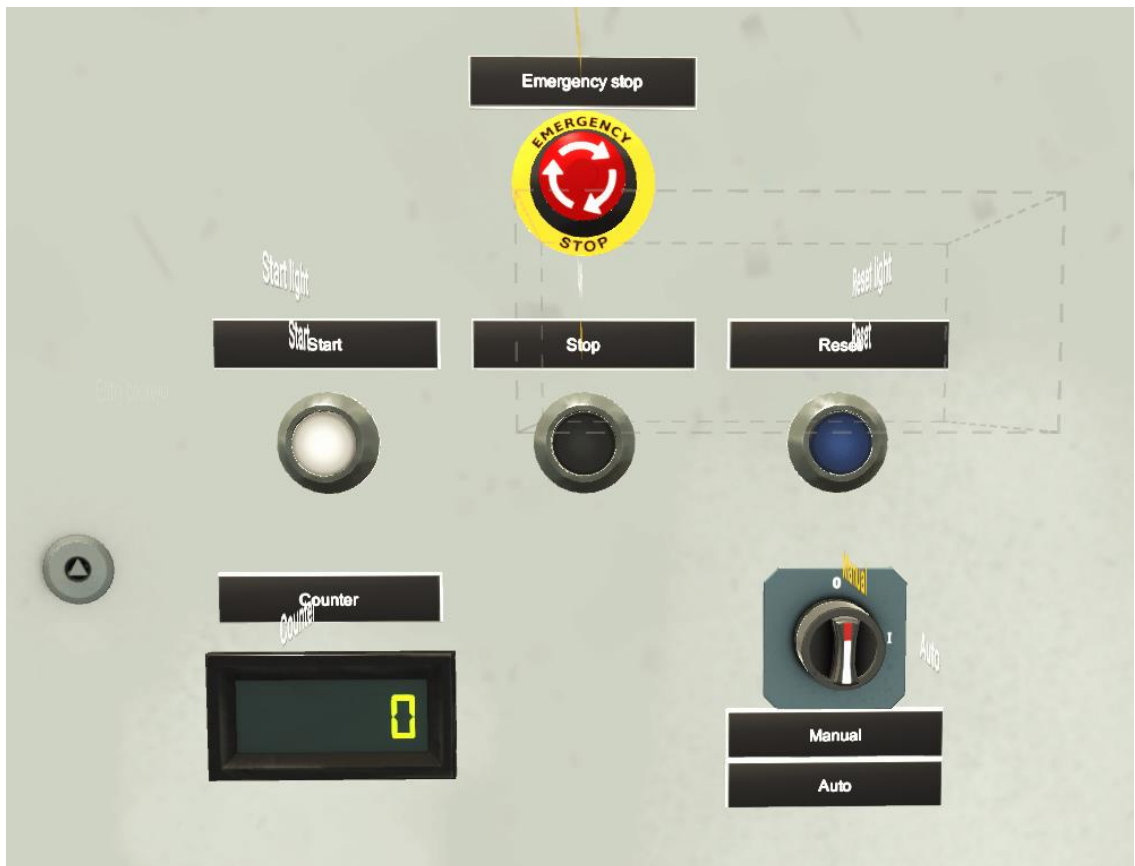


Рисунок 4.4 – Шафа керування технологічною лінією

Потім він повернеться у верхнє положення. Коли він досягне верху, він витягне руку над протилежним вихідним конвеєром. Вихідний конвеєр буде зупинено, коли рука опустить деталь на конвеєр.

Він відпускає захват і повертається вгору. Після цього можна запускати вихідний конвеєр. Рука повертається на вхідний конвеєр. Вхідний конвеєр запусниться знову, щоб продовжити той самий цикл. Після виявлення коробки предметом на датчику виходу лічильник відстежуватиме кількість повних циклів.

Вхід скидання скидає лічильник циклів. Усі предмети знімаються з конвеєрних стрічок. Ручний режим дозволить роботу-руці виконувати послідовність без роботи конвеєрів. Якщо послідовність зупиняється з будь-якої причини, буде відображено номер помилки, який вказує, де шукати помилку на машині.

Factory I/O має власне програмне забезпечення для розробки програм під назвою CONTROL I/O. Мета CONTROL I/O - забезпечити простий та інтуїтивно зрозумілий досвід для всіх, хто починає працювати у світі автоматизації.

У CONTROL I/O програма побудована за допомогою діаграм функціональних блоків. CONTROL I/O включає найпоширеніші функції, доступні на реальному ПЛК, тому можна розробляти програми так само, як і при використанні професійного програмного забезпечення.

CONTROL I/O дає змогу створювати програму, просто розміщуючи блоки з бібліотеки, а потім з'єднуючи ці блоки відповідно до алгоритму роботи. Це ефективний спосіб розробки та розуміння алгоритму роботи. Після розробки програми можна легко моделювати/контролювати сцену, просто натиснувши кнопку у формі ока, що робить вікно керування вводом/виводом абсолютно прозорим. Ці прозорі вікна надають кращу інформацію про те, що відбувається зі сценою і наскільки добре працює ваша програма.

Розроблена програма керування технологічною лінією складається із окремих блоків, з'єднаних ланками. Блок відображає значення (Boolean, Integer, Float ...) або функцію між входами та виходами (Лічильник, Таймер, ...). Блоки

оснащені роз'ємами, які використовуються для зв'язування різних блоків між собою.

З'єднуючи блоки разом, задаємо, як дані перетікають від найбільш вхідного до найбільш нижнього блоку (зліва направо). Вихідні роз'єми можуть бути підключені лише до вхідних роз'ємів. Не можливо створити зворотний зв'язок, підключивши вихідні роз'єми безпосередньо до вхідних роз'ємів. Для створення циклів використовуються спеціальні блоки пам'яті.

На рисунку 4.5 зображено фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії.

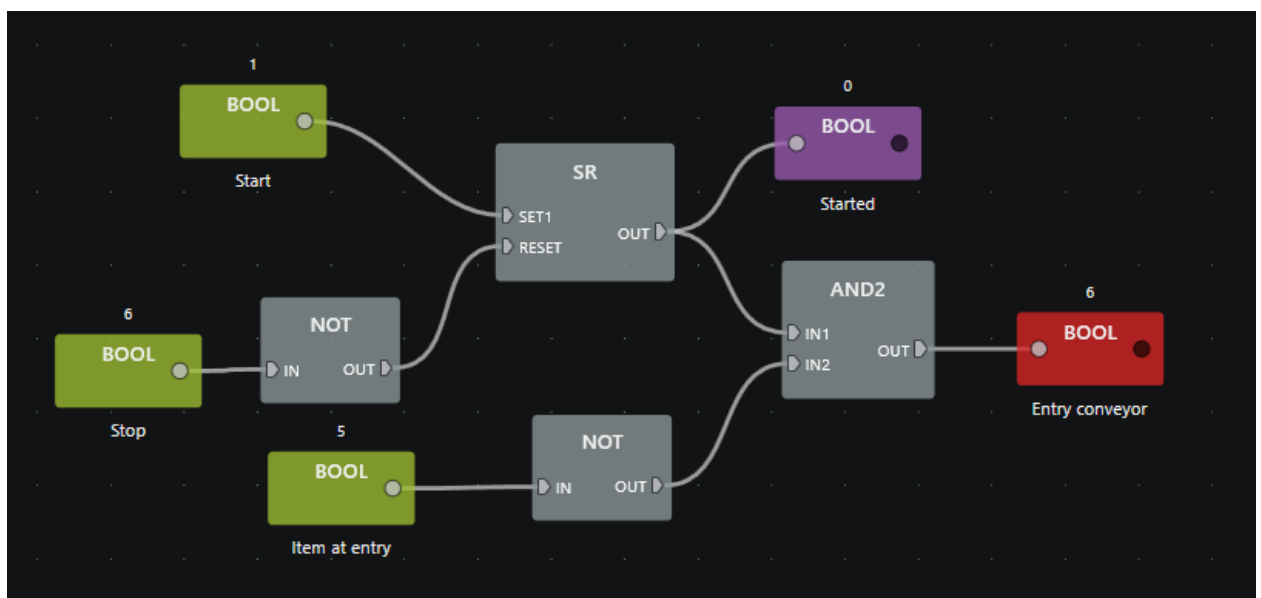


Рисунок 4.5 - Фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії

На рисунку 4.5 позначено три вхідних блоки, які зафарбовані зеленим кольором і відображають три логічних змінних (тип BOOL). Адреса 1 відповідає змінній Start (Старт), адреса 6 відповідає змінній Stop (Стоп), а адреса 5 відповідає змінній Item at entry (Виріб на вході конвеєра).

Адреса визначає положення цього блоку у внутрішній пам'яті CONTROL I/O (подібно до справжнього ПЛК), тоді як ім'я допомагає ідентифікувати блок без необхідності відстежувати адресу. Ця пам'ять використовується спільно з FACTORY I/O, що означає, що блок з тією ж адресою, що і тег сцени, має те саме

значення. Використовуючи адреси, можна легко зіставити програму з тегами сцени, встановивши правильні адреси для входів і виходів.

Два блоки Not (Hi) інвертують змінні Stop (Стоп) та Item at entry (Виріб на вході конвеєра). Змінна Start (Старт) встановлює блок SR (Пам'ять із заданим пріоритетом) в активний стан (логічної 1), який зберігається у блоці Started (Конвеєр запущено) і зафарбований у фіолетовий колір.

Якщо змінна Stop (Стоп) встановлена в активний стан (логічної 1), її значення інвертується в пасивний стан (логічного 0) і скидає блок SR (Пам'ять із заданим пріоритетом) в пасивний стан (логічного 0). Далі це значення зберігається у блоці Started (Конвеєр запущено) із адресою 0.

Значення змінної Item at entry (Виріб на вході конвеєра) інвертується блоком Not (Hi) і разом із змінною Start (Старт), значення якої збережене у блоці SR (Пам'ять із заданим пріоритетом), поступає на блок AND2 (2I). Якщо на вході блоку AND2 (2I) присутні дві логічні 1 (конвеєр запущений і виріб на вході конвеєра відсутній, то на виході блоку AND2 (2I) встановиться активний стан (логічної 1), який буде збережено у блоці Entry conveyor (Вхідний конвеєр) із адресою 6.

Наступна частина програми відповідає за рух робота по осі X та Z і зображена на рисунку 4.6.

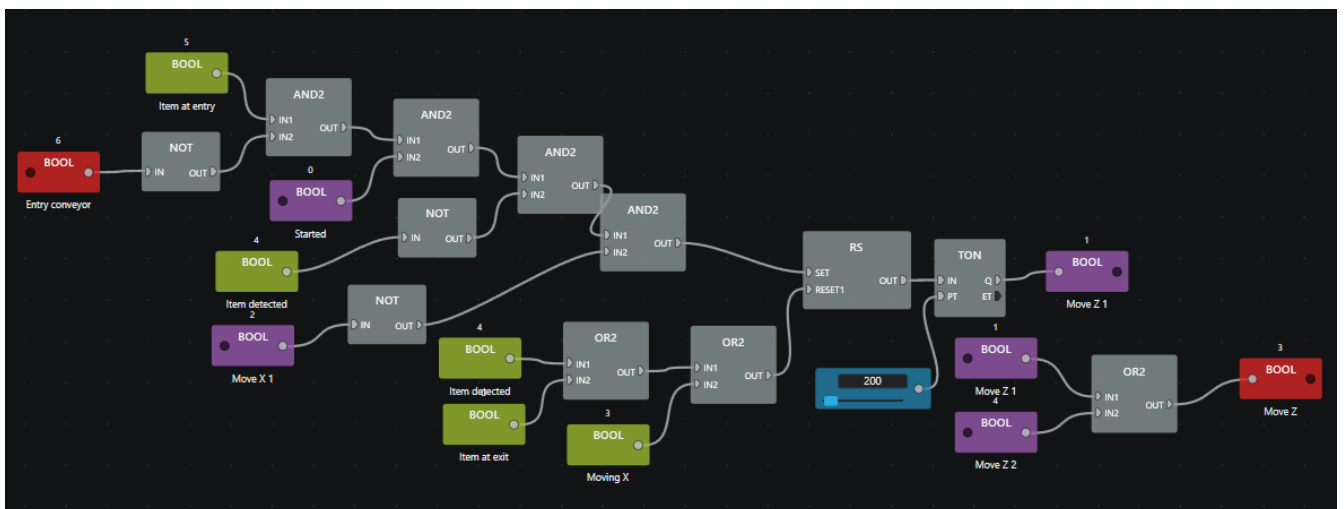


Рисунок 4.6 - Фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії, який керує рухом робота по осі X та Z

Коли виріб досягає позиції робота, спрацьовує давач і значення змінної Item at entry (Виріб на вході конвеєра) встановлюється в активний стан (логічної 1), а змінна Entry conveyor (Вхідний конвеєр) встановлюється в пасивний стан (логічного 0) і конвеєр зупиняється.

Пасивний стан (логічного 0) змінної Entry conveyor (Вхідний конвеєр) інвертується блоком Not (Ні) в активний стан (логічної 1) і разом із змінною Item at entry (Виріб на вході конвеєра), яка встановлена в активний стан (логічної 1), поступає на вхід блоку AND2 (2I). В результаті на виході блоку AND2 (2I) встановлюється також активний стан (логічної 1).

Далі це значення логічної 1 поступає на перший вхід наступного блоку AND2 (2I), а на його другий вхід поступає значення логічної 1 змінної Started (Конвеєр запущено), яка сигналізує, що конвеєр запущений, але не рухається, бо зупинений. В результаті на виході блоку AND2 (2I) встановлюється також активний стан (логічної 1).

Далі це значення логічної 1 поступає на перший вхід наступного блоку AND2 (2I), а на його другий вхід поступає значення логічної 1, яке відповідає інверсному значенню змінної Item detected (Виріб виявлено). Значення змінної Item detected (Виріб виявлено) із адресою 4 встановлюється в активний стан (логічної 1) після захоплення роботом виробу.

Якщо робот не захопив виріб, значення змінної Item detected (Виріб виявлено) встановлюється в пасивний стан (логічного 0), а далі інвертується блоком Not (Ні) в активний стан (логічної 1). Дві логічні 1 на входах блоку AND2 (2I) встановлюють його вихід також у активний стан (логічної 1).

Далі це значення логічної 1 поступає на перший вхід наступного блоку AND2 (2I), а на його другий вхід поступає значення логічної 1, яке відповідає інверсному значенню змінної Move X1 (Рух по осі X). Значення змінної Move X1 (Рух по осі X) із адресою 2 встановлюється в активний стан (логічної 1) лише при початку руху робота по осі X в напрямку від вхідного конвеєра до вихідного конвеєра.

В усіх інших випадках значення змінної Move X1 (Рух по осі X) встановлюється в пасивний стан (логічного 0). Далі пасивний стан (логічного 0) змінної Move X1 (Рух по осі X) інвертується блоком Not (Ні) в активний стан (логічної 1). Дві логічні 1 на входах блоку AND2 (2I) встановлюють його вихід також у активний стан (логічної 1).

Цей активний стан (логічної 1) встановлює блок RS (Пам'ять із заданим пріоритетом) також в активний стан (логічної 1), лише після появи сигналу логічного нуля на вході RESET1. Активний стан (логічної 1) на виході блоку RS (Пам'ять із заданим пріоритетом) запускає блок TON (Вмикання таймера) на час 200 мс, після чого на виході блоку TON (Вмикання таймера) встановлюється активний стан (логічної 1), який зберігається у блоці Move Z1 (Рух по осі Z1).

Значення активного стану (логічної 1) у блоці Move Z2 (Рух по осі Z2) запускає рух робота по осі Z вниз над вихідним конвеєром. Значення активного стану (логічної 1) у блоці Move Z1 (Рух по осі Z1) та значення активного стану (логічної 1) у блоці Move Z2 (Рух по осі Z2) поступають на входи блоку OR2 (2АБО).

Якщо у блоці Move Z1 (Рух по осі Z1) або Move Z2 (Рух по осі Z2) знаходяться в активного стану (логічної 1), то здійснюється встановлення в активний стан (логічної 1) вихідного блоку Move Z (Рух по осі Z) і відбувається рух робота вниз по осі Z. Якщо значення вихідного блоку Move Z (Рух по осі Z) встановлено в пасивному стан (логічного 0), то відбувається рух робота вгору по осі Z.

Скидання блоку RS (Пам'ять із заданим пріоритетом) в пасивний стан (логічного 0) відбувається однією із трьох змінних: Item detected (Виріб виявлено) або Item at exit (Виріб на виході), або Move X (Рух по осі X), які об'єднуються у функцію АБО за допомогою двох блоків OR2 (2АБО).

Наступна частина програми відповідає за захоплення виробу роботом і зображена на рисунку 4.7. Значення активного стану (логічної 1) у блоці Grab (Захоплювати) вмикає захоплення виробу роботом, значення пасивного стану (логічного 0) у блоці Grab (Захоплювати) вимикає захоплення виробу роботом.

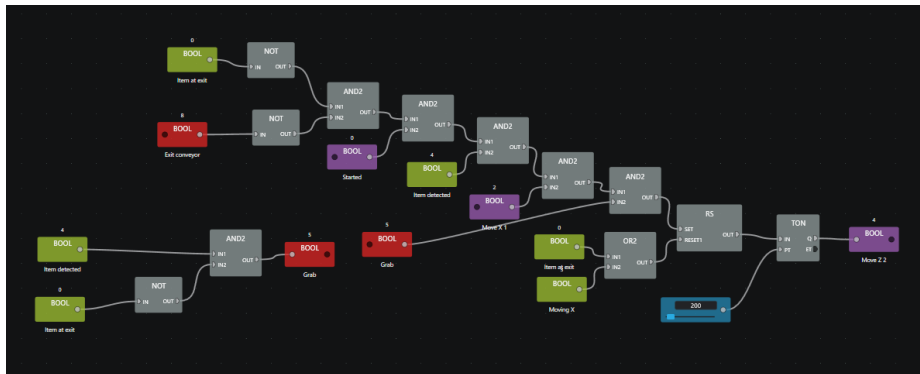


Рисунок 4.7 - Фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії, який керує захоплення виробу роботом

Наступна частина програми відповідає за рух робота по осі X від вхідного конвеєра до вихідного конвеєра і зображена на рисунку 4.8.

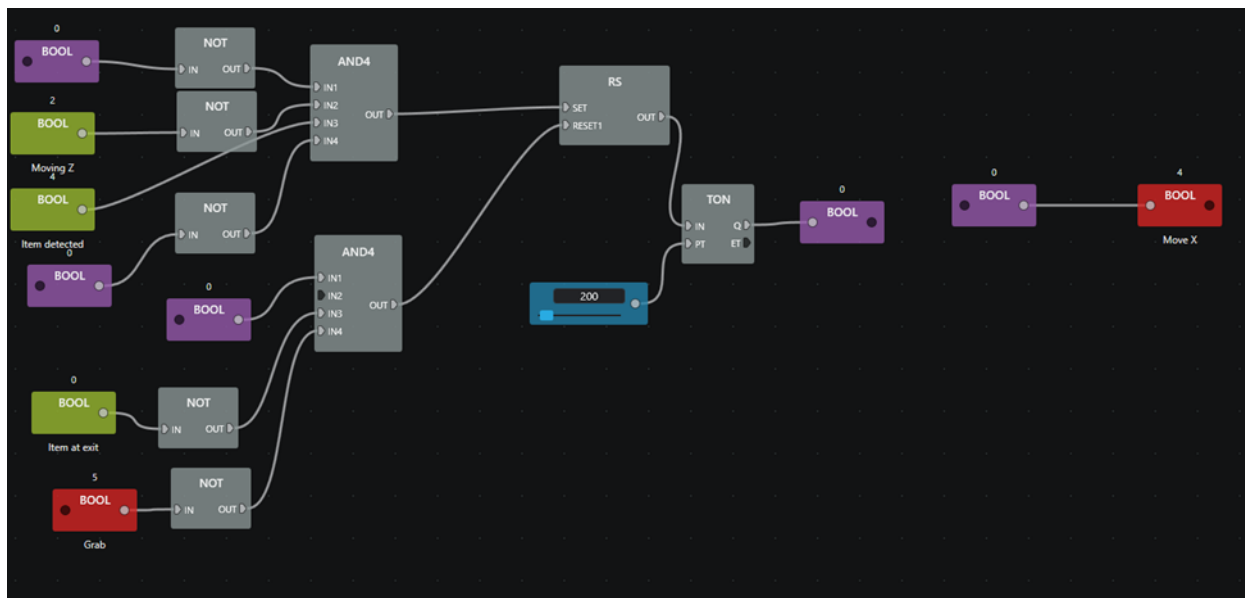


Рисунок 4.8 - Фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії, який відповідає за рух робота по осі X від вхідного конвеєра до вихідного конвеєра

Особливістю фрагменту програми керування конвеєром технологічної лінії, який відповідає за рух робота по осі X від вхідного конвеєра до вихідного конвеєра є використання двох блоків AND4 (4I).

Значення активного стану (логічної 1) у блоці Move X (Рух по осі X) запускає рух робота по осі X від вхідного конвеєра до вихідного конвеєра.

Значення пасивного стану (логічного 0) у блоці Move X (Рух по осі X) запускає рух робота по осі X від вихідного конвеєра до вхідного конвеєра.

Завершальна частина програми відповідає за рух вихідного конвеєра і зображена на рисунку 4.9.

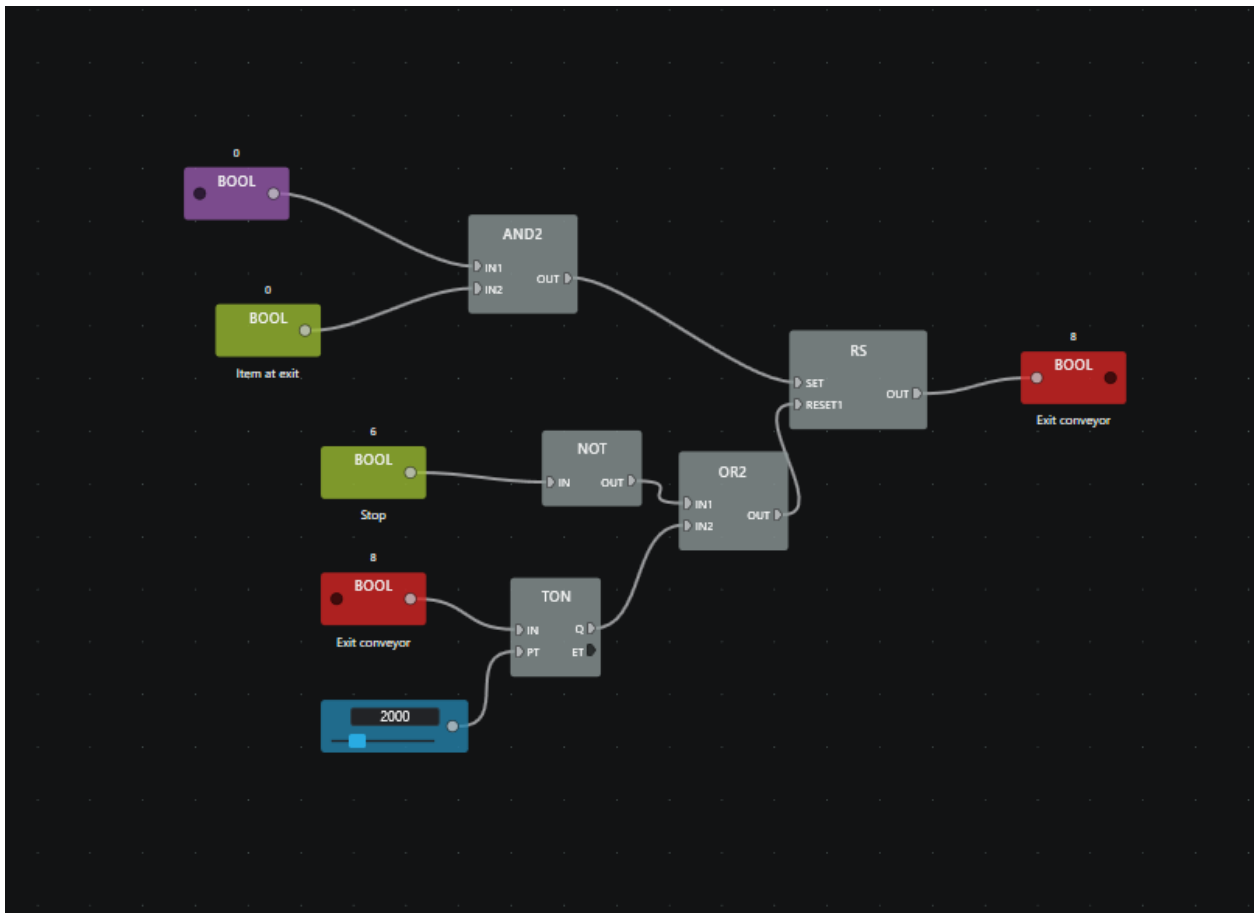


Рисунок 4.9 - Фрагмент програми керування конвеєром технологічної лінії, який відповідає за рух вихідного конвеєра

Значення активного стану (логічної 1) у блоці Exit conveyor (Вихідний конвеєр) запускає рух вихідного конвеєра. Значення пасивного стану (логічного 0) у блоці Exit conveyor (Вихідний конвеєр) зупиняє рух вихідного конвеєра. Також зупинка вихідного конвеєра здійснюється шляхом встановлення значення активного стану (логічної 1) у блоці Stop (Зупинка).

На рисунку 4.10 зображено вигляд технологічної лінії у програмному забезпеченні Factory I/O.

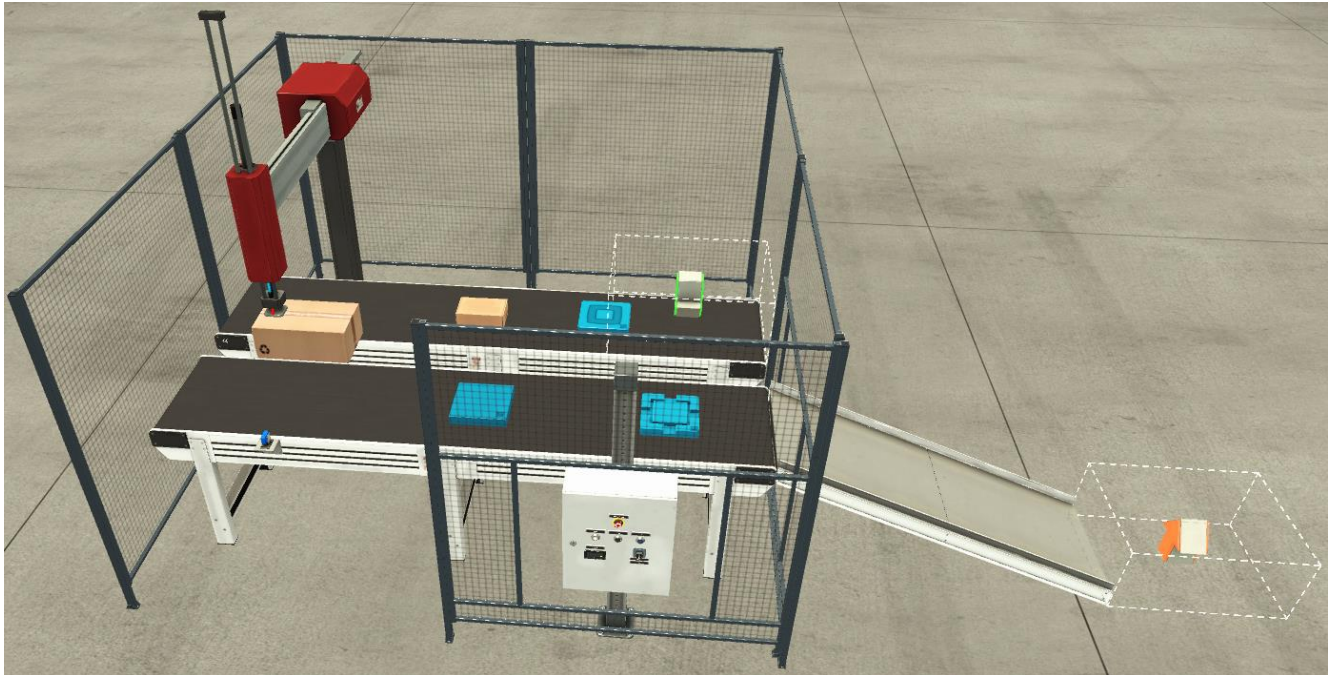


Рисунок 4.10 - Вигляд технологічної лінії у програмному забезпеченні Factory I/O

На рисунку 4.10 зображено технологічну лінію у програмному забезпеченні Factory I/O. На передньому плані зображено електрощит керування технологічною лінією. Він складається з кнопок ПУСК, СТОП, СКИДАННЯ та аварійної зупинки, які зображені на рисунку 4.11.



Рисунок 4.11 - Кнопки ПУСК, СТОП, СКИДАННЯ та аварійної зупинки

Робота технологічної лінії у програмному забезпеченні Factory I/O розпочинається із завантаження вхідного конвеєра виробом через пристрій завантаження – Emitter, який зображено на рисунку 4.12.

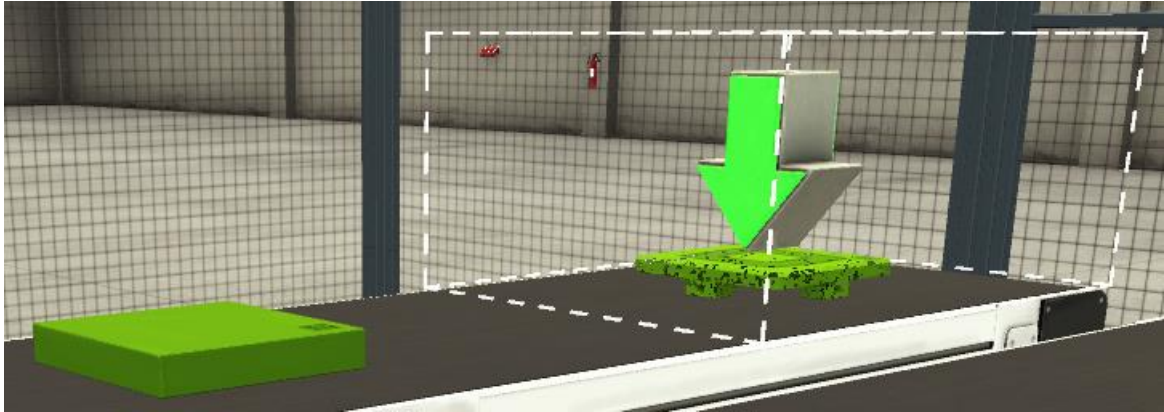


Рисунок 4.12 - Пристрій завантаження – Emitter

Пристрій завантаження (Emitter) відповідає за завантаження виробів, які використовуватимуться в процесі, на конвеєр технологічної лінії. За допомогою пристрою завантаження є можливість налаштувати розміри виробів, які завантажуються на конвеєр технологічної лінії та частоту швидкість їх завантаження.

Розвантаження вихідного конвеєра здійснюється через пристрій розвантаження – Remover, який зображено на рисунку 4.13.

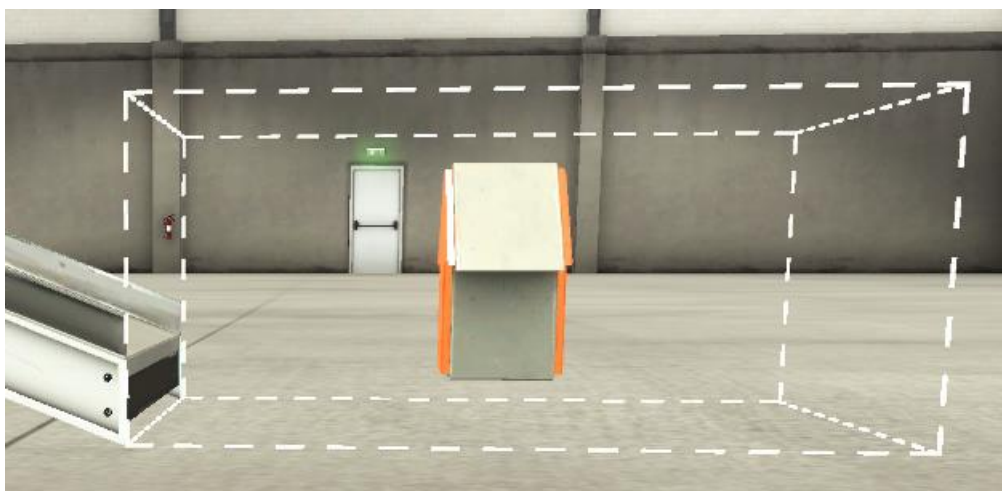


Рисунок 4.13 - Пристрій розвантаження – Remover

Також у технологічній лінії використовуються три фотоелектричних датчики дифузного типу, які зображені на рисунку 4.14.

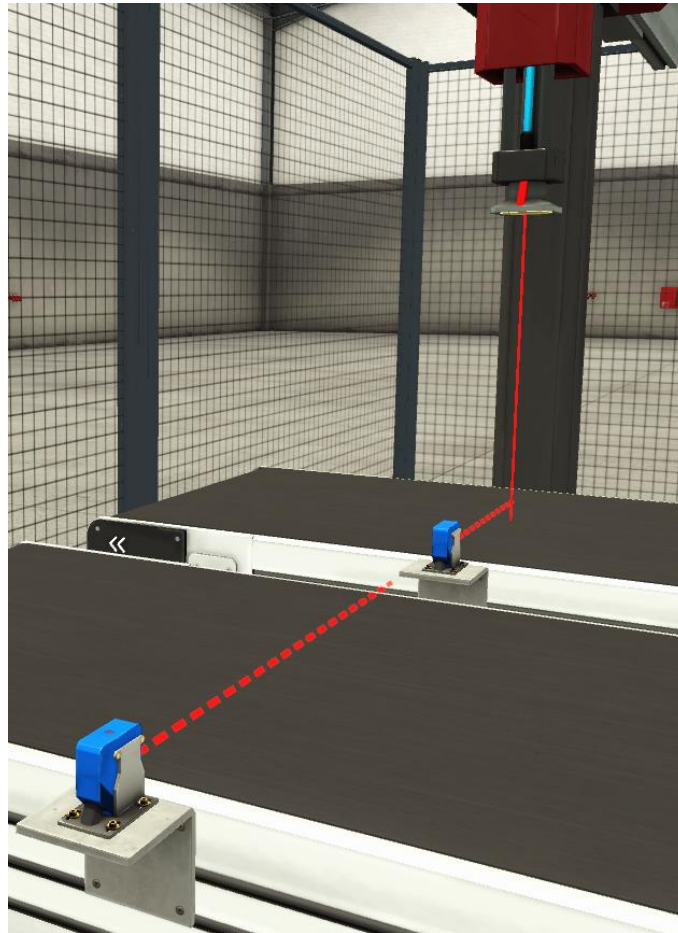


Рисунок 4.14 - Три фотоелектричних датчики дифузного типу

Фотоелектричний датчик - це пристрій, який випромінює промінь світла, який може бути видимим або інфрачервоним від свого випромінюючого елемента. При виявленні присутності виробу світловий промінь відбивається і надходить до приймача.

Коли спрацьовує фотоелектричний датчик вхідного конвеєра, то вхідний конвеєр зупиняється і очікує, поки робот забере виріб із вхідного конвеєра. Далі вхідний конвеєр знову запускається.

Другий фотоелектричний датчик розміщений на утримувачі робота. Якщо робот захопив виріб, то спрацьовує другий фотоелектричний датчик і робот починає рухатися до верху (підіймати виріб).

Третій фотоелектричний датчик розміщений на вихідному конвеєрі. Третій фотоелектричний датчик спрацьовує, коли робот встановлює виріб на вихідний конвеєр. Після спрацьовування третього фотоелектричного датчик, запускається вихідний конвеєр. Далі процес циклічно повторюється.

#### 4.3 Висновки до четвертого розділу

1. В процесі експериментального дослідження удосконаленого методу керування технологічною лінією застосовувалось програмне забезпечення Factory I/O, яке використовується для моделювання систем керування технологічної лінії. FACTORY I/O використовується для технологій автоматизації навчання процесам керування технологічних ліній. Factory I/O можна використовувати як платформу для з різними типами контролерів, включаючи SoftPC, мікроконтролери, TCP/IP та інші технології, але загальною метою його використання є як платформа для навчання та вивчення ПЛК та їх програмування.

2. Основним елементом, який використовується у сценаріях Factory IO, є конвеєрні стрічки, які використовуються на складальних лініях, що дозволяє нам працювати з легкими та важкими деталями. Обидва типи конвеєрної стрічки приводяться в дію за допомогою керуючого двигуна, що забезпечує односпрямований рух із фіксованою швидкістю без будь-якої спеціальної системи приводу, і пропонуються з трьома різними довжинами: 2, 4 або 6 метрів.

3. Factory I/O має власне програмне забезпечення для розробки програм під назвою CONTROL I/O. У CONTROL I/O програма побудована за допомогою діаграм функціональних блоків. CONTROL I/O включає найпоширеніші функції, доступні на реальному ПЛК, тому можна розробляти програми так само, як і при використанні професійного програмного забезпечення.

4. Розроблена програма керування технологічною лінією складається із окремих блоків, з'єднаних ланками. Блок відображає значення (Boolean, Integer, Float ...) або функцію між входами та виходами (Лічильник, Таймер, ...). Блоки

оснащені роз'ємами, які використовуються для зв'язування різних блоків між собою.

5. З'єднуючи блоки разом, задаємо, як дані перетікають від початкового вхідного блоку до найбільш нижнього вихідного блоку (зліва направо). Вихідні роз'єми можуть бути підключені лише до вхідних роз'ємів. Не можливо створити зворотний зв'язок, підключивши вихідні роз'єми безпосередньо до вхідних роз'ємів. Для створення циклів використовуються спеціальні блоки пам'яті.

## ВИСНОВКИ

1. Технологічні лінії є основою харчової промисловості. Вони складаються з короткої секції ланцюгового конвеєра, що працює в поєднанні з дозатором продуктів. Такі системи мають два режими роботи: індексування та синхронізацію. Під час індексування конвеєр послідовно розміщує предмети, які встановлені на ньому, під дозатором продуктів у режимі стоп/старт.

2. Для керування швидкістю руху ланцюгового конвеєра технологічної лінії використано частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, який буде керувати частотою обертання асинхронного двигуна.

3. Особливістю запропонованого удосконаленого методу керування технологічною лінією є те, що використовується частотний перетворювач ACS150 компанії АВВ, до складу якого входить ПД-регулятор.

4. Досліджена імітаційна модель процесу керування технологічною лінією за допомогою ПД-регулятора, до складу якої входять підсистеми Controls, Measurements та Scopes. Особливість підсистеми Controls полягає у тому, що вона містить усі чотири ПД-контролери. ПД-регулятор зовнішнього контуру регулює швидкість двигуна.

5. Аналіз графіків похибок швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора до та після налаштування контролерів за допомогою блоку автоналаштування ПД із замкнутим контуром показує, що використання автоналаштування ПД-регуляторів значно зменшує похибку швидкості ротора відносно заданої частоти обертання ротора після налаштування ПД-контролерів.

6. В процесі експериментального дослідження удосконаленого методу керування технологічною лінією застосовувалось програмне забезпечення Factory I/O, яке використовується для моделювання систем керування технологічної лінії. FACTORY I/O використовується для технологій автоматизації навчання процесам керування технологічних ліній.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Jayneel Prajapati “Design of a simplified vertical conveyor system” IRJET Volume: 03 Issue: 10 Oct -2016
2. Vinayak H. Khatawate “Design and Energy Optimization of Z-Type Chain Conveyor” IJERA ISSN: 2248-9622 Vol. 2, Issue4, July-August 2012, pp.1421-1424
3. Kumbhar P.M. “Various Material Handling Systems in Foundry: A Review” International Journal of Trend in Research and Development, Volume 2(5), ISSN 2394-9333 Sep-Oct 2015
5. Patent N0. US 7,011,206 B2 United States Patent Date of Patent: Mar. 14 “vertical conveyor in the form of arcshaped circulating conveyor for the vertical conveyance of unit load items” 2006
6. Cahill, James M. 1985. Package-Handling Conveyors. In Materials Handling Handbook, 2d ed, ed. Raymond A. Kulwiec, 317-339. New York, New York. John Wiley & Sons, Incorporated.
7. Cerda, Carlos B. Ramirez. 1995. Performance Evaluation of an Automated Material Handling System for a Machining Line Using Simulation. In Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference, eds. Christos Alexopoulos, Keebom Kan-, William R. Lilegdon, and David Goldsman. 881-888.
8. Foote, Bobbie L., A. Ravindran, Adedeji B. Badiru, Lawrence M. Leemis, and Larry M. Williams. 1988. Simulation and Network Analysis Pay Off in Conveyor System Design. Industrial Engineering 20(6):48-53.
9. Good, George L., and J. Thomas Bauner. 1984. On the Use of Simulation in the Design and Installation of a Power and Free Conveyor System. In Proceedings of the 1984 Winter Simulation Conference, eds. Sallie Sheppard, Udo W. Pooch. and C. Dennis Pegden. 425-428
10. Modeling of Chain Conveyors and Their Equipment Interfaces. Режим доступу до ресурсу:  
[https://www.researchgate.net/publication/221528082\\_Modeling\\_of\\_Chain\\_Conveyors\\_and\\_Their\\_Equipment\\_Interfaces](https://www.researchgate.net/publication/221528082_Modeling_of_Chain_Conveyors_and_Their_Equipment_Interfaces).

11. Gould, Les. 1994. Conveyors Designed to Handle Small Products with Ease. Modern Materials Handling.
12. Development of Moving Equipment for Fishermen's Catches using the Portable Conveyor System [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/345412038\\_Development\\_of\\_Moving\\_Equipment\\_for\\_Fishermen%27s\\_Catches\\_using\\_the\\_Portable\\_Conveyor\\_System](https://www.researchgate.net/publication/345412038_Development_of_Moving_Equipment_for_Fishermen%27s_Catches_using_the_Portable_Conveyor_System)
13. Development of an Automatic Mini-Conveyor System for Product Monitoring [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/413/1/012021/pdf>
14. What is Automated Materials Handling? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: Automated material handling systems (AMHS) in libraries and archives: [https://automatedstorage/retrieval\\_and\\_return/sorting\\_systems](https://automatedstorage/retrieval_and_return/sorting_systems)
15. Наливайко А.П. Теорія стратегії підприємства. Сучасний стан та напрямки розвитку: Монографія. – К.: КНЕУ, 2001.
16. Пономаренков В.С. Стратегічне управління підприємством. – Харків, Основа, 1994.
17. Shirong, Z. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems / Z. Shirong // Applied Energy – 2010 – June 2014. P. 929-937.
18. Ланцюговий конвеєр. Режим доступу: <https://www.kuehne.com/en/products/chain-conveyors/redler-conveyors-trough-chain-conveyors.html>
19. Дозатор для морозива. Режим доступу: [https://mastermilk.com/equipment/dozator\\_morozhenogo](https://mastermilk.com/equipment/dozator_morozhenogo)
20. Lyashenko I. A. Hysteresis behavior in the stick–slip mode at the boundary friction / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, A. M. Zaskoka // Tribology Transactions. – 2013. – V. 56, № 6. – P. 1019-1026.
21. D. Knetsch, M. Funk, T. Kennerknecht та C. Eberl, «Load Data Calculation in Electric Axle Drives and Fatigue Assessment for the Electric Motor Subsystem» Materials Testing, Carl Hanser Verlag, т. 56, № 7-8, pp. 535-541, 2014.

22. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
23. Двигуни і генератори. Режим доступу:  
[www.abb.com/motors&generators](http://www.abb.com/motors&generators)
24. User's Manual ACS150 Drives. Режим доступу:  
[https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN\\_ACS150\\_Drives\\_UM\\_D\\_A4.pdf](https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN_ACS150_Drives_UM_D_A4.pdf)
25. Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв'язування задач електромеханіки в середовищі пакетів MathCAD і MATLAB: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Державного університету “Львівська політехніка”, 2000. – 166 с.
26. Simulink. Dynamic System Simulation for MATLAB. – The MathWorks, 1999. – 604 p.
27. MATLAB und SIMULINK. Beispielerorientierte Einführung in die Simulation dynamischer Systeme / Josef Hoffman – Bonn Addison-Wesley-Longman. – 1998.
28. Толочко О.І. Методичний посібник до самостійної роботи з дисципліни „Моделювання електромеханічних систем”/ О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, О.І. Песковатська, П.І. Розкаряка – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 96 с.
29. SimPowerSystems User's Guide. – Hydro-Quebec and The MathWorks, Inc., 2009. – 402 p.
30. Krishnan, R. Electric motor drives: modeling, analysis, and control. – Prentice Hall, 2001. – 652 p.
31. Leonhard W. Control of Electrical Drives. 3rd Ed. Springer Verlag, 2001. – 470 p.
32. Krause P.C., Wasynczuk O., and S.D. Sudnoff. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. – 2nd Edition. – IEEE Press, 2002. – 632 p.
33. Trzynadlowski A.M. Control of Induction Motors. – Academic Press, 2001. – 230 p.

34. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Електромеханічні системи в асинхронному електроприводі: Навч. посібник / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Алчевськ: ДонДТУ, 2009. – 349 с.

35. Шевченко І.С., Морозов Д.І. Спеціальні питання теорії електропривода. Динаміка асинхронного електропривода: навч. посібник / І.С. Шевченко, Д.І. Морозов. – Київ: Кафедра, 2014. – 328 с.

36. Armstrong B., de Wit C.C. Friction Modeling and Compensation. The Control Handbook. – CRC Press, 1995.

36. Heeg, Thomas. A comparison of various PID controller structures for the control of processes with time-delay by simulation and PLC implementation”. Dublin Institute of Technology, 1997/1998. Supervisor, Dr. A. O’Dwyer.

37. Assaad, M., Yohannes, I., Bermak, A., Ginhac, D., & Fabrice, M. (2014, March 1). Design and Characterization of Automated Color Sensor System. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 7.

38. Ebel, F., Idler, S., Prede, G., & Scholz, D. (2008). Fundamentals of automation technology. (R. Pittschellis, Ed.) Denkendorf, Germany.

39. Groover, M. P. (2016). Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing (Vol. IV). Harlow, Essex, England: Pearson Education Limited.

40. Gupta, A. K., Arora, S. K., & Wescott, J. R. (2017). Industrial Automation and Robotics. Dulles, Virginia, United States of America: Mercury Learning and Information.

## Додаток А

## Стаття у фаховому журналі (подана в 1 номер ВОРТІП, 2024р.)

МАРТИНЮК Валерій  
Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0001-5758-4244  
e-mail: [martynyuk.valeriy@gmail.com](mailto:martynyuk.valeriy@gmail.com)  
СЕЛЬСЬКИЙ Андрій  
Хмельницький національний університет  
ORCID ID: 0000-0002-7373-0472  
e-mail: [andriy.saa@gmail.com](mailto:andriy.saa@gmail.com)  
НЕСТЕРЧУК Олександр  
Хмельницький національний університет  
e-mail: [icanwait88@gmail.com](mailto:icanwait88@gmail.com)

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ M2AA112MB2 КОМПАНІЇ АBB

У статті запропонована математична модель системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АBB із використанням частотного перетворювача ACS150 компанії АBB. Розглянуто спрощену структурну схему та передавальну функцію асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АBB. Розраховано коефіцієнти передавальної функції асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АBB на основі параметрів двигуна, які надаються виробником.

Запропонована передавальна функцію частотного перетворювача ACS150 компанії АBB та розраховано її коефіцієнти. Особливістю частотного перетворювача ACS150 є реалізація ПІД керування за допомогою спеціального макросу. Розроблена структурна схема системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2.

**Ключові слова:** математична модель системи керування двигуна, передавальна функція асинхронного двигуна, частотний перетворювач, ПІД керування, структурна схема системи керування.

MARTYNYUK Valeriy, SELSKYI Andrii, NESTERCHUK Oleksandr  
Khmelnitsky national university, Ukraine

### MATHEMATICAL MODEL OF THE ASYNCHRONOUS MOTOR M2AA112MB2 CONTROL SYSTEM OF ABB COMPANY

The article proposes a mathematical model of the ABB M2AA112MB2 asynchronous motor control system using the ABB ACS150 frequency converter. The simplified structural diagram and transmission function of the ABB M2AA112MB2 asynchronous motor are considered. The coefficients of the transfer function of the ABB M2AA112MB2 asynchronous motor were calculated based on the motor parameters provided by the manufacturer.

The proposed transfer function of the ABB ACS150 frequency converter and its coefficients were calculated. A feature of the ACS150 frequency converter is the implementation of PID control using a special macro. The structural diagram of the M2AA112MB2 asynchronous motor control system was developed.

**Keywords:** mathematical model of the motor control system, transfer function of an asynchronous motor, frequency converter, PID control, structural diagram of the control system.

#### Постановка проблеми

Першою ланкою технологічного конвеєра є асинхронний двигун, який приводить у рух технологічний конвеєр. Керування технологічним конвеєром здійснюється шляхом керування асинхронним двигуном, який приводить у рух технологічний конвеєр. На кафедрі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Хмельницького національного університету за підтримки компанії АBB створена лабораторія технічних засобів автоматизації. У складі лабораторії технічних засобів автоматизації є лабораторний макет, до складу якого входить асинхронний двигун M2AA112MB2 і частотний перетворювач ACS150 компанії АBB, а також інтелектуальне реле Zelio Logic SR2 A201FU компанії Schneider Electric, які зображені на рис. 1.

Використаємо асинхронний двигун M2AA112MB2 і частотний перетворювач ACS150 компанії АBB, а також інтелектуальне реле Zelio Logic SR2 A201FU компанії Schneider Electric для побудови системи керування технологічного конвеєра. Для розробки програми керування технологічним конвеєром за допомогою інтелектуального реле Zelio Logic SR2 A201FU компанії Schneider Electric необхідно розробити математичну модель системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АBB.

Основними складовими математичної моделі системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АBB є передавальні функції асинхронного двигуна M2AA112MB2 частотного перетворювача ACS150 компанії АBB.



**Рис. 1. Лабораторний макет технічних засобів автоматизації кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Хмельницького національного університету**

#### Аналіз останніх джерел

Електрична енергія в асинхронному двигуні перетворюється через обертові магнітні поля. Трифазні струми на стороні статора створюють електромагнітне поле, яке взаємодіє з електромагнітним полем в обмотках ротора. За законом Лоренца виникає результуючий крутний момент і електрична енергія перетворюється в механічну енергію обертання ротора. На рис. 2 зображена конструкція трифазного асинхронного двигуна [1].



**Рис. 2. Конструкція трифазного асинхронного двигуна [1]**

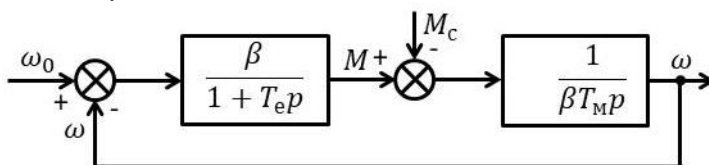
Асинхронний двигун M2AA112MB2 компанії АВВ має наступні технічні параметри, які наведені в табл. 1 [2].

Табл. 1. Параметри асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АВВ [2]

Тип двигуна	$P_n$ , кВт	Маса, кг	$n_n$ , об/хв	$\eta$	$\cos \varphi$	$I_n$ , А	$\frac{I_k}{I_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$J$ , кг·м <sup>2</sup>
M2AA112MB2	4,0	26	2895	0,848	0,89	7,6	7,2	2,7	3,3	0,0061

#### Виклад основного матеріалу

Розглянемо спрощену структурну схему асинхронного двигуна, яка складається з електромагнітної та механічної ланок, а також кола від'ємного зворотного зв'язку за кутовою швидкістю. Зовнішнє механічне навантаження на асинхронний двигун моделюється статичним механічним моментом  $M_C$ , як зображено на рис. 3.



**Рис. 3. Спрощена структурна схема асинхронного двигуна**

Модуль жорсткості  $\beta$  лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{ном} s_k}, \quad (1)$$

де  $M_k$  - критичний момент асинхронного двигуна;

$\omega_{ном}$  - номінальна кутова частота обертання асинхронного двигуна;

$s_k$  - критичне ковзання асинхронного двигуна.

Критичний момент асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$M_k = m_k \cdot M_n, \quad (2)$$

де  $m_k = \frac{M_k}{M_n} = 2,7$  - відношення критичного моменту до номінального моменту асинхронного двигуна

M2AA112MB2 компанії АВВ у відповідності до табл. 1.

З виразу (2) визначимо критичний момент асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АВВ:

$$M_k = m_k \cdot M_n = 2,7 \cdot 13,192 = 35,62 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (3)$$

Номінальна кутова частота обертання асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$\omega_{ном} = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 2895}{60} = 303,203 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (4)$$

де  $n_n = 2895$  об/хв - номінальна швидкість обертання асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB у відповідності до табл. 1.

Визначимо критичне ковзання асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$s_k = \left( m_k + \sqrt{m_k^2 - 1} \right) s_n = \left( 2,7 + \sqrt{2,7^2 - 1} \right) 0,035 = 0,1823, \quad (5)$$

де  $s_n$  - номінальне ковзання асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{3000 - 2895}{3000} = 0,035, \quad (6)$$

де  $n_s = 3000$  об/хв - синхронна швидкість обертання асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB у відповідності до табл. 1.

Підставимо отримані значення  $M_k$ ,  $\omega_{ном}$  та  $s_k$  у вираз (1) і отримаємо значення модуля жорсткості  $\beta$  лінеаризованої механічної характеристики асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB:

$$\beta = \frac{2M_k}{\omega_{ном} s_k} = \frac{2 \cdot 35,62}{303,203 \cdot 0,1823} = 1,289. \quad (7)$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу  $T_e$  електричних кіл статора та ротора асинхронного двигуна визначається за допомогою виразу:

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 s_k} = \frac{1}{314,2 \cdot 0,1823} = 0,017c, \quad (8)$$

де  $\omega_0 = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 3000}{60} = 314,2 \frac{\text{рад}}{c}$  - кутова частота обертання асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB.

Електромеханічна постійна часу  $T_m$  асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB визначається за допомогою виразу:

$$T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{0,0061}{1,289} = 4,732 \cdot 10^{-3}c, \quad (9)$$

де  $J = 0,0061$  кг·м<sup>2</sup> - момент інерції асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії ABB у відповідності до табл. 1.

Спрощеній структурній схемі асинхронного двигуна, яка зображена на рис. 3, відповідає спрощена передавальна функція асинхронного двигуна, яка описується виразом:

$$W_d(p) = \frac{1}{T_m T_e p^2 + T_m p + 1}. \quad (10)$$

Для керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії ABB використаємо частотний перетворювач ACS150 компанії ABB, який зображено на рис. 4 [4].



**Рис. 4. Частотний перетворювач ACS150 компанії ABB [4]**

Передавальна функція частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу:

$$W_{чп}(p) = \frac{k_{чп}}{1 + T_{чп} p}. \quad (11)$$

Коефіцієнт передачі  $k_{чп}$  частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу:

$$k_{чп} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_m}{p_n \cdot u_{чпном}} = \frac{2 \cdot 3,142 \cdot 50}{2 \cdot 10} = 15,708, \quad (12)$$

де  $f_m = 50$  Гц – частота мережі;

$p_n = 2$  – число пар полюсів асинхронного двигуна M2AA112MB2

$u_{чпном} = 10$  В – номінальна напруга на вході частотного перетворювача ACS150.

Постійна часу кола керування частотного перетворювача ACS150 при високих частотах модуляції вихідної напруги дорівнює  $T_{чп} = 0,001$ .

Враховуючи вище наведені параметри, передавальну функцію частотного перетворювача ACS150 можна записати у вигляді:

$$W_{чп}(p) = \frac{15,708}{1 + 0,001 p}. \quad (13)$$

Особливістю частотного перетворювача ACS150 є реалізація ПІД керування за допомогою спеціального макросу. ПІД-регулятор задає пропорційний, інтегральний та диференціальний закон регулювання, який описується виразом:

$$U_{\text{ПД}}(t) = k_{\text{п}} \varepsilon(t) + k_{\text{і}} \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_{\text{д}} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (14)$$

де  $k_{\text{п}}$  - коефіцієнт пропорційної ланки ПД-регулятора;

$\varepsilon(t)$  - похибка керування;

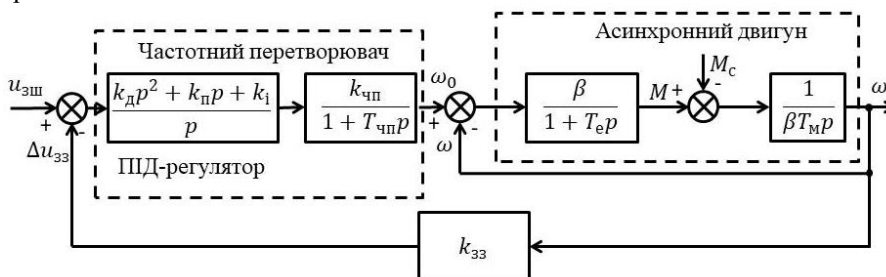
$k_{\text{і}}$  - коефіцієнт інтегральної ланки ПД-регулятора;

$k_{\text{д}}$  - коефіцієнт диференційної ланки ПД-регулятора.

Передавальна функція ПД-регулятора частотного перетворювача ACS150 визначається за допомогою виразу:

$$W_{\text{ПД}}(p) = \frac{k_{\text{д}} p^2 + k_{\text{п}} p + k_{\text{і}}}{p}. \quad (15)$$

Враховуючи передавальні функції усіх складових системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АВВ, спрощена структурна схема системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АВВ зображена на рис. 5.



**Рис. 5. Структурна схема системи керування асинхронним двигуном**

До складу спрощеної структурної схеми керування входить ланка від'ємного зворотного зв'язку із коефіцієнтом передачі  $k_{\text{зз}}$ , який визначається за допомогою виразу:

$$k_{\text{зз}} = \frac{u_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{1}{303,203} = 0,0033. \quad (16)$$

#### Висновки

Запропонована математична модель системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2 компанії АВВ із використанням частотного перетворювача ACS150 компанії АВВ. Розглянуто спрощену структурну схему та передавальну функцію асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АВВ. Розраховано коефіцієнти передавальної функції асинхронного двигуна M2AA112MB2 компанії АВВ на основі параметрів двигуна, які надаються виробником.

Запропонована передавальна функція частотного перетворювача ACS150 компанії АВВ та розраховано її коефіцієнти. Особливістю частотного перетворювача ACS150 є реалізація ПД керування за допомогою спеціального макросу. Розроблена структурна схема системи керування асинхронним двигуном M2AA112MB2.

#### Література:

1. Andrzej M. Trzynadlowski, Control of Induction Motors, Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, USA, 2001.
2. Motors and Generators. Режим доступу:  
<https://www.abb.com/motors&generators>
3. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родкін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. – Кременчук, 2001. – 410 с.
4. User's Manual ACS150 Drives. Режим доступу:  
[https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN\\_ACS150\\_Drives\\_UM\\_D\\_A4.pdf](https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN_ACS150_Drives_UM_D_A4.pdf)

#### References

1. Andrzej M. Trzynadlowski, Control of Induction Motors, Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, USA, 2001.
2. Motors and Generators. Access mode:  
<https://www.abb.com/motors&generators>
3. Chornyi O.P. Modeling of electromechanical systems: Textbook / Chornyi O.P., Lugovyi A.V., Rodkin D.J., Sisyuk G.Y., Sadovyi O.V. - Kremenchuk, 2001. – 410 p.
4. User Manual ACS150 Drives. Access mode:  
[https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN\\_ACS150\\_Drives\\_UM\\_D\\_A4.pdf](https://library.e.abb.com/public/dff8b3662110475cbbd5363575334004/EN_ACS150_Drives_UM_D_A4.pdf)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Нестерчук Олександр Русланович

Тема: Удосконалений метод керування технологічною лінією

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 17 Кількість сторінок записки 78

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу керування технологічною лінією. Алгоритм та програмна реалізація удосконаленого методу керування технологічною лінією. Дослідження удосконаленого методу керування технологічною лінією. Висновки.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі були розглянуті наступні питання: будова і принцип роботи технологічних ліній харчової промисловості. У другому розділі розроблено математичну модель процесу керування технологічною лінією. Розроблено удосконалений метод керування технологічною лінією У третьому розділі розроблено імітаційну модель процесу керування технологічною лінією за допомогою ПД-регулятора. У четвертому розділі проведені експериментальні дослідження удосконаленого методу керування технологічною лінією.
4. Позитивні сторони роботи: розробка програми керування в середовищі Factory I/O, яке використовується для моделювання систем керування технологічної лінії.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється аналізу похибок керування технологічною лінією.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.


8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (3,75/С)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

Косоу Юрій Павлович, к.т.н, доцент,  
завідувач кафедрі кібербезпеки

"19" грудня 2023 р.

 (підпис)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Удосконалений метод керування технологічною лінією

Автор: Нестерчук Олександр Русланович

Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 1,41% і адресується до 40 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 29.12.2023р.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Нестерчук О.Р.

---

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-22-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2023р.

дата



---

підпис

**Anti-Plagiarism v-15.257****Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%****Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 8%**

ID: 124883 Назва: МКР Удосконалений метод керування технологічною лінією Додано в БД: 2023-12-27 Автора: Олександр НЕСТЕРЧУК Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	84400	675	2067 (2%)	30 (4%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:  
1016037993

Дата перевірки:  
27.12.2023 11:36:10 EET

Тип перевірки:  
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:  
27.12.2023 11:41:52 EET

ID користувача:  
100005862

Назва документа: Нестерчук\_кваліфікаційна\_робота\_остаточна

Кількість сторінок: 81 Кількість слів: 12916 Кількість символів: 98224 Розмір файлу: 10.91 MB ID файлу: 1015731172

1442 слова позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

## 1.41% Схожість

Найбільша схожість: 0.59% з Інтернет-джерелом (<http://elar.khnu.km.ua/jspui/bitstream/123456789/10422/1/%d0%93%d>)

1.1% Джерела з Інтернету

35

Сторінка 83

1.02% Джерела з Бібліотеки

5

Сторінка 83

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Не знайдено жодних посилань

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

101