

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Мікроконтролерна система управління трифазними асинхронними електродвигунами**

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Пушкарь В.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Лактіонов О.І.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи «Мікроконтролерна система керування трифазними асинхронними електродвигунами»

Робота містить 85 сторінок, 23 ілюстрацій, 8 таблиць, 20 використаних джерел.

Ключові слова: асинхронний двигун, перетворювач частоти, програмований логічний контролер, електропривод, автоматизація технологічного процесу.

Об'єктом розроблення кваліфікаційної роботи є лінія механічної обробки металевих заготовок, до складу якої входить електропривод АД та ПЧ, що відповідають за переміщення заготовок уздовж лінії.

Метою даної кваліфікаційної роботи є автоматизованих промислових систем з підвищення надійності та точності функціонування електроприводів із використанням асинхронних трифазних електродвигунів.

В роботі передбачається застосування системи автоматизованого керування електроприводом з асинхронним двигуном, у складі технологічної лінії механічної обробки металевих заготовок. Основними елементами системи керування є перетворювач частоти Powerflex 700, та ПЛК ControlLogix.

Визначено, що візуалізація всього робочого процесу є ефективною частиною розробки автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вона забезпечує відображення найважливішої інформації щодо перебігу поточного процесу.

Алгоритм роботи автоматизованої лінії механічної обробки заготовок розроблено з урахуванням можливості його використання для навчальних потреб, та є одним із можливих варіантів розробки автоматизованих систем керування електроприводами.

ABSTRACT

qualification work "Microcontroller control system for three-phase asynchronous electric motors"

The work contains 85 pages, 23 illustrations, 8 tables, 20 used sources.

Keywords: asynchronous motor, frequency converter, programmable logic controller, electric drive, technological process automation.

The object of development of the qualification work is a line for mechanical processing of metal blanks, which includes an electric drive AD and an inverter, which are responsible for moving the blanks along the line.

The purpose of this qualification work is to develop automated industrial systems for improving the reliability and accuracy of the operation of electric drives using asynchronous three-phase electric motors.

The work envisages the use of an automated control system of an electric drive with an asynchronous motor, as part of a technological line for mechanical processing of metal blanks. The main elements of the control system are a Powerflex 700 frequency converter and a ControlLogix PLC.

It was determined that the visualization of the entire work process is an effective part of the development of automated control systems for technological processes. It provides display of the most important information regarding the course of the current process.

The algorithm of the automated line of mechanical processing of workpieces was developed taking into account the possibility of its use for educational needs, and is one of the possible options for the development of automated control systems for electric drives.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій

_____ О.В. Шефер

«01» квітня 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Пушкарь Валентин Вікторович

1. Тема роботи **Мікроконтролерна система управління трифазними асинхронними електродвигунами»**

керівник роботи Галай Василь Миколайович к.т.н., доц.

затверджена наказом вищого навчального закладу від ____ .2023 року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) потужність двигуна: від 1 до 10 кВт; частотний перетворювач Allen-Bradley PowerFlex; мікроконтролер (ПЛК) ControlLogix 556; програмне середовище RSLogix 5000; канал керування Ethernet/IP.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Загальні відомості про трифазні асинхронні двигуни. 2. Обґрунтування та вибір елементів системи керування електродвигуном. 3. Розробка схеми електричної принципової та опис технологічного процесу. 4. Налаштування автоматизованої системи керування електроприводом. 5. Алгоритм та програмна реалізація автоматизованого керування. 6. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) Загальна характеристика трифазних АД та відповідних режимів роботи;
- 2) Елементи системи керування трифазним АД;
- 3) Характеристика перетворювача частоти та асинхронного двигуна;
- 4) Схема електрична принципова ЕП;

- 5) Алгоритм роботи програми керування ЕП;
6) Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата	Категорія	Відсоток	
1	Загальні відомості про трифазні асинхронні двигуни та методи керування режимами їхньої роботи	26.04.23	I	20%	Пл. 1
2	Огляд та вибір елементів системи керування трифазним асинхронним електродвигуном	10.05.23		40%	Пл. 2,3
3	Вибір перетворювача частоти та асинхронного двигуна	24.05.23	II	60%	Пл. 4
4	Розробка схеми електричної принципової ЕП	07.06.23		80 %	Пл. 5
5	Опис процесу впровадження проекту та його результати. Висновки. Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра.	14.06.23	III	100%	Пл. 6

Студент _____ Пушкарь В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Галай В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ	9
1.1 Конструкція асинхронного електродвигуна.....	9
1.2 Принцип роботи асинхронного електродвигуна	10
1.3 Регулювання швидкості АД за допомогою перетворювачів частоти.....	16
1.4 Задачі модернізації.....	20
2 ОГЛЯД ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	21
2.1 Модульна система ПЛК CONTROLLOGIX	21
2.2 Мережа Ethernet.....	29
2.3 Перетворювач частоти PowerFlex	32
2.4 Асинхронний електродвигун	38
3 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ.....	39
3.1 Характеристика експлуатації автоматизованого електроприводу.....	39
3.2 Складання схеми електричної принципової	44
4 НАЛАШТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ	45
4.1 Середовище RSLogix 5000	45
4.2 Налаштування автоматики	47
4.3 Налаштування перетворювача частоти.....	48
4.4 Підключення індуктивного інкрементного датчика	49
5 АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	51
5.1 Алгоритм роботи програми автоматизації	51
5.2 Візуалізація процесу автоматизації.....	55
ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
ДОДАТКИ.....	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕД - електричний двигун

АД - асинхронний двигун

ПЧ - перетворювач частоти

ПЛК - програмований логічний контролер

IGBT - insulated-gate bipolar transistor

ФБ - функціональний блок

ФДП - функціональна діаграма послідовності

РС - релейна схема

ІТ - інформаційні технології

ШИМ - широтно-імпульсна модуляція

UTP - Unshielded Twisted Pair

LD - Ladder Diagram

ВСТУП

Актуальність теми роботи. Завдяки своїй простоті, надійності, низькій вартості та багатьом іншим характеристикам асинхронний двигун (АД) раніше був найбільш використовуваним у задачах, які не вимагали регулювання електричного приводу (ЕП), оскільки це було складним процесом і не давало бажаних результатів. Крім того, стрибки струму, які виникають під час запуску цього типу двигуна, були перешкодою для більш широкого впровадження. Однак з появою силової електроніки проблему регулювання та стрибків струму було вирішено, і сьогодні цей двигун також використовується для точного контролю швидкості, крутного моменту або позиціонування. Завдяки масовому виробництву блоків керування, наприклад, перетворювачів частоти (ПЧ), їхня ціна знизилася, і, отже, доцільність використання цього приводу розширилася, включаючи механізми, де важливою є точність регулювання ЕП.

Метою роботи є розробка методики побудови мікроконтролерної системи керування трифазними асинхронними електродвигунами.

Задачі роботи:

З урахуванням сформованих вимог до системи керування АД, задачі модернізації є наступними:

- 1) Провести вибір відповідних елементів системи керування електродвигуном.
- 2) Обрати визначені моделі трифазного асинхронного двигуна та перетворювача частоти.
- 3) Розробити схему електричну принципову електроприводу.
- 4) На основі сформованої системи електроприводу, навести характеристику протікання відповідного технологічного процесу.
- 5) Розробити алгоритм автоматизації технологічного процесу із застосуванням АД, ПЧ та програмованого логічного контролера.
- 6) Скласти висновки за результатами роботи.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ТРИФАЗНІ АСИНХРОННІ ДВИГУНИ

Асинхронний двигун, безсумнівно, є найбільш використовуваним двигуном в даний час, він завоював своє місце завдяки своїй надійності, простоті обслуговування і вартості. Він знайшов своє застосування як привід для вентиляторів, насосів, компресорів тощо. Раніше було дуже складно регулювати оберти цього двигуна, але ця проблема була вирішена з появою силової електроніки, особливо перетворювачів частоти. Можливість регулювання швидкості усунула найбільший і водночас по суті єдиний недолік цього двигуна та зумовила використання цього двигуна в системах, які вимагають точного регулювання швидкості або діапазону, і розширила межі застосування цього типу двигуна. В даний час двигун використовується в переважній більшості механізмів. Він виробляється в діапазоні потужностей від кількох ват до 20 МВт [1].

Асинхронні машини відносяться до великої групи електричних машин, що перетворюють електричну енергію на механічну і навпаки. Електричні машини діляться на двигуни, що перетворюють електричну енергію на механічну, і генератори, що перетворюють механічну енергію на електричну. Однак асинхронні машини використовуються виключно як двигуни з лінійним чи обертальним рухом. Найбільшою перевагою асинхронної машини є її простота, відсутність обслуговування та низька ціна.

1.1 Конструкція асинхронного електродвигуна

Як і інші електричні машини, асинхронний двигун складається з нерухомої частини (статора) та рухомої частини (ротора). Статор складається з чавунної, зварної або алюмінієвої конструкції та двох підшипникових щитів. В корпус статора запресовані листи, які ізольовані один від одного та утворюють магнітну частину контуру машини. Пластини ротора напресовані на вал, що обертається. Рух ротора можливий завдяки повітряному зазору між ротором та статором, який

визначається підшипниками у вже згаданих підшипникових щитах. Схема асинхронної машини показано на рис. 1.1.

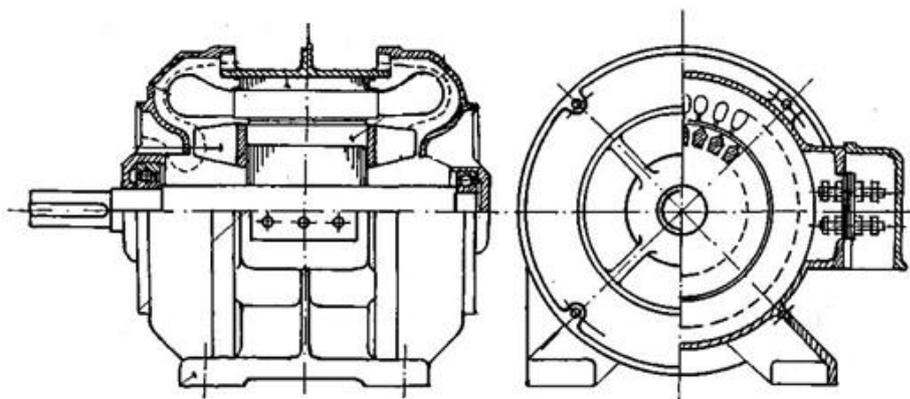


Рисунок 1.1 - Розташування основних частин асинхронного двигуна [2]

Обмотка статора, що зберігається в пазах, зазвичай трифазна, але може бути і однофазною або двофазною, початку та кінці якої виведені на клемник статора. Обмотка ротора, що також розміщується в пазах ротора, називається якорем. Для двигунів більшої потужності в канавках передбачені мідні або латунні неізолювані дроти, з'єднані кільцями. У менших двигунів обмотки відлиті разом із алюмінієвими лопатями вентилятора, і ця обмотка називається обмоткою «клітка». У двигунах із фазним ротором та кільцями трифазна обмотка із ізолюваних провідників зберігається в пазах. Початок фаз з'єднано з вузлом, які кінці з'єднані з трьома контактними кільцями, що примикають до щіток. Таким чином до двигуна підключаються пристрої регулювання швидкості та запуску [2].

1.2 Принцип роботи асинхронного електродвигуна

Принцип полягає у взаємодії обертового електромагнітного поля статора і ротора. Окремі котушки статора просторово зміщені на 120° і живляться від симетричної трифазної мережі. Хід струмів у цій мережі показано на рис. 1.2, створюють магнітне поле, що перетинає провідники ротора, в яких індукуються напруга. Ця напруга виникає тільки в припущенні щодо відносного руху

магнітного поля статора до руху ротора. Тобто різні обороти магнітного поля статора проти оборотами ротора. Цю різницю швидкостей називають ковзанням. Ковзання змінюється в залежності від навантаження на машину, тобто від величини моменту, що діє на ротор. Номінальне ковзання становить від 1% великих двигунів, до 10% малих. Швидкість статора залежить від частоти напруги живлення і кількості полюсів машини.

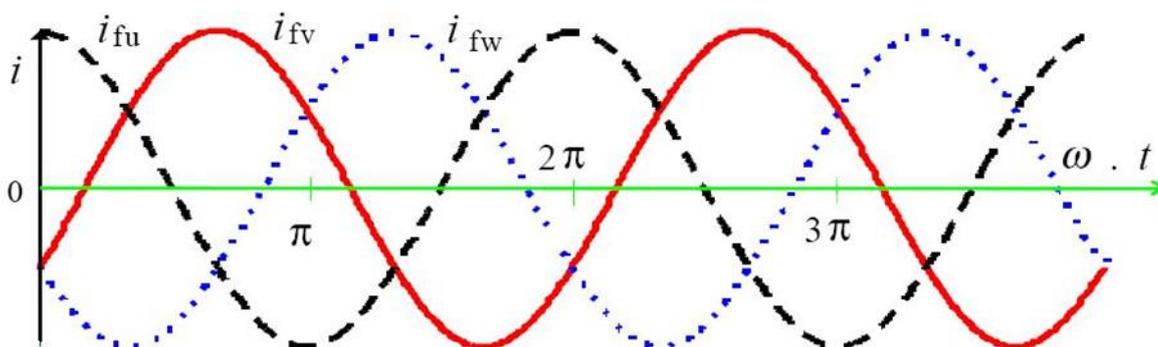


Рисунок 1.2 - Протікання струму в трифазній мережі [3]

Через проходження струму в окремих обмотках всередині статора виникає магнітне поле, утворене векторною сумою магнітних полів, створених окремими котушками. За рахунок часових ходів струму окремих фаз і просторового розподілу обмоток в статорі утворений утворюється обертове магнітне поле. Ротор, як правило, має обійму (рис. 1.3), стрижні розміщені в пазах ротора, а кільця з'єднані з обох кінців (виготовлені найчастіше як алюмінієві відливки).

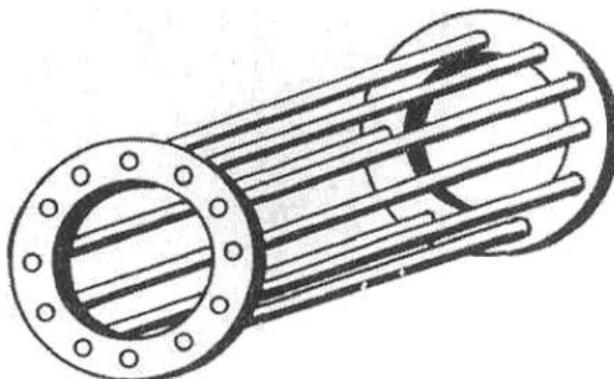


Рисунок 1.3 - Конструкція ротора АД [3]

Як було зазначено раніше, асинхронну машину експлуатують переважно у режимі двигуна. Інші режими, тобто гальмівний та генераторний, будуть описані нижче.

На рис. 1.4 показана характеристика крутного моменту, асинхронної машини, умовно розділена на 3 області (згідно рис. 1.4, зліва-направо). Перша область відображає зустрічне гальмування. Це стан двигуна, коли крутний момент, прикладений до валу двигуна, змушує двигун сповільнитися, зупинитися та обертатися у протилежному напрямку. В даному випадку момент позитивний. Крутний момент двигуна зменшується зі збільшенням негативних обертів, а струм, що споживається з мережі, зростає. У цих умовах двигун працює як гальмо, що дуже корисно для деяких застосувань, але в той же час через надмірний струм, що протікає, він термічно перевантажений, тому він не може працювати в такому стані протягом тривалого часу.

Друга частина характеристики виражає природну роботу двигуна. Крутний момент двигуна перевищує момент навантаження веденого пристрою, двигун запускається з динамічним крутним моментом, який дорівнює різниці між крутним моментом двигуна та моментом навантаження веденого пристрою, до тих пір, поки ці моменти не зрівняються та швидкість двигуна стабілізується. Крутний момент двигуна на нульовій швидкості називається пусковим моментом, і це момент, з яким двигун починає запускатися після підключення до мережі. При збільшенні обертів момент двигуна зростає до досягнення моменту повороту, цей момент є максимальним і позначає початок робочої частини характеристики. З цього моменту крутний момент двигуна почне зменшуватися зі збільшенням швидкості, поки ротор не досягне синхронної швидкості. У цей момент крутний момент двигуна дорівнює нулю, що є результатом його принципу обертання та закону індукції. Струм, що проходить через двигун, зменшується зі збільшенням обертів, коли ротор обертається з синхронною швидкістю, струм складається тільки з втрат.

Третя частина характеристики відповідає умові, коли двигун, змушений обертатися зі швидкістю, що перевищує синхронну швидкість, та відповідає режиму генератора.

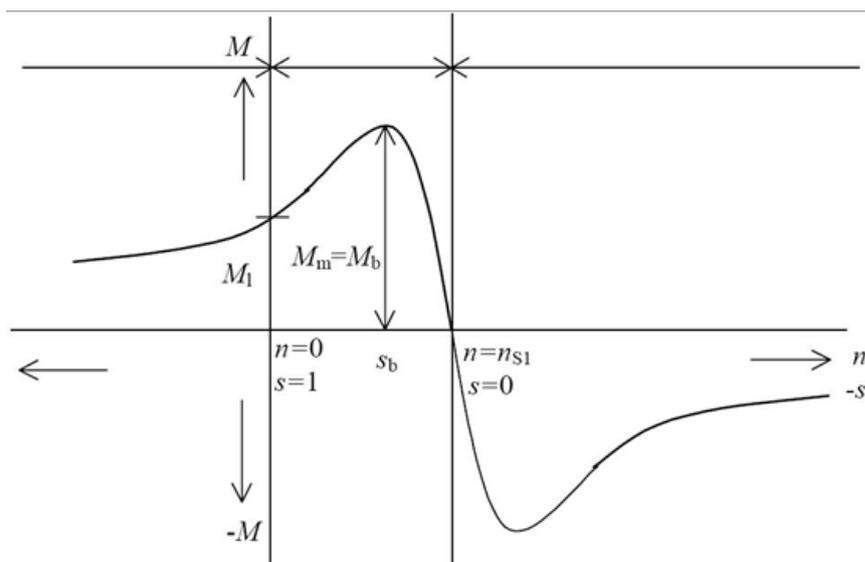


Рисунок 1.4 - Характеристики крутного моменту асинхронної машини [3]

Режими роботи АД

Гальмівний режим

У режимі гальмування ротор обертається проти напрямку обертового магнітного поля статора, створюється гальмівний момент, що діє проти напрямку обертання, ковзання більше 1, споживає надлишковий струм з мережі, викликаючи термічні та механічне напруження. Тому машину не можна використовувати занадто довго в цьому режимі.

Режим двигуна

Машина у цьому режимі має вищий крутний момент, ніж момент навантаження. Момент, у який двигун починає обертатися, називається пусковим моментом. У міру збільшення частоти обертання момент двигуна збільшується до максимуму, який називається крутним моментом. Потім крутний момент швидко зменшується до точки, в якій двигун досягає синхронної швидкості. На цьому етапі момент дорівнює нулю, ковзання дорівнює 0, двигун переходить в наступний режим.

Генераторний режим

Іншим режимом є режим генератора, у якому ротор машини має вищі обороти, ніж обороти магнітного поля статора. Напряга та струм міняються місцями, і машина генерує електроенергію в енергосистему [2].

Гальмування асинхронного двигуна

За рахунок кінетичної енергії частин, що обертаються, машина продовжує працювати тривалий час після відключення від мережі. За необхідності, можна гальмувати машиною іншу машину. Виконується гальмування трьома способами.

Протиточне гальмування

Протиточне гальмування реалізується простим підключенням двох фаз на клемній колодці статора. Це призводить до зміни напрямку обертання магнітного поля статора. Це дуже марнотратне гальмування, оскільки вся енергія двигуна перетворюється на тепло в резисторах ротора. Крім того, цей метод гальмування можна використовувати лише протягом короткого часу з огляду на значні струми, що протікають через обмотки двигуна.

Рекуперативне гальмування

Гальмування з генеруванням енергії в мережу відбувається, якщо частота обертання ротора вище за синхронну. Таким чином, машина діє як генератор, подаючи активну потужність в мережу. Двигун можна перевести в цей режим гальмування, змінивши кількість полюсів або за допомогою перетворювача частоти. Таким чином, машину не можна повністю зупинити.

Динамічне гальмування

Динамічне гальмування полягає у відключенні статора від мережі змінного струму та збудженні його постійним струмом. В статорній обмотці створюється постійний магнітний потік. Струм, що індукується в роторі, разом з утвореним потоком в статорі створює крутний момент, що діє проти ротора, що обертається. Крутний момент може створюватися навіть при низьких обертах і, таким чином, гальмувати двигун [2].

Пуск асинхронного двигуна

Через великий кидок струму, до електричної мережі загального користування можна підключати безпосередньо ті двигуни, пускова потужність яких менше 22 кВА. Це відповідає приблизно 3 кВт. Тому, при пуску двигуна потужністю більшою, ніж вже згадані 3 кВт, необхідно зменшити або усунути кидок струму одним із наступних засобів [2]:

Пуск двигуна з короткозамкнутим ротором виконується за допомогою:

- застосуванням стартера;
- перемиканням режимів зірка-трикутник;
- автотрансформатором;
- напівпровідниковими регуляторами напруги;
- спеціальною модифікацією клітки;
- подвійною кліткою.

Пуск двигуна з фазним ротором:

- за рахунок зміни повного активного опору ротора.

Регулювання швидкості асинхронного ЕД

Управління частотою обертання двигуна може бути реалізовано кількома способами. Зміна ковзання, що дуже неекономічно, або зміна числа полюсів, що призводить до ступінчастого регулювання і, нарешті, зміною швидкості магнітного поля статора. Останнє регулювання здійснюється перетворювачем частоти [2].

Перемиканням полюсів

Зміна кількості полюсів дозволяє регулювати швидкість тільки ступінчасто, причому кількість сходів невелика, зазвичай ступенів два. Більша кількість полюсів потребувала б складної комутації і зробила пропоновану машину дорожчою. Типовими прикладами асинхронного двигуна з двома ступенями є старі ліфти, що гальмують безпосередньо перед зупинкою в пункті призначення, або старі пральні машини, де для зміни режиму (прання та полоскання) використовувалися два ступені.

Зміною ковзання та напруги живлення

Регулювання швидкості зміною ковзання в кільцевих двигунах, включенням опору в ланцюг ротора дуже неекономічно, оскільки зношуються кільця та щітки.

Для двигунів з кліткою зміною квадрата напруги живлення змінюють крутний момент двигуна, а разом з ним і оберти. Це управління в основному використовується для так званого плавного запуску.

Зміною напруги та частоти

Цей тип управління застосовується відносно недовго, його почали застосовувати з розробкою IGBT-транзисторів, здатних комутувати великі потужності та підтримувати прийнятну швидкість перемикачів.

Таким чином, доцільним є розгляд ПЧ як перетворювач потужності для досліджуваного електрообладнання.

1.3 Регулювання швидкості АД за допомогою перетворювачів частоти

Принцип роботи перетворювача частоти

Це керування без втрат, при якому енергія, що підводиться до статора, надходить від джерела зі змінною частотою. Для регулювання швидкості необхідно підтримувати постійне співвідношення напруги живлення і частоти ($U/f = \text{const}$). Якщо зберігати це співвідношення постійним, магнітний потік і механічний і крутний моменти двигуна будуть постійними. Це використовується, наприклад, в трамваях, де вигідно мати максимальний крутний момент, до певної швидкості (а значить, і величину обертів) і тим самим забезпечити максимально можливе прискорення. Після досягнення певної величини частоти, зростання напруги припиняється (задане конструкцією перетворювача) і збільшується тільки частота. Двигун починає гасити збудження, крутний момент, гіперболічно знижується, а потужність, яка до цього зростала лінійно, стабілізується. Ця поведінка нагадує послідовний двигун постійного струму. Тому цей привід широко використовується в електричній тязі [4].

Типи перетворювачів частоти

Перетворювачі частоти виконуються в двох основних варіантах: прямі та непрямі перетворювачі.

Прямі перетворювачі частоти складаються з чотирьох інвертуючих тиристорних випрямлячів, які перемикають вхідну частоту для створення іншої вихідної частоти. Таким чином можна створити вихідну частоту до 25% від вхідної частоти, тому ці перетворювачі використовуються для повільно працюючих двигунів з великою потужністю. У матричних інверторах використовуються замикаючі транзистори або тиристори GTO, що дозволяє досягти вихідної частоти вище вхідної.

Непрямі перетворювачі частоти [5] (з проміжною ланкою постійної напруги) мають три основні частини: випрямляч, проміжна ланка постійної напруги та інвертор з транзисторами IGBT.

Найвідомішими та найбільш використовуваними є непрямі перетворювачі з проміжною ланкою постійної напруги (рис. 1.5). В якості випрямляча можна використовувати шестипульсний випрямляч в більш дешевих варіантах, а в більш дорогих варіантах цей випрямляч також дозволяє повертати енергію назад в мережу. Проміжний ланцюг напруги утворений електролітичним конденсатором, доповненим гальмівним резистором, який використовується для гальмування двигуна без рекуперації. У трифазному інверторі з транзисторами IGBT використовується синусоїдальна широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), яка полягає в поперемінному підключенні навантаження до напруги проміжної ланки, завдяки характеристикам індуктивного навантаження протікає майже синусоїдальний струм.

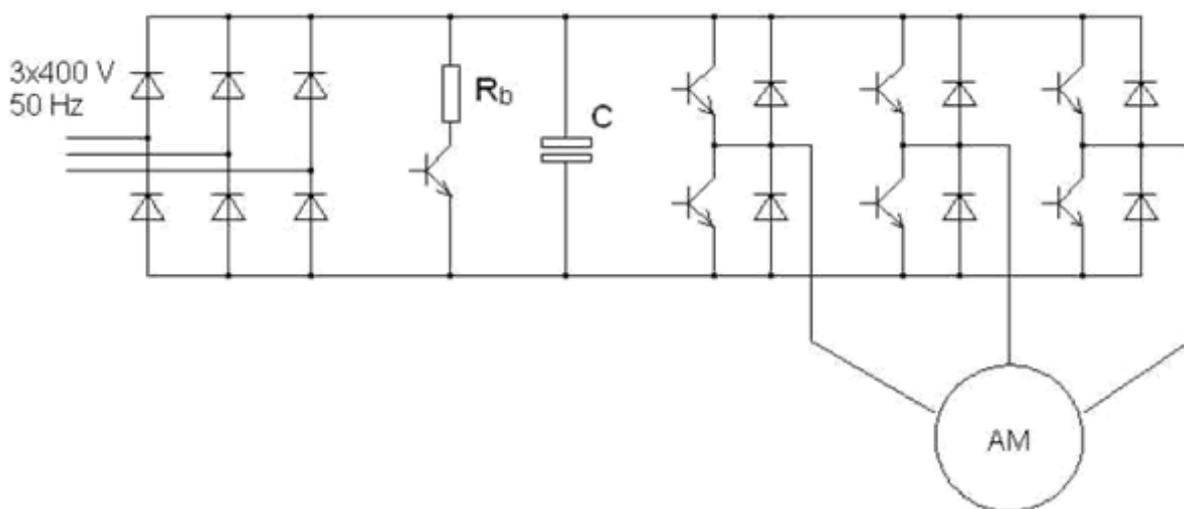


Рисунок 1.5 - Структура перетворювача частоти з проміжною ланкою постійної напруги [5]

Види керування двигуном засобами перетворювача частоти

Скалярний контроль

Це найбільш використовуване керування, яке іноді називають керуванням типу напруга/частота. Перевага цього методу керування полягає в можливості керування у відкритому контурі, тобто без зворотного зв'язку. Повідомляється, що понад 90% регульованих асинхронних двигунів у промисловості керуються скалярним керуванням без зворотного зв'язку [4]. Недоліком цього керування є те, що воно не досягає таких хороших результатів у регулюванні статичної точності регулювання та динаміки приводу, як інші методи керування, за допомогою введення зворотного зв'язку та використання ПІ-регулятора, де статична точність значно покращується, але динамічні властивості приводу все ще не такі ефективні, як інші типи керування.

Скалярний контроль полягає в регулюванні постійної магнітного потоку в двигуні, що забезпечується підтриманням постійного співвідношення вхідної напруги та частоти. На низьких частотах неможливо підтримувати постійний магнітний потік двигуна, і, отже, крутний момент у цій зоні зменшується. На високих частотах неможливо продовжувати його збільшення через занадто високу

напругу, це призводить до рівномірного зменшення крутного моменту. На рисунку 1.6 наведена характеристика моменту двигуна зі скалярним керуванням.

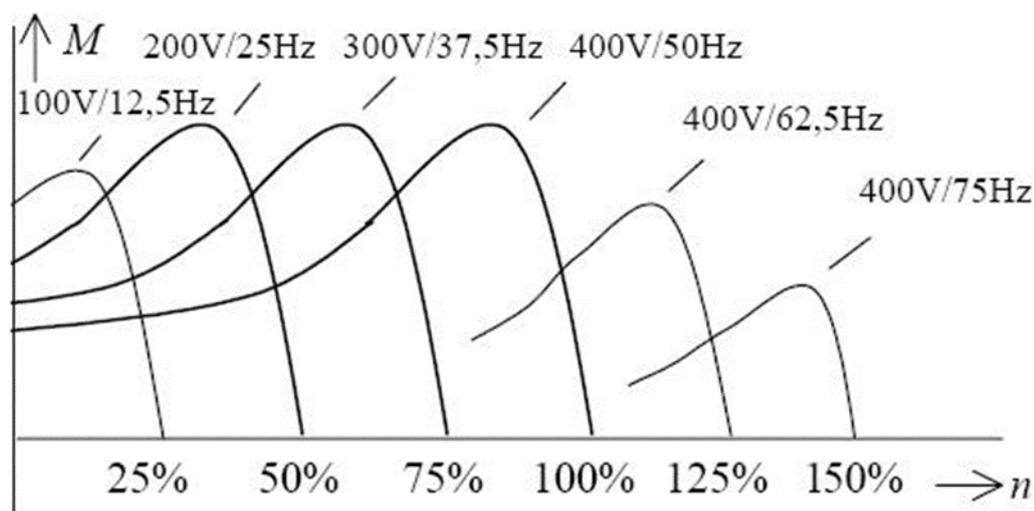


Рисунок 1.6 - Падіння крутного моменту при скалярному регулюванні АД [4]

Векторне керування

При векторному керуванні необхідно контролювати не тільки значення магнітного вектора, а також положення обертання. Векторне керування поділяється відповідно до способу отримання інформації про положення вектора магнітного потоку, на прямий і непрямий методи.

Прямий метод - вектор магнітного потоку отримується з напруги статора та струмів. Якщо наявною є математична модель для розрахунку ковзання, додаткові вимірювання швидкості або положення ротора не потрібні.

Непрямий метод - вектор магнітного потоку розраховується з математичної моделі розрахунку ковзання та положення ротора, що тягне за собою необхідність вимірювання положення ротора. Датчик положення ротора також можна використовувати для регулювання швидкості та положення. PI-регулятор використовується для регулювання швидкості, як і в скалярному регулюванні, тільки PI-регулятор використовується для керування положенням.

Підтримання моменту

Для цього методу важливо мати в наявності точну модель двигуна. Це визначається під час ідентифікаційного запуску, який виконується, коли двигун встановлено в програмі. Крутний момент двигуна формується векторним добутком вектора магнітного потоку статора і ротора. Якщо підтримувати постійне абсолютне значення потоку статора, крутний момент буде пропорційним величині кута потоку статора та ротора. Під час ідентифікаційного прогону коригуються основні параметри моделі двигуна. Пряме керування крутним моментом вимагає потужного мікропроцесора. Принцип полягає в створенні обертового магнітного поля статора з можливістю керування швидкістю обертання цього поля і, таким чином, моментом двигуна. Це керування забезпечує дуже хороші результати для динамічно-вимогливих систем, але проблема цього керування полягає в низькій швидкості реверсу [4].

Гальмування двигуна за допомогою перетворювача частоти

Перетворювачі частоти дозволяють гальмувати двигун постійною напругою []. Цей метод гальмування використовується для зупинки ротора. Для уповільнення використовується генераторне гальмування [5], описане у попередніх розділах, під час якого частота поступово зменшується і, таким чином, синхронні оберти також знижуються. Таким чином двигун переходить у стан генератора, а перетворювач підтримує цей стан до зупинки вала двигуна. При уповільненні двигуна, що є більш вимогливим, проміжна ланка постійної напруги генерує відповідні імпульси, джерелом яких є згенерована двигуном енергія. Ця проблема вирішується підключенням резистора, на якому надлишок потужності проміжної ланки перетворюється в теплову енергію.

1.4 Задачі модернізації

За результатами аналізу характеристик та режимів роботи АД, проведеного у попередніх пунктах, вимогами до системи керування двигуном є:

- широкий діапазон регулювання обертів двигуна;

- можливість підтримання постійної швидкості/моменту;
- контроль струму двигуна;
- контроль температури обмоток статора засоби обчислювальної потужності перетворювача потужності;
- плавний пуск;
- реалізація точності позиціонування робочого органу механізму за рахунок плавності виконання заданих режимів роботи двигуна;

З урахуванням сформованих вимог до системи керування АД, задачі модернізації є наступними:

- 1) Провести вибір відповідних елементів системи керування електродвигуном.
- 2) Обрати визначені моделі трифазного асинхронного двигуна та перетворювача частоти.
- 3) Розробити схему електричну принципову електроприводу.
- 4) На основі сформованої системи електроприводу, навести характеристику протікання відповідного технологічного процесу.
- 5) Сформулювати висновки за результатами модернізації.

2 ОГЛЯД ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Відповідно до характеристики режимів експлуатації АД, сформованої у попередньому розділі, далі наведено відповідні елементи системи керування двигуном.

2.1 Модульна система ПЛК CONTROLLOGIX

Ця система вперше представлена компанією Allen Bradley у 1999 році на Ганноверському форумі. Окремі модулі поміщаються в корпус з блоком живлення, корпус виготовляється у різних розмірах: 4, 7, 10, 13 і 17 модулів. Розташування модулів у корпусі є довільним, може бути більше одного процесора. У цьому

випадку кожен процесор після завантаження своєї програми шукає модулі, якими він керуватиме, і завантажує до них конфігураційні дані, ці дані визначають метод і період комунікації. Система дозволяє вставляти і знімати модулі або їх клемники під час роботи машини. При необхідності більшої кількості модулів блок можна підключити до одного з комунікаційних блоків, найчастіше через мережу ControlNet [6]. Тут використовується ControlBus для внутрішнього зв'язку. Окрім методу зв'язку клієнт/сервер (для передачі некритичних за часом даних), ця паралельна 64-розрядна шина також використовує метод виробник/споживач (для передачі циклічних критичних за часом даних). Перевагою також є можливість надання даних із міткою часу. Усі модулі мають однакові права доступу до шини.

Процесор ControlLogix 5561

Це процесор із серії ControlLogix 556x [7] з 2 МБ пам'яті користувача, 64 МБ пам'яті CompactFlash для резервного копіювання програм, коли ПЛК вимкнено. Це потужний процесор, який підтримує обробку до 32 завдань. Процесор також включає апаратну та програмну діагностику. Модуль можна програмувати за допомогою інтегрованого інтерфейсу RS-232 або за допомогою іншого комунікаційного модуля (Ethernet/IP, ControlNet, DeviceNet тощо) у блоці. Пам'ять, зарезервована для входів і виходів, має розмір 478 МБ, тому можна підключити до 128 000 цифрових і 4000 аналогових входів і виходів. Для роботи модуля не потрібна резервна пам'ять CompactFlash або батарея, але в цьому випадку із даних резервної пам'яті не будуть створені резервні копії програм з релейною схемою (РС), структурованим текстом, функціональними блоками (ФБ) та/або функціональними діаграмами послідовності (ФДП). Характеристику модуля наведено у таблиці 2.1 а зовнішній вигляд на рис. 2.1.

Таблиця 2.1 - Характеристика ПЛК CONTROLLOGIX [9]

Параметр	Значення
Пам'ять користувача	2 МБ
Резервна пам'ять	64 МБ
Інтерфейс зв'язку	RS-232
Макс. кількість цифрових входів/виходів	128 000
Макс. кількість аналогових входів/виходів	4000
Пам'ять введення/виведення	478 Кб
Міцність ізоляції	30 В постійно, 707 В протягом 60 секунд
Маса	0,32 кг
Індекс температури ІЕС	T4 (макс. постійна температура поверхні 135°C)
Каталожний номер	1756-L61A



Рисунок 2.1 - Модуль 1756-L61 А

Модуль Ethernet/IP

Підрозділ 2.2 присвячено мережі EtherNet/IP, тому зараз не буде проводитися його детальний опис. Слід лише зазначити, що ця мережа, повністю сумісна з Ethernet використовується в сфері інформаційних технологій (ІТ), і її єдина відмінність полягає в прикладному рівні, який забезпечує безпеку та відповідність у режимі реального часу. Характеристику модуля наведено у таблиці 2.2 а зовнішній вигляд показано на рис. 2.2.

Таблиця 2.2 - Характеристика модуля 1756-ENBT A [8]

Параметр	Значення
Швидкість передачі	10/100 Мбіт/с
Макс. кількість ліній зв'язку	128 Logix, 64 TCP/IP
Споживана потужність	3,65 Вт
Міцність ізоляції	30 В постійно, 707 В протягом 60 секунд
Роз'єм порту	RJ45, категорія 5
Каталожний номер	1756- ENBT A



Рисунок 2.2 - Модуль 1756-ENBT A

Модуль HSC

Модуль швидкого лічильника [8] містить два незалежні каналні швидкі лічильники для моніторингу дуже швидких операцій, таких як виходи від інкрементних кодерів або виходи інших лічильників. Канали кожної пари лічильників позначено: А, В і Z, які точно відповідають виходам датчика інкрементного положення. Користувачеві доступні два програмованих цифрових виходи для кожного лічильника. Ці виходи керуються безпосередньо модулем лічильника і тому не залежать від програми, що виконується в ПЛК. Лічильник реалізує чотири варіанти режимів роботи.

Режим лічильника

Завантажені імпульси надходять на вхід А, і стан входу В визначає, чи ведеться відлік угору чи вниз. Інший вхід Z може мати наступні чотири функції:

1) STORE/CONTINUE: при наростаючому фронті сигналу на вході Z поточне значення лічильника перезаписується в регістрі захоплення STORE, звідки користувач може вилучити його та використовувати для цілей керування. Читання продовжується незалежно від цієї операції.

2) STORE/WAIT/RESUME: ця функція відрізняється від попереднього лише тим, що на час дії сигналу на вході Z підрахунок імпульсів на вході А припиняється і починається з надходженням спадного фронту сигналу на вході Z.

3) STORE-RESET/WAIT/START: при наростаючому фронті сигналу на вході Z перезаписується поточне значення, а підрахунок призупиняється і починається з надходженням спадного фронту сигналу на вхід Z. Відмінність від попередньої функції полягає в скиданні лічильника за допомогою переднього фронту сигналу на вході Z.

4) STORE-RESET/START: з надходженням переднього фронту сигналу на вхід Z поточне значення лічильника зчитується в регістр STORE, лічильник скидається і негайно перезапускається незалежно від тривалості сигналу на вході Z.

Режим X кодера1

Зміщені по фазі виходи А і В екодера підключаються до входів А і В. Після запису всього періоду на обох входах значення в лічильнику збільшується або зменшується в залежності від того, в прямому чи зворотному напрямку обертається екодер, лічильник сам декодує цей напрямок. Вхід Z можна використовувати так само, як і в режимі лічильника.

Режим X кодера4

Цей режим відрізняється від попереднього лише тим, що значення в лічильнику збільшується або зменшується на будь-якому фронті сигналу А чи В. Це рішення призводить до чотирикратного збільшення роздільної здатності кодера.

Частотний режим

У цьому режимі на вхід А подається потрібний сигнал і значення лічильника відповідає періоду вхідного сигналу.

Характеристика модуля HSC наведена у таблиці 2.3 а зовнішній вигляд показано на рис. 2.3.

Таблиця 2.3 - Характеристика модуля лічильника 1756-HSC A [8]

Параметр	Значення
Кількість лічильників	2
Кількість входів кожного лічильника	3 (A, B, Z)
Кількість цифрових виходів	4 (по 2 на кожному лічильнику)
Вхідна напруга	4,5-5,5 В або 10-31,2 В
Вхідні струми	300 мА для 5,1 В і 3 мА для 24 В
Міцність ізоляції	125 В - тривало, 1700 В - короткочасно (1 с)
Вхідна частота	Режим лічильника 1 МГц; Частотний режим 500 кГц; Режим кодера 250 кГц X1, X2.
Час перемикання виходу	20 мкс - постійний; 50 мкс - максимальний.
Час відкриття виходів	60 мкс - постійний; 300 мкс - максимальний.
Каталожний номер	1756-HSC A



Рисунок 2.3 - Модуль 1756-HSC A

Модуль логічних виходів

Логічні виходи використовуються в промисловості для сигналізації або управління процесами, наприклад, індикатори різних станів пристроїв або спрацьовування різних реле. Модуль логічного виходу, який розглядається в даному випадку, містить шістнадцять виходів у двох групах. Модуль також містить передню панель з індикацією стану окремих виходів із самодіагностикою. Кожен вихід поводить себе як перемикаючий елемент з уніполярним транзистором, який здатний перемикати напругу до 30 В постійного струму та струм 2 А (4 А за 10 мс з періодом 1 с). Усі виходи оптично розділені. Характеристику модуля наведено у таблиці 2.4 а зовнішній вигляд показано на рис. 2.4.

Таблиця 2.4 - Характеристика модуля логічних входів/виходів [8]

Параметр	Значення
Кількість виходів	16
Робоча напруга	19-30 В постійного струму
Час перемикання	1 мс
Час відкриття	5 мс
Макс. струм через один вихід	2А, 4А протягом 10 мс з періодом 1 с
Міцність ізоляції	250 В, 2546 В постійного струму протягом 1 с
Каталожний номер	1756-OB16D А



Рисунок 2.4 - Модуль 1756-OB16D А

Модуль логічних входів

Цифрові виходи використовуються в промисловості для моніторингу дискретних подій, наприклад, замикання контактора або активація кінцевого вимикача. Логічний модуль входів, що використовуються в даному випадку, містить шістнадцять входів у двох групах, модуль також містить передню панель з індикацією стану окремих входів і самодіагностики. Для того, щоб вхід був активований, до нього повинен бути застосований лічильник напруги заземлення системи 10-30 В. При необхідності також можна встановити цифровий фільтр. Усі входи, звичайно, оптично розділені. Характеристику модуля наведено у таблиці 2.5 а зовнішній вигляд показано на рис. 2.5.

Таблиця 2.5 - Характеристика модуля логічних входів Модуль 1756-IB16 А [8]

Параметр	Значення
Кількість входів	16
Робоча напруга	10-30 В постійного струму
Час перемикання	1 мс+ фільтр (0, 1, 2 мс)
Час відключення	2 мс+ фільтр (0, 1, 2, 9, 18 мс)
Макс. струм при активному вході	10 мА
Макс. вхідний опір	3,12 кΩ
Міцність ізоляції	250 В, 2546 В постійного струму протягом 1 с
Каталожний номер	1756-IB16А



Рисунок 2.5 - Модуль 1756-IB16 А

2.2 Мережа Ethernet

На початку 1970-х років компанії Херох потрібно було підключити кілька комп'ютерів до принтера через послідовний інтерфейс, і тому була розроблена перша версія Ethernet [9], ця версія досягла швидкості передачі до 2,94 Мбіт/с і дозволяла підключати до 100 учасників. У 1978 році до Херох приєдналися DEC і Intel для створення нової версії Ethernet V1.0, відомої як DIX Ethernet. На початку 80-х років Ethernet був стандартизований як IEEE 802.3s зі швидкістю передачі 10 Мбіт/с, топологією шинного типу з використанням коаксіального кабелю та методом доступу CSMA/CD. У наступні роки Ethernet розвивався, його швидкість передачі становила 100 Мбіт/с, 1 Гбіт/с, нарешті, досягла 10 Гбіт/с, а топологія та фізичні шляхи передачі змінювалися. Замість коаксіального кабелю стала використовуватися вита пара, топологія змінилася з шини на деревовидну. Зараз Ethernet є масовим та використовується в локальних мережах для з'єднання

комп'ютерів один з одним, а також для підключення периферійних пристроїв. Його популярність і, перш за все, його ціна, яка досягла дуже низького рівня завдяки масовому виробництву, сприяють великому розвитку Ethernet.

Уже в другій половині 1980-х років Ethernet був експериментально використаний в промислових мережах. Прикладом може бути мережа Sines H1, яка використовувалася для підключення ПЛК, була повністю сумісна зі стандартом 802.3, але акцент був зроблений на надійних роз'ємах і високоякісному екрануванні. Пізніше також з'явилися версії (наприклад, Sines H1FO), що використовують оптичні волокна для передачі в дуже «шумному» середовищі або для передачі на великі відстані. Однак у той час великі ресурси витрачалися на розвиток промислових мереж, і тому основою зв'язку в промисловості стали такі мережі, як Field bus, Device bus і т. д. Наприкінці 1990-х все частіше стала виникати потреба у комунікації між промисловістю та ІТ-сферою. Тому Ethernet знову почав розвиватися як промислова мережа. Дуже важливо розуміти, що Ethernet у промисловості - це не те саме, що його варіанти в галузі ІТ, і його розвиток у сферах функціональної безпеки та роботи в режимі реального часу значно покращився за останні роки, що дозволяє ефективно використовувати його в промисловості [9].

Ethernet/IP (EtherNet)

Ethernet/IP вперше представлено у 2001 році як продукт консорціуму ODVA (Open DeviceNet Vendor Association) та міжнародного консорціуму ControlNet під керівництвом Rockwell Automation. Його стандартизація відбулася у 2005 році під назвою ІЕС 62413. Серед його головних переваг - повна сумісність із мережами Ethernet, тому класичні компоненти Ethernet можна використовувати, наприклад, для підключення ПК до мережі Ethernet/IP [10]. Тут достатньо лише «звичайної» мережевої карти, яка є досить дешевим, швидким і доступним рішенням. Рівні Ethernet/IP і класичного Ethernet не відрізняються, за винятком останнього прикладного рівня. Таким чином, безпека та у реальному часі гарантуються прикладним рівнем, що складається з протоколу СІР (Common Industrial Protocol), який також використовується в мережах ControlNet та DeviceNet (рис. 2.6). Цей

протокол використовує об'єктну обробку окремих вузлів і їх властивості. Кожен пристрій характеризується своєю групою об'єктів, а кожен об'єкт характеризується своїми даними, командами та відповідями на події. Існують різні групи об'єктів, що ідентифікують пристрої, визначають передачу повідомлень, для повідомлень підключення та параметрів конфігурації мережі.

Мережа Ethernet/IP [] використовує два типи передачі: явну (TCP/IP) передачу типу запит-відповідь між двома вузлами та неявну (UDP/IP), для циклічної передачі даних користувача та даних введення/виведення.

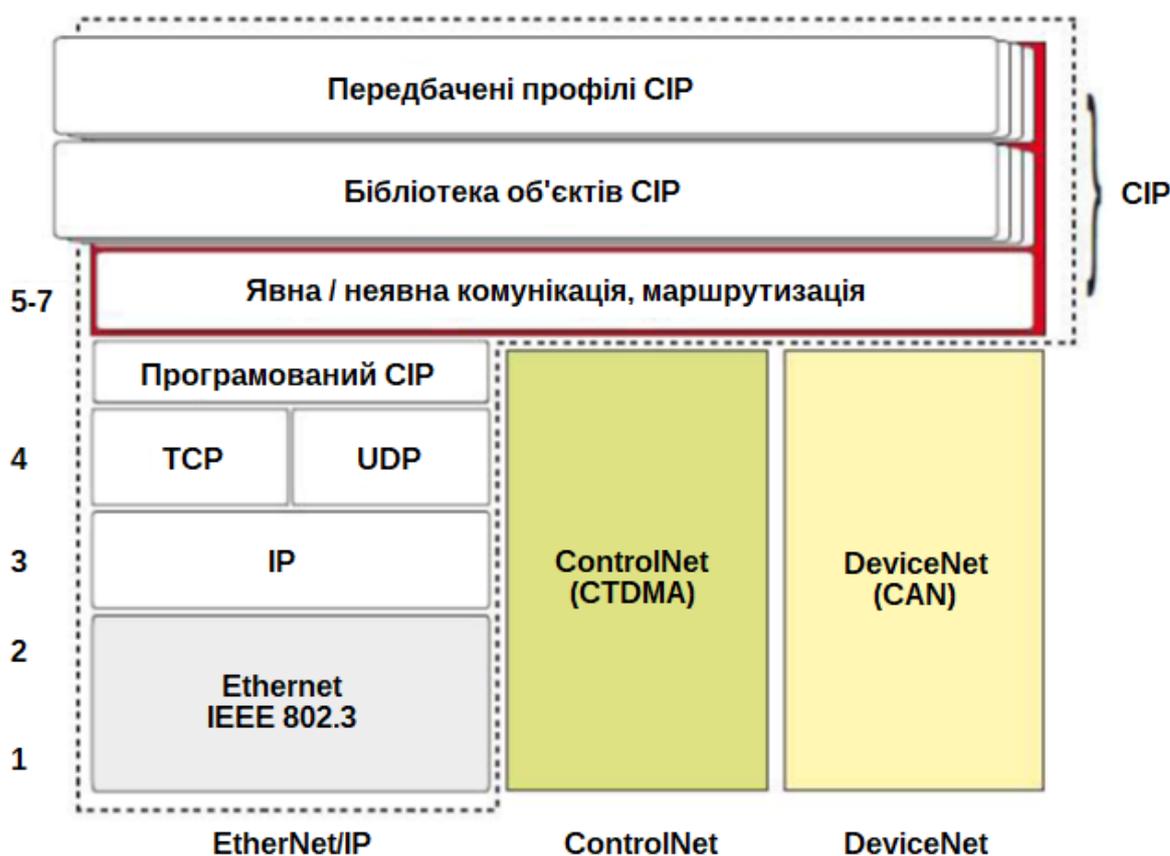


Рисунок 2.6 - Модель ISO/OSI для EtherNet/IP, ControlNet, DeviceNet [10]

Протокол CIP використовує два принципи зв'язку: пов'язаний для передачі високопріоритетних даних вводу/виводу та передача без з'єднання нерегулярних даних з низьким пріоритетом. Зв'язок відбувається наступним чином: вузол, який запитує з'єднання (ініціатор), надсилає явне повідомлення без підключення із запитом на з'єднання, що містить мітку параметрів з'єднання, а одержувач

з'єднання (ціль) надсилає підтвердження з параметром (ідентифікатор, неявна/явна передача, циклічна зміна даних/стану, кількість і формат переданих даних) і встановлює з'єднання. Реальний відгук мережі забезпечується поділом доменів за допомогою комутаторів (рис. 2.7) і достатньою пропускнуою здатністю мережі.

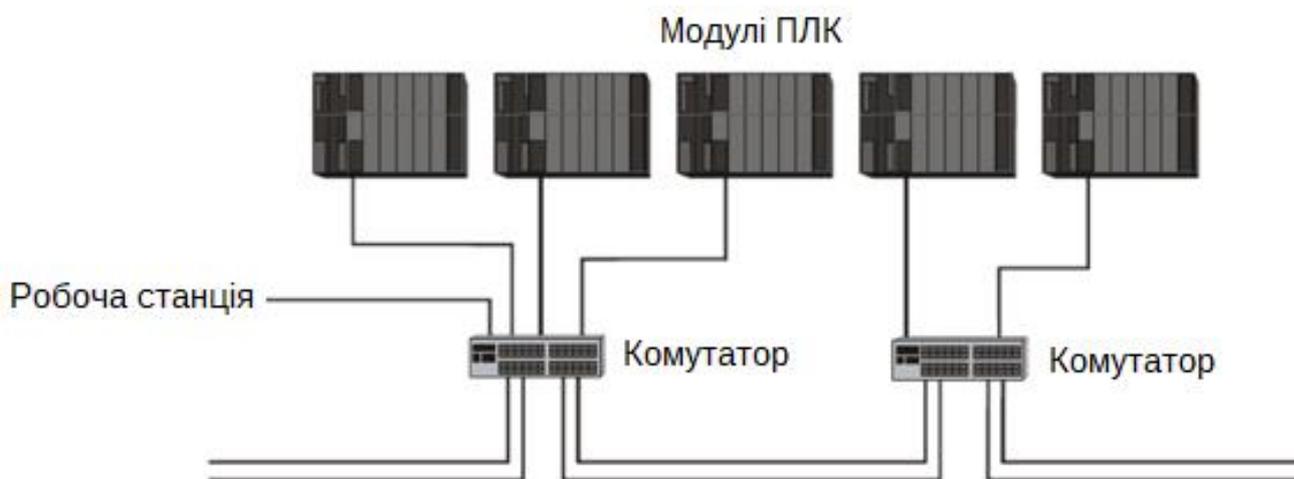


Рисунок 2.7 - Схема підключення модулів ПЛК

2.3 Перетворювач частоти PowerFlex

Перетворювач частоти фірми Allen-Bradley серії PowerFlex [11] характеризується простотою експлуатації та компактністю всього пристрою (рис. 2.8). Allen-Bradley пропонує перетворювачі потужністю від 0,37 кВт до 132 кВт з напругою живлення від 200 до 240 В змінного струму, від 380 до 480 В змінного струму, від 500 до 600 В змінного струму, 690 В змінного струму, 540 В постійного струму та 650 В постійного струму у варіантах значення номінального струму від 1,1 А до до 180А.

Перетворювачі серії PowerFlex пропонують три основних типи керування: генерування крутного моменту, регулювання швидкості, регулювання крутного моменту. У режимі генерування крутного моменту двигуном використовується метод, відомий як U/f , перетворювач має функцію безсенсорного вектора, яка на основі відомих параметрів двигуна покращує генерування крутного моменту та розширює діапазон використовуваних швидкостей. Ця опція використовується в

промисловості для управління приводами центрифуг, пресів або конвеєрів. У режимі керування швидкістю присутня компенсація ковзання, яка досягає точності до 0,5% від номінальної швидкості або можливе векторне керування за допомогою енкодера. При використанні енкодера швидкість може регулюватися до 0,001% від номінальної. Для регулювання крутного моменту можна використовувати функцію «Encoderless», управління крутним моментом без зворотного зв'язку від енкодера або управління крутним моментом «Fore Technology» зі зворотним зв'язком. Цей тип регулювання дозволяє досягти відмінних результатів у всьому діапазоні швидкостей, включаючи низькі оберти. Перетворювач також містить ПІ-контролер, модуль динамічного гальмування, який зменшує потребу у використанні гальмівного резистора, мережевий фільтр для придушення небажаних частот і виявлення збою живлення.

Функція «Auto-tune» оптимізує налаштування інвертора відповідно до підключеного приводу та навантаження. Звичайно, є функції заборонених частот, зниження споживання в режимі сну і т.д. Перетворювач також має пам'ять для останніх 8 тривог і виявлення помилок із записом часу події, світлодіоди показують поточний стан пристрою (працює, зупинка, помилка). На передній панелі розташований РК-дисплей з клавіатурою (рис. 2.9), за допомогою якого здійснюється налаштування та керування інвертором.

Стандартний блок введення/виведення має 6 цифрових входів, 2 релейних виходи та 2 аналогових входи. Модуль зв'язку для мережі Ethernet/IP підключається до порту DPI 5. Також присутні модулі для DeviceNet, ControlNet, Universal Remote I/O, RS-232/485, Profibus, Interbus-S, Modbus і Modbus+ [11].

Характеристика перетворювача частоти наведена у табл. 2.6.



Рисунок 2.8 - Перетворювач частоти PowerFlex 700



Рисунок 2.9 - LCD дисплей з клавіатурою

Таблиця 2.6 - Характеристика перетворювача частоти PowerFlex 700 [12]

Параметр	Значення
Напруга живлення	400В, 3-ф
Вихідний струм	11А
Ізоляція	IP 20
Напруга керування	24 В змінного/постійного струму
Відхилення вхідної напруги	±10%
Відхилення частоти	47-63 Гц
Макс. струм короткого замикання	200А
Продуктивність при живленні від однієї фази	50%
Межа перенапруги на вході	475 В змінного струму
Межа перенапруги проміжного кола	810 В постійного струму
Межа зниженої напруги проміжного кола	305 В постійного струму
Номінальна напруга проміжного кола	540 В постійного струму
Час роботи при відключенні електроенергії	15 мс при повному навантаженні
Робота керуючої логіки при відключенні електроенергії	2 с
Експлуатація на висоті над рівнем моря	1000 м без падіння показників
Робочий діапазон температури навколишнього середовища	0-50°C
Максимальна відносна вологість	90% без конденсації
Допустима вібрація	амплітуда 0,152 мм, 1G

У PowerFlex 700 вихідна напруга має синусоїдальну модуляцію ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) з програмованою несучою частотою (2, 4, 8 і 10 кГц). Діапазон вихідної напруги становить 0-540 В, частота 0-420 Гц з точністю $\pm 0,01\%$ від поточної частоти при використанні цифрового входу і $\pm 0,4\%$ від максимальної вихідної частоти при використанні аналогового входу. Похибка регулювання швидкості розімкненого контуру $\pm 0,5\%$ від номінальної швидкості. Гальмування можна налаштувати як рух накатом, гальмування постійним струмом, та остаточне ненульове значення. Для запуску і зупинки можна використовувати два програмованих незалежних таймера в діапазоні 0-3600 секунд з кроком 0,1 с. Перетворювач допускає перевантаження на 110% протягом 1 хвилини або 115% на 3 секунди.

Ручне керування

Ручне керування інвертором здійснюється шляхом підключення елементів керування до клемної колодки касети керування [11], яка розташована з лівого боку інвертора. Так, можна керувати роботою двигуна, наприклад, за допомогою кнопок

і швидкістю за допомогою потенціометра, струму або напруги. Для правильної роботи окремих контактів їх завжди необхідно налаштувати на відповідні параметри інвертора.

Нижче розглянуто можливі способи використання регулювання швидкості. У першому випадку це плавне регулювання швидкості тільки в одному напрямку обертання двигуна. Це робиться шляхом підключення потенціометра (рекомендований опір 10 кОм) до клемника блоку управління. Потрібно використовувати таку процедуру у випадку нескладного робочого завдання і цю процедуру потрібно доповнити реверсом швидкості. Другий можливий приклад керування дозволяє плавно змінювати швидкість, а також напрямок обертання двигуна. Виконується підключенням потенціометра до джерела живлення $\pm 10\text{В}$.

Із вище розглянутих, для цілей поточної роботи прийнятним є другий варіант, де потрібне ручне керування в обох напрямках, наприклад, переміщення пристрою вздовж однієї осі. Додатковий контроль швидкості також може здійснюватись за струмом (4 – 20 мА) або напругою (0 – 10 В або $\pm 10\text{ В}$) як для однополярного, так і для біполярного керування. Якщо потрібним буде відображення або зчитування значення швидкості за допомогою датчика напруги або струму, може використовувати аналоговий вихід (4–20 мА, 0–10 В, $\pm 10\text{ В}$).

На клемній колодці також підключені кнопки запуску, реверсу та зупинки двигуна. Інструкція описує чотири рекомендовані підключення. Перше двопровідне нереверсивне підключення, коли користувач має можливість увімкнути або вимкнути двигун одним перемикачем. Цей варіант не потребує окремого джерела живлення, використовується живлення від інвертора і при комбінуванні з контролем швидкості в обох напрямках також усувається недолік неможливості контролю швидкості двигуна. Другим рекомендованим підключенням є двопровідне реверсивне підключення, відображення управління за допомогою двох перемикачів з живленням від внутрішнього або окремого джерела (115В/+24В). Якщо доповнити цю схему регулюванням швидкості в одному напрямку, можна використовувати привід, керований таким чином, наприклад, для

керування токарним верстатом, коли необхідно контролювати оберти як в прямому, так і в зворотному напрямках.

У разі сигналізації присутні цифрові виходи (реле) перетворювача, за допомогою яких перетворювач сигналізує про несправність і роботу. Кожен з цих сигналів представлено як прямим, так і інвертованим значенням.

Використання енкодера

Відповідно до конфігурації клемної колодки енкодера [12], клеми 8 і 7 використовуються для живлення, а інші клеми для підключення окремих каналів енкодера. Канал А (рис. 2.10) використовується як вхід, якщо наявний енкодер лише з одним каналом. Якщо підключений енкодер має два канали (зміщені на 90°), перший підключається до терміналу каналу А, а інший на термінал каналу В. Перевагою використання двоканального імпульсного енкодера є можливість розпізнавання напрямку обертання та підвищення точності.

Енкодери також можуть мати так званий маркувальний вхід, який вказує опорне нульове положення, цей канал підключається до входу Z. Кожен із перерахованих каналів має два входи, прямий та інвертований. Розташування позначок на триканальному енкодері можна побачити на рис. 2.10.

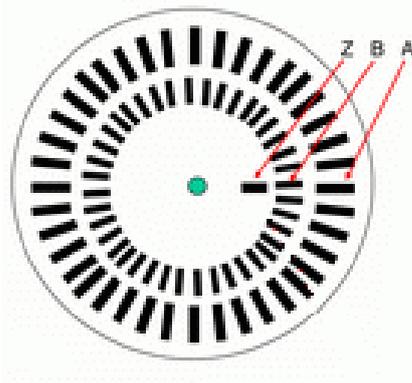


Рисунок 2.10 - Розмітка позначок на енкодері [12]

2.4 Асинхронний електродвигун

Умови експлуатації та особливості вибору асинхронного електродвигуна описано у попередньому розділі. Зараз потрібно підсумувати характеристику електродвигуна, використаного у поточному випадку.

Так, обрано електродвигун MEZ Mohelnice [13], зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.11, а характеристика зведена до табл. 2.7.



Рисунок 2.11 - Зовнішній вигляд електродвигуна MEZ Mohelnice

Таблиця 2.7 - Технічна характеристика електродвигуна MEZ Mohelnice [13]

Параметр	Значення
Кількість фаз	3
Тип ротора	Короткозамкнутий
Номінальна потужність	1,1 кВт
Напруга живлення при з'єднанні зіркою	380 В
Напруга живлення при з'єднанні трикутником	220 В
Кількість обертів на хвилину	930
Номінальний струм при з'єднанні зіркою	3,1 А
Номінальний струм при з'єднанні трикутником	5,4 А
Коефіцієнт потужності ($\cos \phi$)	0,75
Клас ізоляції	В
Максимальна постійна температура двигун	130°C
Захист	IP 44 (захист двигуна від проникнення твердого тіла діаметром 1 мм і бризок води в будь-якому напрямку)

3 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ

3.1 Характеристика експлуатації автоматизованого електроприводу

Основною задачею поточної роботи є реалізація автоматизованого керування асинхронним двигуном за допомогою перетворювача частоти. Однак, можна підключити потенціометр, кнопки або перемикачі до самого перетворювача і таким чином керувати двигуном вручну. Цей варіант можна використовувати в непромислових умовах, наприклад, для токарного верстата тощо.

Для зв'язку з інвертором блоки керування в промисловості використовують різноманітні мережі або просто контур струму. Блоки управління не тільки управляють двигуном з перетворювачем, але зазвичай мають завдання забезпечити роботу всього пристрою без залучення людини. Центром такого ланцюга управління є вже згаданий блок управління, найчастіше і в поточному випадку ПЛК з однією або кількома комунікаційними мережами, які забезпечують зв'язок з різними елементами процесу або мають завдання інформувати користувача про стан, в якому знаходиться процес.

З вищезазначеного випливає, що вся система управління є лише своєрідним мозком всього процесу, для того, щоб ця система діяла на процес, повинні бути присутні елементи живлення, такі як контактори та/або вже згаданий перетворювач частоти. Не в останню чергу до силових і несилових елементів відносяться також їх захист і живлення. Усі згадані елементи зазвичай розташовані в розподільному щиті, де вони захищені від пошкоджень, наприклад від пилу, і водночас користувач також захищений від ураження електричним струмом.

Оскільки немає моделі чи пристрою, на якому можна перевірити керування двигуном, то доведеться працювати з симулятором, який складається зі світлодіодів, підключених до логічних виходів ПЛК, перемикачів і кнопок, підключених до логічних входів, потенціометрів і приладових амперметрів, підключених до аналогових входів і виходів машини.

Узагальнюючи, досліджувана схема технологічного процесу складається з ПЛК серії ControlLogix, симулятора для відображення та налаштування входів і виходів ПЛК, а також перетворювача частоти PowerFlex 700 із підключеним двигуном. Зв'язок між ПЛК, перетворювачем частоти та комп'ютером, з якого програмується ПЛК, здійснюється через мережу EtherNet/IP за допомогою керованого комутатора.

Основним завданням управління обрано керування двигуном у бажаному положенні, але через недостатню роздільну здатність інкрементного датчика, можна спробувати керувати двигуном у бажаному положенні за рахунок відповідної кількості обертів. Таким чином, можна розглянути сценарій, де конвеєр з матеріалом повинен буде досягти обраної позиції. Відповідна технологічна схема показана на рис. 3.1.

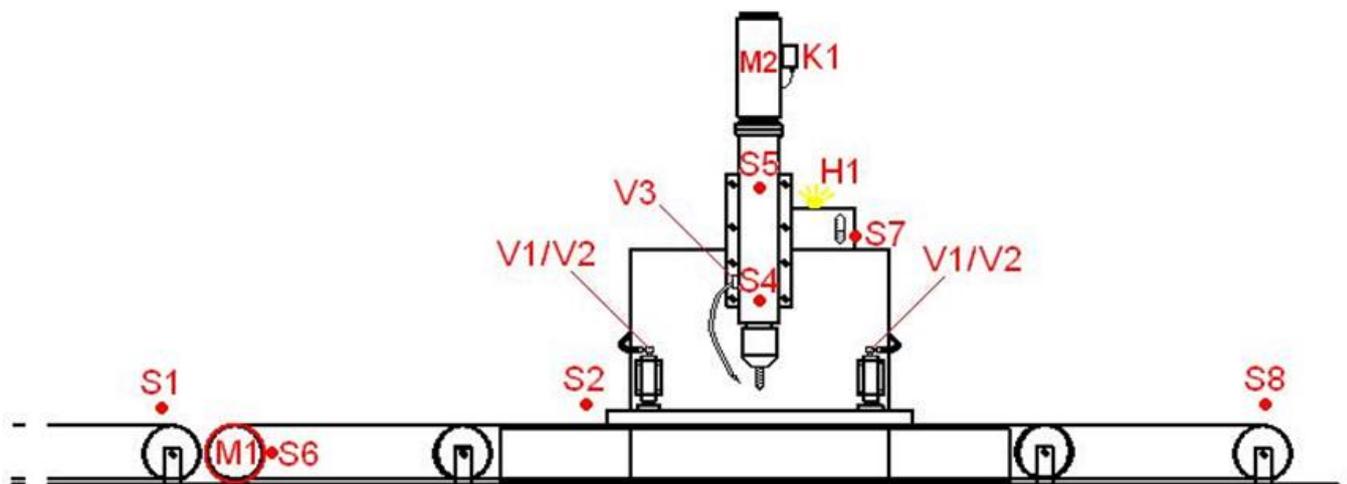


Рисунок 3.1 - Схема технологічної лінії

Опис технологічного процесу

Прийнято, що лінія за рис. 3.1, призначена для свердління отворів в металевих заготовках, що переміщуються конвеєрною стрічкою. Оскільки неможливо просвердлити отвори в заготовках безпосередньо на конвеєрній стрічці, лінія обладнується гідравлікою для фіксації заготовки під час свердління отворів. Ці гідравлічні фіксуючі пристрої управляються клапанами V1 і V2.

Для фіксації заготовки необхідно відкрити клапан V2 і він має залишатися відкритим протягом усього періоду фіксації. Для звільнення заготовки від гідравлічного пристрою закривається клапан V2 і відкривається клапан V1, який залишається відкритим протягом усього часу звільнення заготовки. У випадку, якщо обидва клапани залишаються відкритими протягом тривалого періоду часу, може виникнути пошкодження елементів керування, тому така ситуація не повинна відбуватися.

Свердлильна головка має два ступені свободи. Двигун 2, який обертає свердло, запускається контактором K1, керуюча котушка якого підключена до логічного виходу ПЛК. Другий ступінь свободи забезпечується контактами реле, що керують двигуном 3. Перший контакт T1 запускає реле, яке вмикає або вимикає двигун 3. Другий контакт T2 перемикає реле, що визначає напрямок обертання двигуна 3 і, таким чином, також напрямок переміщення головки по вертикальній осі.

Для позиціонування поворотної головки на вертикальній осі можна використовувати два датчики. Перший датчик S4 сповіщає про нижнє задане положення, в якому свердлильна головка зупиняється і знову починає підніматися, а другий датчик S5 повідомляє про верхнє початкове положення.

У промисловості економиться час, і тому свердління виконується швидше, ніж виконує цю операцію людина. У цих умовах необхідно охолоджувати свердло, щоб воно не перегрівалося, а надмірне охолодження призведе до відпалу, в результаті чого матеріал свердла розм'якшується, і свердло згодом затуплюється. Охолодження здійснюється шляхом впорскування охолоджуючої емульсії в місце свердління. Так, впорскування охолоджуючої емульсії запускається клапаном V3.

У резервуарі для охолоджуючої емульсії є датчик мінімального рівня, у разі індикації мінімального рівня емульсії в резервуарі. Коли свердління всіх отворів у заготовці є завершеним, можна починати наступний цикл для наступної заготовки. Лінія свердління також має інкрементний датчик від приводу конвеєра, який використовується для позиціонування конвеєрних стрічок і датчики, розташовані

на початку і в кінці цієї лінії для її запуску і зупинки. Перелік основних елементів лінії можна побачити у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні елементи за схемою технологічної лінії

Елемент	Опис
V1	Клапан для фіксації заготовки
V2	Клапан звільнення заготовки
V3	Клапан впорскування охолоджуючої емульсії
K1	Контакт для початку обертання головки
T1	Контакт для включення вертикального переміщення
T2	Контакт, що визначає напрямок вертикального руху
S1	Датчик активний під час надходження заготовки
S2	Датчик визначення положення заготовки
S4	Датчик нижнього крайнього положення свердлильної головки
S5	Датчик верхнього крайнього положення свердлильної головки
S6	Інкrementний датчик швидкості двигуна конвеєра
S7	Датчик мінімального рівня емульсії охолоджуючої рідини
S8	Датчик активний, коли заготовка залишає лінію
H1	Контрольна лампа мінімального рівня охолоджуючої емульсії
STOP	Кнопка зупинки лінії
START	Кнопка скидання несправності

Після підключення лінії до джерела живлення та її активації кнопкою START відбувається ініціалізація всієї лінії свердління, тобто всі клапани та контакти встановлюються у вихідні положення. І лінія чекає запуску, що відбувається, коли датчик S1 активується, і в той момент, коли це відбувається, запускається двигун конвеєрної стрічки. Металева заготовка переміщується під свердлильну головку конвеєрною стрічкою. Датчик S2 повідомляє про положення заготовки на 45 кроків перед бажаною позицією.

Тут завдання системи керування - зупинити стрічку разом із балкою точно в потрібному положенні. Коли заготовка займе потрібне положення, можна починати послідовність дій, що ведуть до свердління отвору в заготовці. Послідовність починається із затискання заготовки, що виконується відкриттям клапана V1 і закриттям клапана V2. Затиск заготовки займає 5с. Після закінчення цього часу заготовка є міцно закріпленою і готова до свердління. Як тільки заготовка затиснута, обертання свердла запускається контактором K1, включається

вертикальна подача і встановлюється напрямом вниз, а клапаном V3 починається нагнітання охолоджуючої емульсії. Свердління триває, доки датчик S4 не повідомить про нижнє регульоване кінцеве положення свердлильної головки. У цей момент напрямом вертикального руху свердлильної головки має бути змінений за допомогою контакту T2, відповідний вихід має бути встановлений на логічний нуль. Після того, як свердлильна головка досягне початкового верхнього положення, вертикальна подача відключається контактом T1, обертання свердла припиняється, закривається клапан нагнітання емульсії і починається звільнення заготовки, це робиться відкриттям клапана V2 і закриттям клапана V1. Тепер вирішується, чи просвердлено в балці необхідну кількість отворів, якщо ні, транспортер з балкою пересувається ще на 45 кроків і повторюється послідовність свердління.

У разі здійснення повного циклу свердління всіх необхідних отворів у заготовці конвеєр із заготовкою запускається і зупиняється тільки тоді, коли датчик S8 повідомляє про вихід заготовки з конвеєрної стрічки. Якщо заготовка більше не знаходиться на цій лінії, конвеєр зупиняється, і програма чекає на прибуття наступної заготовки (про це повідомляє датчик S1).

Щоб захистити обслуговуючий персонал і обладнання, необхідно вжити певних заходів безпеки. Конвеєр не повинен транспортувати заготовку під свердлильною головою, якщо вона не знаходиться у верхньому положенні. Конвеєр не повинен рухатися, поки виконується будь-яка частина послідовності свердління заготовки. Послідовність свердління не розпочнеться, якщо датчик мінімального рівня S7 повідомляє про відсутність охолоджуючої емульсії. У цьому випадку буде горіти слабке світло охолоджуюча емульсія H1. Якщо натиснути кнопку STOP, конвеєр зупиняється, свердління також зупиняється, а свердлильна головка переміщується у верхнє положення.

3.2 Складання схеми електричної принципової

На рис. 3.2 наведено схему електричну принципову автоматизованого електроприводу. Серед іншого, дана схема містить: ПЛК ControlLogix, перетворювача частоти PowerFlex 700 з підключеним асинхронним двигуном, ПК для програмування керуючого програмного забезпечення та комутатора Ethernet для підключення окремих компонентів цього ланцюга.

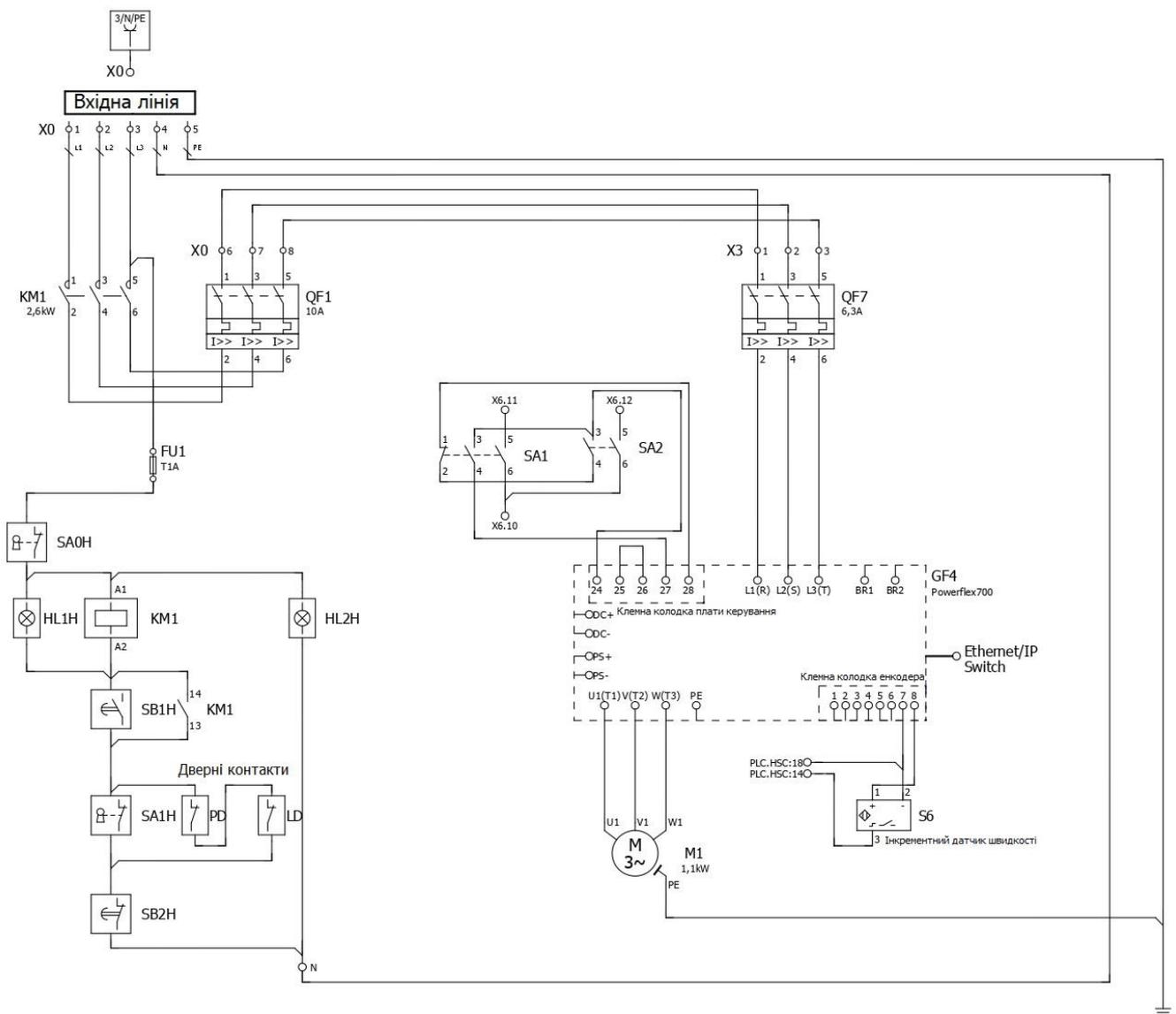


Рисунок 3.2 - Схема електрична принципова електроприводу

Я зазначалося раніше, наведена схема передбачає застосування ПЛК ControlLogix із модулями вводу-виводу, підключеними до симулятора вводу-виводу, а його плату зв'язку EtherNet/IP під'єднано до комутатора Stratix 800 [14]. Цей комутатор є комунікаційним вузлом за допомогою якого забезпечено можливість підключення будь-якого ПК до будь-якого ПЛК серед наявних, для програмування або моніторингу його активності та змінних значень. Так, за допомогою модуля зв'язку 20-COMM-E, який використовується для підключення перетворювача частоти до мережі EtherNet/IP.

Наступним кроком є підключення джерела живлення. Для живлення перетворювача необхідно з'єднати головний ланцюг керування (запобіжник FU1) та ланцюг живлення інвертора (автоматичний вимикач QF7).

Електроживлення ПЛК здійснюється від вбудованого в цю систему джерела. Симулятор містить власне внутрішнє джерело живлення 24 В постійного струму. Клеми цього джерела виведені на ліву сторону симулятора, і тут до них підключено джерело живлення комутатора Ethernet. Комунікаційні елементи мережі EtherNet/IP підключаються до комутатора за допомогою кабелю UTP (Unshielded Twisted Pair) [15], це восьмижильний кабель, що складається з чотирьох витих пар проводів.

4 НАЛАШТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

4.1 Середовище RSLogix 5000

Уся конфігурація або програмування ПЛК або перетворювача частоти виконується в середовищі RSLogix 5000. Зовнішній вигляд і компонування окремих вікон показано на рис. 4.1. Як показано, у верхньому лівому кутку програма інформує про стан ПЛК і тип з'єднання, до якого підключена програма. Перший пункт «Program Mode» вказує на стан з'єднання програми, і користувач

ПЛК може вибрати один із режимів програмування: «Offline», «Online Program Mode», «Online Run Mode», «Online test Mode». В автономному режимі програма і ПЛК працюють незалежно один від одного. У онлайн-режимах програма підключається до ПЛК і контролює його змінні. Якщо потрібно контролювати ПЛК під час роботи програми, слід вибрати опцію «Online Run Mode», інакше програма не буде виконана в ПЛК. Наступні елементи «Controler OK», «Battery Fault» і «I/O OK» інформують користувача про стан ПЛК, батареї та модулів віддаленого вводу/виводу [16].

Ліворуч є вікно з деревом папок, що представляють окремі елементи, необхідні для конфігурації або програмування, пов'язаних із контролером. З цього переліку доцільно вибрати лише найуживаніші. Першим з них є пункт «I/O Configuration», за допомогою якого налаштовується ПЛК і підключаються до нього окремі пристрої. Під другим пунктом «Task/MainTask/MainProgram» знаходиться вкладка «MainRoutime», в якій записана програма користувача на релейній схемі. Елемент «Controller Tags» в папці «Controller Motor» використовується для створення власних змінних, налаштування лічильників, таймерів і іменування вже існуючих змінних або контактів введення/виведення.

Останнє вікно цієї програми, розташоване в решті всього середовища, це найбільше вікно, яке змінюється відповідно до поточного елемента в дереві, згаданому раніше. Якщо вибрати пункт «I/O Configuration» у дереві ліворуч, а потім вибрати плату або пристрій, у цьому вікні з'явиться інформація про вибраний об'єкт та параметри його конфігурації. На рис. 4.1 можна бачити вікно під час вибору пункту з перетворювачем частоти. При виборі пункту «Task/MainTask/MainProgram/MainRoutime» відображається середовище вставки блоків, з яких створюється програма користувача. Для елемента «Controler Tags» в папці «Controller Motor» відображається таблиця зі списком усіх змінних, створених користувачем або під час конфігурації пристрою. Тут користувач може назвати окремі елементи або додати власні змінні.

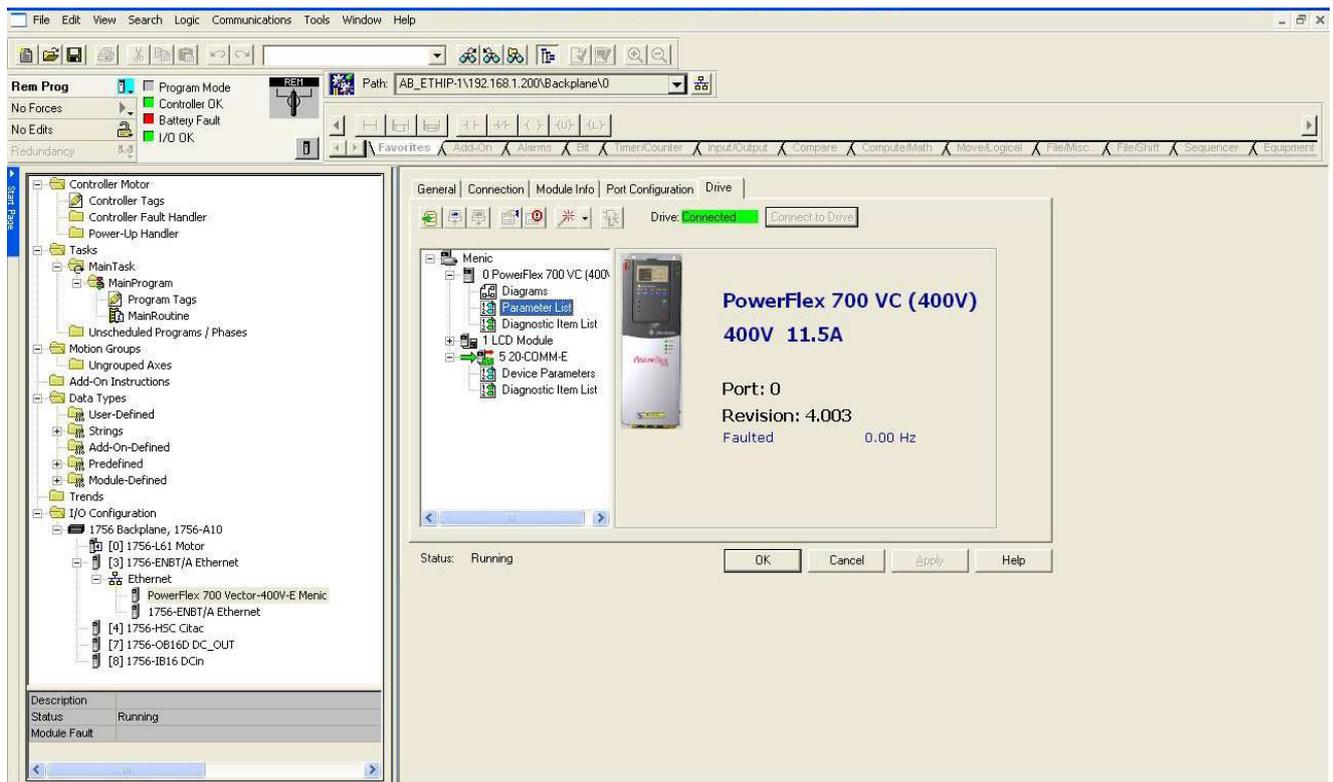


Рисунок 4.1 - Середовище RSLogix 5000

4.2 Налаштування автоматики

Ознайомлення з середовищем RSLogix 5000 супроводжується налаштуванням автоматики перетворювача частоти. Перед початком налаштування необхідно підключитися до потрібної комунікаційної карти. Так, потрібно дізнатися IP-адресу обраної комунікаційної карти. Адреса комунікаційної карти відображається на її дисплеї. Підключення здійснюється шляхом вибору пункту «Who Active» в меню «Communications», з'явиться вікно, в якому вибирається мережа, у даному випадку Ethernet/IP. IP-адреса має відповідати обраній карті, після чого слід підтвердити вибір.

Налаштування, як зазначалося раніше, виконується у вікні, яке відкривається після вибору елемента «I/O Configuration». Далі потрібно налаштувати процесор, а потім можна налаштувати необхідні карти та пристрої для нього. При налаштуванні потрібно знати точний тип налаштованого пристрою. Ці дані можна знайти на етикетці кожної карти, або їх можна знайти за допомогою програми RSLinx.

Отже, спочатку слід налаштувати процесор, клікнувши правою кнопкою миші на елементі з позначкою «1756 Backplane» (у папці «I/O Configuration»), з'явиться меню, у якому вибирається «New Module» і заповнюються необхідні дані у відображеному вікні, головним чином точний тип і версія. Інші модулі налаштовуються подібним чином. У даному випадку використовуються тільки логічні входи та виходи, плату з швидким лічильником і частотний перетворювач. Інші модулі налаштовувати не потрібно.

4.3 Налаштування перетворювача частоти

Щоб налаштувати зв'язок між перетворювачем частоти та ПЛК, необхідно встановити плату Ethernet у перетворювач. Якщо з'єднання було встановлено, конфігурацію можна виконати безпосередньо з середовища RSLogix 5000. Якщо з'єднання не відбулося, плату необхідно налаштувати безпосередньо на перетворювачі частоти за допомогою дисплея та клавіатури. Серед найбільш важливих параметрів є номер порту DPI (порт, до якого підключена карта), швидкість зв'язку, IP-адреса, маска мережі та шлюз за замовчуванням. Після встановлення названих параметрів можна переходити до налаштування самого перетворювача. Звичайно, параметри перетворювача частоти також можна задавати безпосередньо на ньому. Також перетворювач можна налаштувати за допомогою середовища RSLogix 5000. Як показано на рис. 4.1, щоб налаштувати ПЧ, потрібно спочатку відкрити його меню конфігурації («I/O Configuration / 1756-ENBT A / Ethernet / PowerFlex 700 Vector-400V-E»), у відображеному вікні можна побачити окремі частини перетворювача: модуль конвертера, LCD-модуль, комунікаційна карта, де і налаштовуються зазначені пристрої. Вибирається пункт «PowerFlex 700 Vector-400V-E/Parameter List», відкривається вікно з таблицею, в якій знаходяться окремі параметри ПЧ. Тут можна змінити лише параметри, призначені для запису, а параметри, призначені лише для читання, змінити не можна. Перш за все, це параметри, що повідомляють про стан інвертора, такі як вихідна частота, струм або напруга, напруга в проміжному ланцюзі і тому подібне.

Нижче наведені параметри, введені користувачем підключеного двигуна (тип двигуна, номінальна потужність, струм, напруга та частота тощо).

Зазвичай, ці параметри встановлюють відповідно до даних на таблиці електродвигуна. Інші параметри даватимуть іншу поведінку перетворювача.

4.4 Підключення індуктивного інкрементного датчика

Для визначення фактичного значення швидкості та зворотного зв'язку від двигуна досліджувана програма використовує дані індуктивного інкрементного датчика. Датчик подає живлення від клемної колодки для підключення енкодера на перетворювач частоти (рис. 4.2). Спочатку слід підключити енкодер, як зворотний зв'язок для перетворювача частоти, встановити параметр «#413 Encoder PRR» (кількість приростів на оберт) на значення 3; параметр «#80 Feedback Select to Encoder» і параметр «#412 Motor Fdbk Type» на «Single Chan». Тепер, після введення та налаштування зворотного зв'язку в інверторі, слід запустити ідентифікаційні прогони, щоб інвертор міг уточнити математичну модель двигуна для подальшої роботи. При спробі контролювати швидкість за допомогою зворотного зв'язку двигун може обертатися не плавно, а ривками на нижчих швидкостях. Ривки в двигуні виникають через недостатню кількість приростів на оберт ротора.

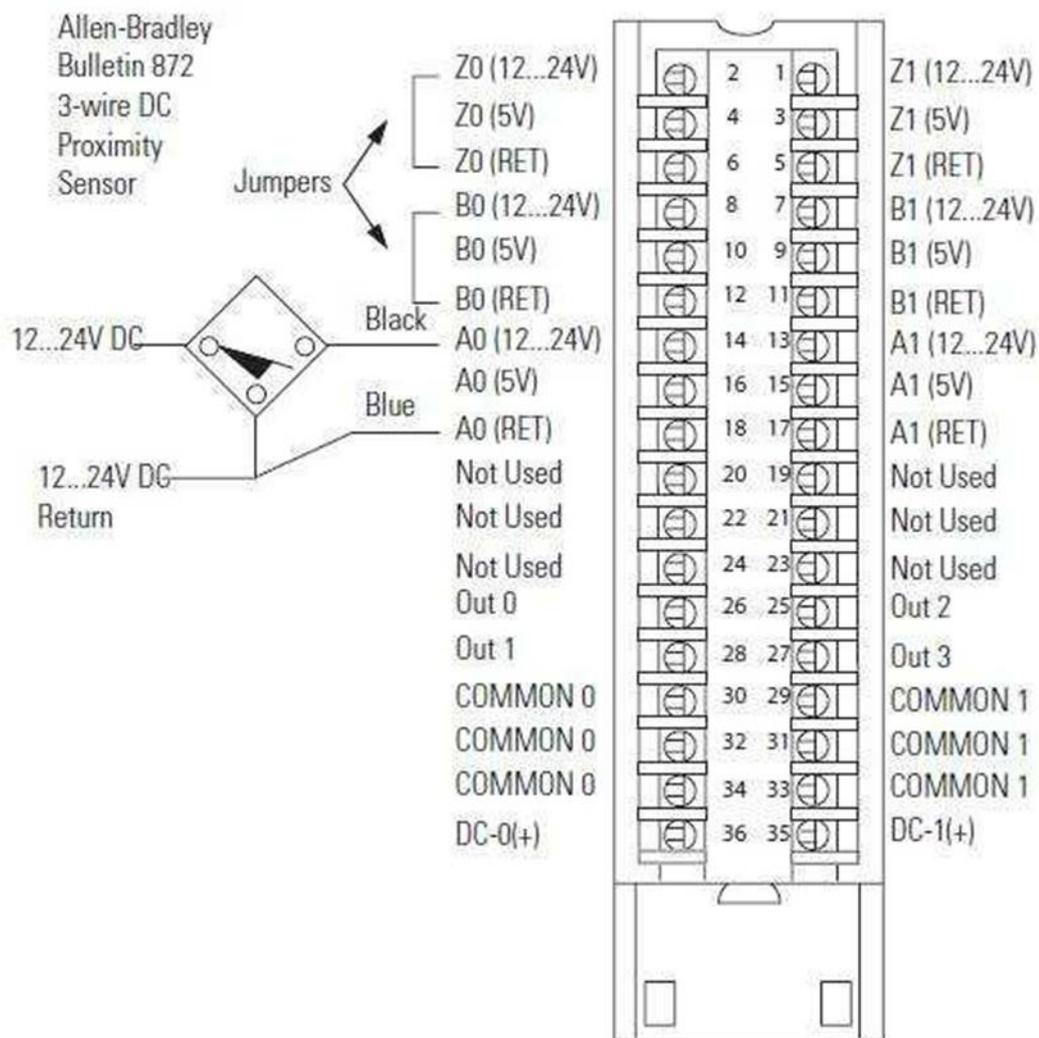


Рисунок 4.2 - Схема підключення інкрементного датчика швидкості [17]

Для цілей позиціонування, в ПЛК вводиться зворотній зв'язок, точніше в модуль високошвидкісного лічильника (див. рис. 4.2), і лічильник налаштовується на підрахунок імпульсів.

Може виникнути ситуація, коли сигнал від датчика матиме збурення через перешкоди від двигуна та пульсації напруги живлення перетворювача. Так, лічильник може не розпізнати імпульси від збурення, і тому необхідно вирішувати цю проблему. Один з варіантів, що частково зменшує перешкоди сигналу від датчика, полягає у використанні лабораторного джерела для живлення цього датчика. Другим варіантом є додавання феритових сердечників на початку і в кінці сигнальної лінії. Інша використовувана опція, яка пропонується безпосередньо платою лічильника, полягає в увімкненні цифрового фільтра на вході лічильника.

Щоб визначити коефіцієнт перетворення між значенням вихідної частоти та опорним значенням у ПЛК, слід використовувати осцилограф, підключений до виходу датчика. Можна починати зі значення вихідної частоти, показаного в структурі зворотного зв'язку інвертора, коли опорне значення встановлено на 50 Гц. Виявлене число слід вважати еталонним значенням, що має відповідати значенню вихідної частоти 50 Гц, і звідси обчислюються значення, наприклад, для 10, 20, 30 і 40 Гц. Так поступово встановлюються індивідуальні значення еталону і зчитується на осцилографі тривалість п'яти періодів вихідного сигналу. Поділивши це значення на п'ять, отримується один період вихідного сигналу, з якого обчислюється зворотно значення і отримується вихідна частота сигналу з датчика. Завдяки правильно обраному числу з трьох кроків за оберт, припускаючи компенсацію ковзання, вихідна частота сигналу датчика має дорівнювати необхідній опорній частоті.

Отже, тепер може бути відомим співвідношення необхідної частоти на вході двигуна та опорного значення в ПЛК. Так як перетворювач працює в режимі регулятора швидкості, доцільно контролювати точність цього регулювання. Значення доцільно вимірювати за допомогою осцилографа, вхід якого підключається до виходу інкрементного датчика швидкості. Для більшої точності можна зчитувати значення п'яти періодів і розраховувати середнє між ними.

5 АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

5.1 Алгоритм роботи програми автоматизації

Розроблювана програма керування технологічною лінією є одним із можливих рішень задач автоматизації, її обсяг і можливості дещо скорочені, як для реального управління процесом у промисловості. Процес свердління отворів у заготовках можна описати послідовно. Завдяки простоті програми та частій роботі

з бітовими змінними мова програмування LD (Ladder Diagram) [18] здається підходящим вибором завдяки своїй ясності, простоті та інтуїтивно зрозумілому програмуванню.

Отже, як тільки живлення включається, програма виконує ініціалізацію. Ініціалізація забезпечує перехід програми на перший крок, обнулення лічильника імпульсів навантаження від інкрементного датчика швидкості двигуна, налаштування всіх рухомих частин лінії на вихідні позиції, правильне налаштування всіх виконавчих механізмів і, що не менш важливо, ініціалізація перетворювача та можлива зупинка двигуна. Для початкового стану лінії клапан гідротримачів V1 (див. рис. 3.1) має бути закритий, а клапан V2 відкритий, обертання шпінделя має бути зупинено (контакт K1 у журналі 0). Клапан V3 для впорскування емульсії має бути закритий, а вертикальний рух свердлильної головки повинен бути припинений. Якщо датчик S7 не повідомляє про відсутність охолоджуючої емульсії, лінія може бути запущена проходом заготовки на початок конвеєрної стрічки (датчик S1). Коли заготовка надходить і лінія активується, двигун конвеєрної стрічки запускається і переміщує заготовку до свердлильної головки. Цей стан триває до тих пір, поки датчик S2 не повідомить про положення заготовки, яка знаходиться на відстані 45 кроків датчика S6 (інкрементний датчик швидкості двигуна) від потрібного положення заготовки для свердління першого отвору. Змінні регулятора діапазону двигуна встановлюються («SET = 45», «АКТ = 0»).

Регулювання підходу до позиції здійснюється тільки компонентом P. Тому це лише пропорційний регулятор із встановленим насиченням. Верхня межа дії обмежена максимальною швидкістю обертання двигуна, при якій лічильник все ще здатний розпізнавати відповідні імпульси. Нижня межа швидкості визначається відповідно до мінімальної швидкості, з якою перетворювач ще здатний обертати двигун. Коефіцієнт посилення регулятора вибирається таким чином, щоб двигун обертася настільки повільно між передостаннім і останнім кроком, щоб його можна було зупинити з необхідною точністю.

Контролер реалізується в системі управління наступним чином. Вводяться змінні АКТ (поточна кількість кроків), SET (необхідна кількість кроків) і REG_E (відхилення від регулювання). У кожному варіанті програми потрібно оновлювати змінну АКТ, а потім обчислювати нормоване відхилення REG_E. Це відхилення множать на відповідний коефіцієнт посилення регулятора та приймають отримане значення як бажану швидкість на цьому кроці. У момент, коли змінні АКТ і SET рівні, двигун знаходиться в потрібному положенні, і оскільки швидкість його обертання дорівнює мінімальному значенню, з яким двигун все ще обертається, не є проблемою його негайна зупинка і перехід до наступного кроку.

Наступним є етап, де потрібно зафіксувати заготовку, щоб вона не рухалася під час свердління. Фіксація заготовки здійснюється шляхом відкриття клапана V1 і закриття клапана V2. Закріплення заготовки займає 5с. Після закінчення цього часу, заготовка вже має бути зафіксованою і готовою до свердління.

Для свердління необхідно виконати наступну процедуру: обертати свердлильну головку, замикаючи контакт K1, встановлюючи контакти T1 (для включення вертикального переміщення) і T2 (для рух вниз) на логічну одиницю, відкриваючи клапан V3, щоб почати впорскування охолоджуючої емульсії. Тепер свердління виконується, доки датчик S4 не повідомить про досягнення нижнього заданого значення. Коли свердлильна головка знаходиться в нижньому положенні, напрямок вертикальної подачі змінюється, і свердлильна головка починає підніматися вгору. Вона продовжує підніматися, поки не досягне верхнього початкового положення. За замовчуванням припинення вертикальної подачі свердлильної головки (T1=0), обертання шпинделя (K1=0) і впорскування охолоджуючої емульсії (V3=0).

Після виконання першого отвору заготовка вивільняється, що здійснюється шляхом відкриття клапана V2 і закриття клапана V1. Ця операція знову займає 5 секунд. Після закінчення цього часу значення лічильника, який підраховує кількість просвердлених отворів, збільшується, а потім на основі цього значення програма вирішує, чи продовжувати свердління додаткових отворів, чи переміщувати заготовку на наступну виробничу лінію. У разі свердління іншого

отвору програма повертається до кроку номер 3, та переміщує заготовку ще на 45 кроків датчика S6 і знову починає послідовність свердління. Якщо останній отвір уже виконано, програма переходить до наступного стану, коли двигун запускається, а конвеєр переміщує заготовку на наступну виробничу лінію та зупиняється після повідомлення від датчика S8, який повідомляє про те, що заготовку було переміщено.

Якщо натиснути кнопку зупинки, лінія повертається у вихідний стан, тобто зупиняє конвеєр, обертання шпинделя ($K1=0$), впорскування охолоджуючої емульсії ($V3=0$), підіймає шпиндель у верхнє положення ($T1=1$, $T2=0$) і зупиняє вертикальне переміщення ($T1=0$). Після цього загоряється індикатор несправності. Якщо програма перебуває в цьому стані, не можна виконувати жодних операцій. Повторний запуск можливий тільки в тому випадку, якщо оператор усуне несправність і видалить її, натиснувши кнопку запуску.

У разі низького рівня охолоджуючої емульсії програма сигналізує про це (світловий індикатор охолоджуючої емульсії) і дозволяє завершити обробку наявної заготовки, але це вимкне запуск лінії для наступних заготовок, поки емульсія не поповниться.

Алгоритм описаної програми наведено на рис. 5.1.

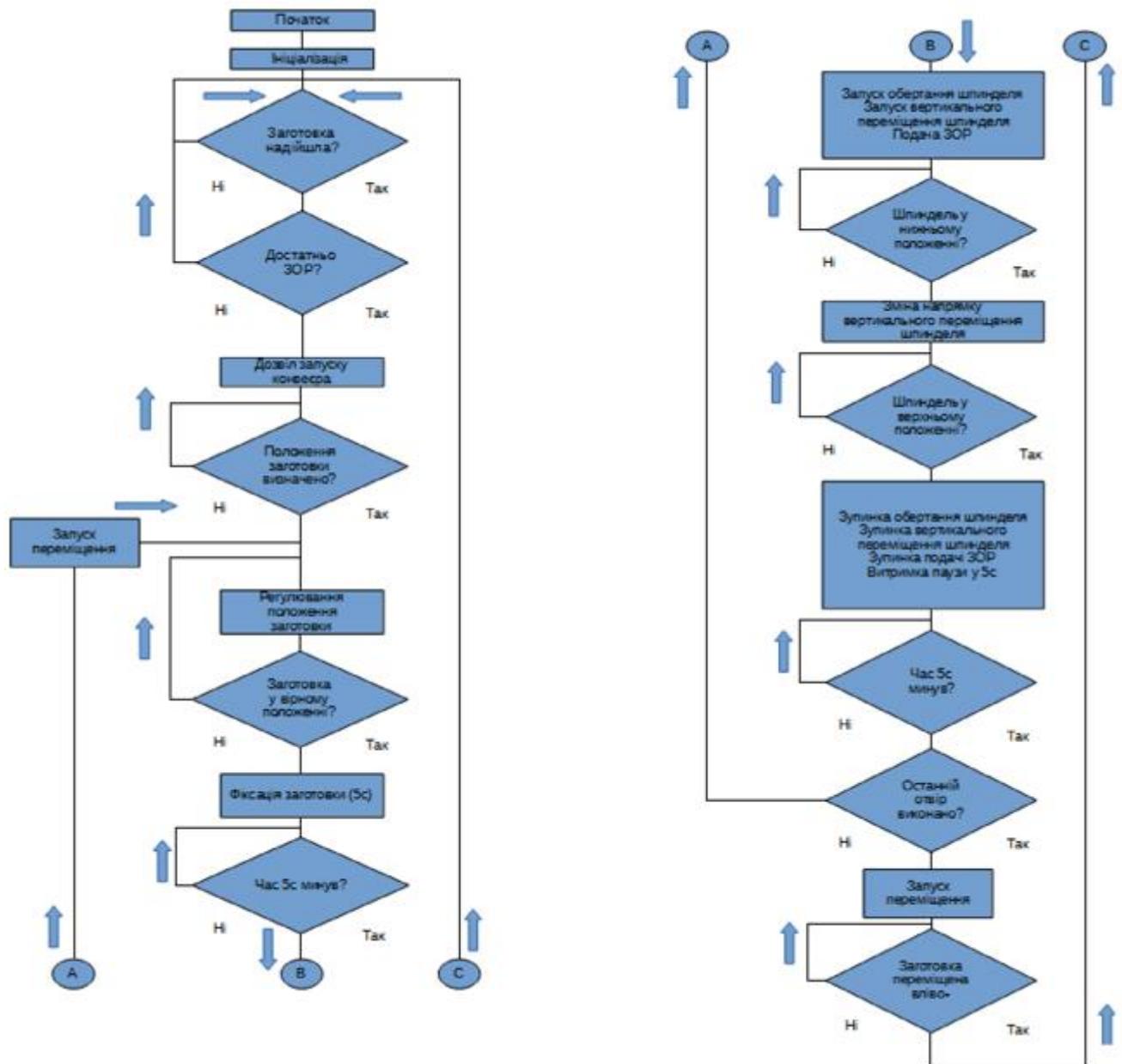


Рисунок 5.1 - Алгоритм програми автоматизованого керування електроприводом

5.2 Візуалізація процесу автоматизації

Візуалізація використовується в промисловості, щоб зібрати важливу інформацію про технологічний процес і чітко представити її в одному місці. Таким чином, оператор має всі необхідні дані зібрані разом. В даний час візуалізація використовується не тільки в інформаційних цілях, але і для взаємодії оператора з процесом, наприклад, введення параметрів за допомогою клавіатури або сенсорного екрану.

Для створення візуалізації компанія Allen Bradley пропонує інструмент під назвою FactoryTalk View Studio [19]. Використовуючи цей інструмент, можна створювати широкі візуалізації з багатьма параметрами, від простої індикації станів процесу до внесення власних зображень у складні анімовані об'єкти, які змінюють своє положення, колір та інші властивості. Програма використовує таке ж розташування вікон, як у RSLinx 5000 [20].

Візуалізація (рис. 5.2) слугує лише для інформування оператора про стан, в якому знаходиться процес, можливість введення будь-яких параметрів в процес відсутня. Основою цієї візуалізації є вбудоване зображення виробничої лінії, по конвеєрній стрічці якої рухається заготовка, залежно від того, де вона розташована та нерухома вона чи перебуває у русі. Якщо конвеєрна стрічка рухається, її рух також можна побачити на відповідних обертових колесах. Крім того, тут розташовані найважливіші датчики S1, S2 і S8. Якщо будь-який датчик є активним, він буде відображатись у візуалізації червоним кольором, інакше він залишиться сірим.

Для відображення вертикального переміщення на нерухомій частині свердлильної установки відображаються миготливі стрілки з напрямком, у якому здійснюється переміщення. Обертання шпинделя позначається миготливою стрілкою над його верхньою частиною. Фіксація або звільнення заготовок позначається миготінням гідроциліндрів. Поки заготовка закріплена, гідравлічний пристрій є червоним, в іншому випадку він залишається сірим. Впорскування охолоджуючої емульсії супроводжується спалахом пробліскового пристрою синім кольором. Під час виконання процесу в лівому верхньому куті горить зелена контрольна лампа з написом «STARTED», при несправності тут горить червона контрольна лампа з написом «FAULT». Якщо пристрій не запущено, підсвічений напис відсутній. У нижньому лівому куті, відповідно до процесу, з'являються різні повідомлення, що стосуються стану фіксації заготовки, вертикального переміщення, обертання шпинделя та впорскування охолоджуючої емульсії. У верхній правій частині можна побачити індикатор поточної швидкості, з якою

обертається двигун, і, у випадку регулювання положення (рис. 5.1), також кількість завантажених технологічних кроків.

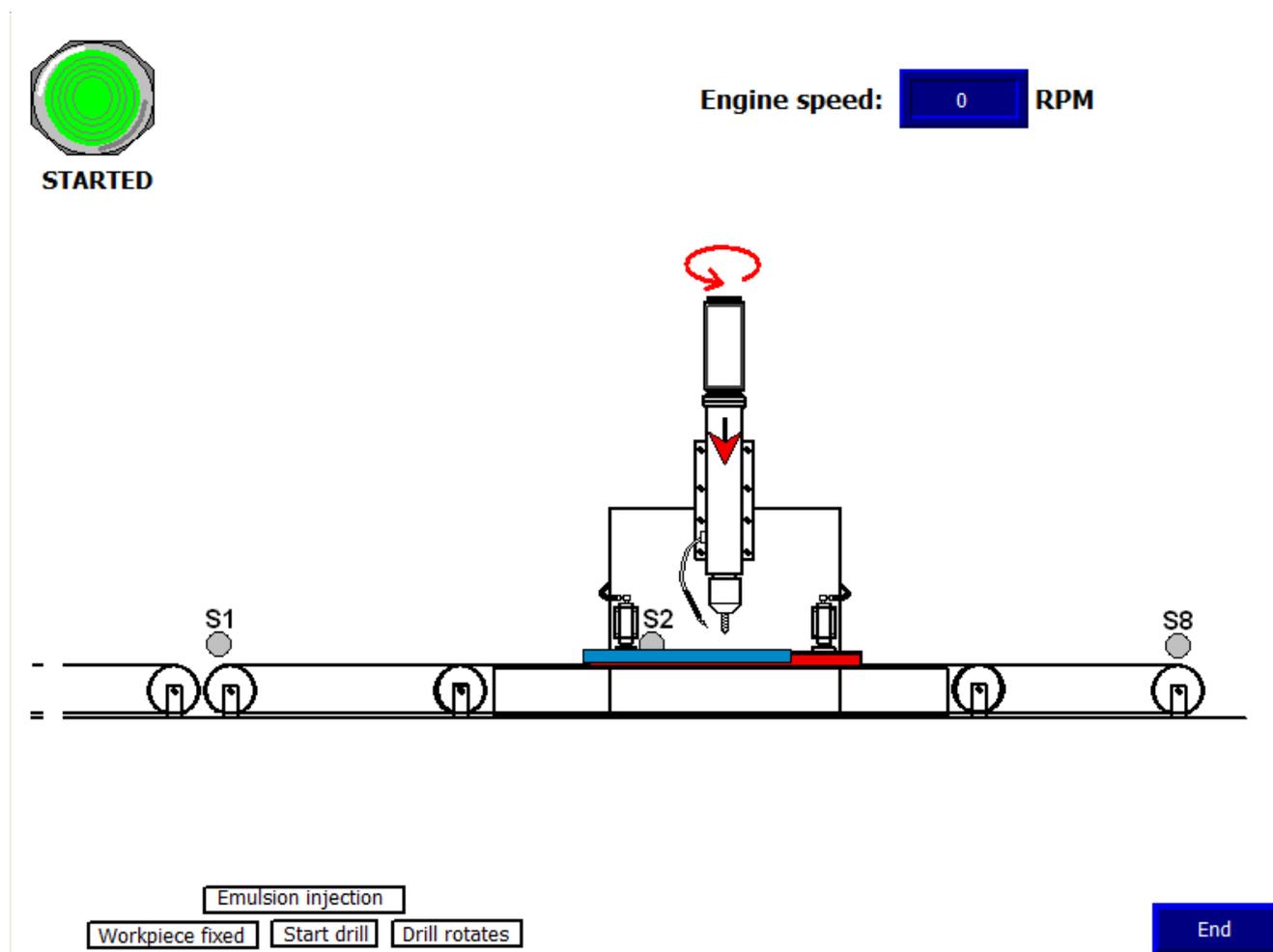


Рисунок 5.2 - Візуалізація технологічного процесу обробки заготовок

Крім клавіатури з кнопками, дисплеї PanelView також мають сенсорний екран, тому в майбутньому візуалізація може бути розширена за рахунок введення параметрів у процес. Це призведе до більшої гнучкості виробничої лінії, наприклад, можливості вибору кількості отворів у заготовці або відстані окремих отворів один від одного.

ВИСНОВКИ

У першій частині даної роботи наведено опис основних принципів експлуатації асинхронного двигуна, його поведінку в різних режимах роботи.

Далі розглянуто питання регулювання швидкості асинхронного двигуна. Тут наведено методи керування за допомогою перетворювачів частоти; описано типи перетворювачів частоти з їх властивостями та методами застосування. Крім того, увагу у роботі присвячено способам управління АД, зокрема скалярному, векторному управлінню та управлінню за крутним моментом.

Наступним етапом виконання роботи є опис обладнання, яке використовується для керування імітованою виробничою лінією для свердління отворів у металевих заготовках. У подібних механізмах доцільним є застосування автоматизованих електроприводів з поєднанням АД та ПЧ. Так, наведено характеристику контролера ControlLogix. Описано основну частину параметрів даного контролера, який передбачено для використання у якості керуючого елемента автоматизованої системи.

Визначено, що для комунікації елементів автоматизованої системи доцільним варіантом є промислова мережа EtherNet/IP. Так, наведено передумови створення стандарту Ethernet, а потім описано його протокол, сумісність з іншими мережами та рішення для роботи у режимі реального часу.

У якості перетворювача потужності для керування асинхронним двигуном обрано ПЧ Powerflex 700. Тож, наведено в яких варіантах випускається перетворювач, описано його можливості керування, параметри підключення клемної колодки керування та особливості підключення енкодера. Остання частина розділу підсумовує параметри використовуваного асинхронного електродвигуна.

У четвертому розділі роботи наведено особливості налаштування автоматизованої системи керування асинхронним електроприводом у складі технологічної лінії. Так, розглянуто питання візуалізації технологічного процесу; наведено опис робочого циклу керуючої програми та процедур, за допомогою яких реалізується імітаційне середовище.

Визначено, що візуалізація всього робочого процесу є ефективною частиною розробки автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вона забезпечує відображення найважливішої інформації щодо перебігу поточного процесу.

Алгоритм роботи автоматизованої лінії механічної обробки заготовок розроблено з урахуванням можливості його використання для навчальних потреб, та є одним із можливих варіантів розробки автоматизованих систем керування електроприводами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. Львів : Ви-во Львів. політех., 2001. 596 с.
2. Метельський В. П. Електричні машини та мікро машини. Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. 600 с.
3. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. Машини змінного струму: навч. посіб. О.: Наука і техніка, 2005. 270 с.
4. Wang, Zhentao & Gao, Mingyu & Zhuang, Shengen & Huang, Jiye. (2015). Design of Asynchronous Motor Vector Control Frequency Converter Based on DSP. 388-392. 10.1109/ICICTA.2015.104.
5. Wang, Kefeng & Wen, Fuyue & Sun, Baokui & Zhou, Jianbo & Han, Lei & Wang, Jiangyong. (2023). Gate modulation drive and modeling of IGBT in MMC converters. Journal of Physics: Conference Series. 2474. 012031. 10.1088/1742-6596/2474/1/012031.
6. Zhang, Jian & Bao, Fu & Dang, Hong. (2012). ControlNet Control System Network Design and Optimization. Advanced Materials Research. 586. 399-403. 10.4028/www.scientific.net/AMR.586.399.
7. Kasemir, Kay & Dalesio, Leo. (2001). Interfacing the ControlLogix PLC over Ethernet/IP.
8. Yang, Zheng & Bao, Zhiting & Jin, Chenglu & Liu, Zhe & Zhou, Jianying. (2022). PLCrypto: A Symmetric Cryptographic Library for Programmable Logic Controllers.
9. Fiorini, D. & Salati, Claudio. (2023). standard ethernet in real-time industrial applications. 74.
10. Fibich, Christian & Schmitt, Patrick & Höller, Roland & Rössler, Peter. (2023). Open-Source Ethernet MAC IP Cores for FPGAs: Overview and Evaluation. International Journal of Reconfigurable Computing. 2023. 1-36. 10.1155/2023/9222318.
11. Lakshmi, K & Kumaresan, K. & Sridhar, C & Shylesh, K. (2020). Speed control of three phase induction motors using PowerFlex 525 compact AC drive. IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 764. 012038. 10.1088/1757-899X/764/1/012038.

12. Koch, Matthias & Hesse, Tilman & Kenkmann, Tanja & Bürger, Veit & Haller, Markus & Heinemann, Christoph & Vogel, Moritz & Bauknecht, Dierk & Flachsbarth, Franziska & Winger, Christian & Wimmer, Damian & Rausch, Lothar & Hermann, Hauke & Stieß, Immanuel & Birzler-Harder, Barbara & Kunkis, Michael & Tambke, Jens. (2017). Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration. 10.13140/RG.2.2.22708.35207.

13. Schnoor, Birger. (2022). Die Messung der Schreibfähigkeit in MEZ: Messinvarianz verschiedener Schreibimpulse der „MEZ-Schreibaufgabe Jugendliche“. 10.1007/978-3-658-35650-7_3.

14. Lewis, David & Chiu, Gordon & Chromczak, Jeffrey & Galloway, David & Gamsa, Ben & Manohararajah, Valavan & Milton, Ian & Vanderhoek, Tim & Dyken, John. (2016). The Stratix™ 10 Highly Pipelined FPGA Architecture. 159-168. 10.1145/2847263.2847267.

15. Igarashi, Shun & Miyawaki, Daisuke & Yamagishi, Suguru & Kuwayama, Ichiro & Iokibe, Kengo & Toyota, Yoshitaka. (2022). Unintentional radiated emissions from unshielded twisted pair cable attributed to twist structure. IEICE Communications Express. 11. 10.1587/comex.2022XBL0101.

16. Rais, Muhammad Haris & Asmar, Rima & Lopez, Juan & Ahmed, Irfan. (2022). Memory forensic analysis of a programmable logic controller in industrial control systems. Forensic Science International: Digital Investigation. 40. 301339. 10.1016/j.fsidi.2022.301339.

17. Bretney, Kevin & Ducker, Michael & Mathai, John & Towers, Kathleen & Walker, Ashley. (2023). Quality Control and Safety Sensors for Factory Automation (Rockwell Automation).

18. Antonsen, Tom. (2021). Ladder Diagram good or bad. 10.13140/RG.2.2.26984.80649.

19. Vogel-Heuser, Birgit & Wilch, Jan & Dörfler, Adrian & Fischer, Juliane. (2022). Coping with Variability in HMI Software in the Design of Machine Manufacturers' Control Software. 10.1007/978-3-031-06509-5_29.

20. Alam, Zafar & Iqbal, Faiz & Jha, Sunil. (2015). Automated control of three axis CNC ball end magneto-rheological finishing machine using PLC. International Journal of Automation and Control. 9. 201-210. 10.1504/IJAAC.2015.070956.

ДОДАТКИ

1 GENERAL INFORMATION ABOUT THREE-PHASE ASYNCHRONOUS MOTORS

The induction motor is undoubtedly the most used motor at present, it has won its place due to its reliability, ease of maintenance and cost. It has found its application as a drive for fans, pumps, compressors, etc. It used to be very difficult to regulate the speed of this motor, but this problem was solved with the advent of power electronics, especially frequency converters. The ability to adjust the speed has eliminated the biggest and at the same time essentially the only disadvantage of this motor and has led to the use of this motor in systems that require precise control of speed or range and has expanded the limits of application of this type of motor. Currently, the engine is used in the vast majority of mechanisms. It is produced in the power range from a few watts to 20 MW [1].

Asynchronous machines belong to a large group of electrical machines that convert electrical energy into mechanical energy and vice versa. Electric machines are divided into engines that convert electrical energy into mechanical energy and generators that convert mechanical energy into electrical energy. However, asynchronous machines are used exclusively as motors with linear or rotary motion. The biggest advantage of an induction machine is its simplicity, lack of maintenance and low price.

1.1 Construction of an asynchronous electric motor

Like other electric machines, an induction motor consists of a stationary part (stator) and a moving part (rotor). The stator consists of a cast iron, welded or aluminum structure and two bearing shields. Sheets are pressed into the stator housing, which are isolated from each other and form the magnetic part of the machine circuit. The rotor plates are pressed onto the rotating shaft. The movement of the rotor is possible due to the air gap between the rotor and the stator, which is determined by the bearings in the already mentioned bearing shields. The scheme of an asynchronous machine is shown in fig. 1.1.

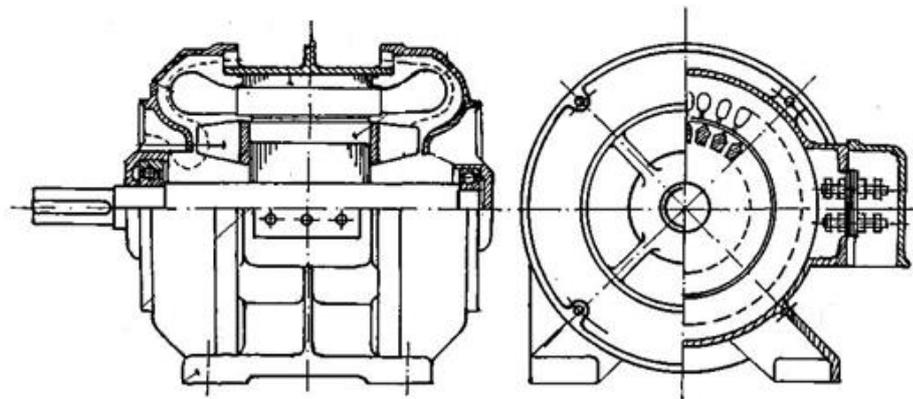


Figure 1.1 - Location of the main parts of an induction motor [2]

The stator winding stored in the slots is usually three-phase, but it can be single-phase or two-phase, the beginnings and ends of which are connected to the stator terminal. The rotor winding, which is also placed in the rotor grooves, is called an armature. For engines of higher power, copper or brass non-insulated wires connected by rings are provided in the grooves. In smaller motors, the windings are cast together with the aluminum fan blades, and this winding is called a "cage" winding. In motors with a phase rotor and rings, the three-phase winding of insulated conductors is stored in slots. The beginning of the phases is connected to a node, the ends of which are connected to three contact rings adjacent to the brushes. In this way, speed control and starting devices are connected to the engine [2].

1.2 Principle of operation of an asynchronous electric motor

The principle consists in the interaction of the rotating electromagnetic field of the stator and the rotor. Individual stator coils are spatially offset by 120° and are powered by a symmetrical three-phase network. The flow of currents in this network is shown in fig. 1.2, create a magnetic field that crosses the conductors of the rotor, in which voltage is induced. This voltage arises only in the assumption of relative motion of the stator magnetic field to the motion of the rotor. That is, different revolutions of the magnetic field of the stator versus the revolutions of the rotor. This speed difference is called

sliding. Slip varies depending on the load on the machine, that is, on the magnitude of the moment acting on the rotor. The nominal slip is from 1% of large engines to 10% of small ones. The speed of the stator depends on the frequency of the supply voltage and the number of poles of the machine.

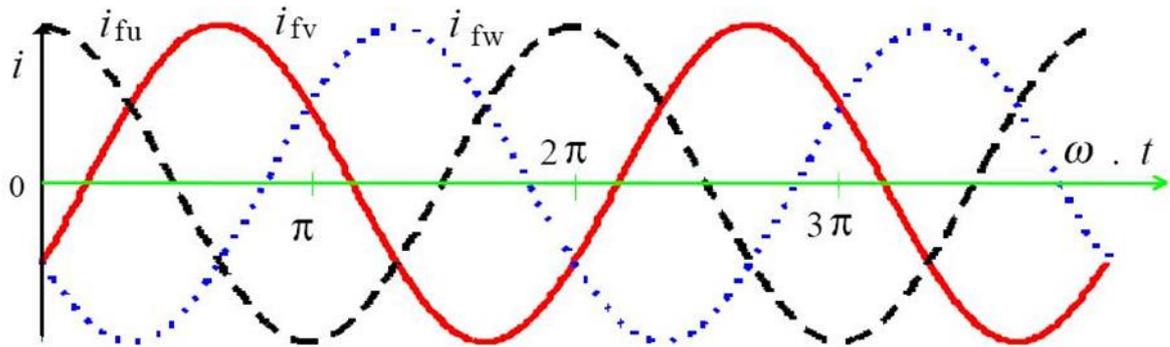


Figure 1.2 - Current flow in a three-phase network [3]

Due to the passage of current in individual windings inside the stator, a magnetic field is created, formed by the vector sum of the magnetic fields created by individual coils. A rotating magnetic field is formed due to the time courses of the current of individual phases and the spatial distribution of the windings in the stator. The rotor, as a rule, has a clip (Fig. 1.3), the rods are placed in the grooves of the rotor, and the rings are connected at both ends (made most often as aluminum castings).

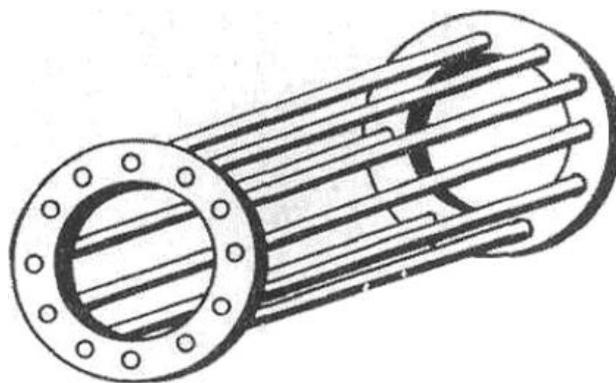


Figure 1.3 - Design of the AD rotor [3]

As mentioned earlier, the asynchronous machine is operated mainly in motor mode. Other modes, i.e. brake and generator, will be described below.

In fig. 1.4 shows the torque characteristic of an asynchronous machine, conventionally divided into 3 areas (according to Fig. 1.4, from left to right). The first area reflects counter braking. This is a motor condition where torque applied to the motor shaft causes the motor to slow down, stop, and rotate in the opposite direction. In this case, the moment is positive. The torque of the motor decreases with increasing negative revolutions, and the current consumed from the network increases. Under these conditions, the motor acts as a brake, which is very useful for some applications, but at the same time, due to the excessive current flowing, it is thermally overloaded, so it cannot operate in this condition for a long time.

The second part of the characteristic expresses the natural operation of the engine. The motor torque exceeds the slave load torque, the motor starts with a dynamic torque equal to the difference between the motor torque and the slave load torque, until these torques equalize and the motor speed stabilizes. The torque of the motor at zero speed is called the starting torque, and it is the moment at which the motor starts to start after connecting to the mains. As the revolutions increase, the engine torque increases until the turning moment is reached, this moment is maximum and marks the beginning of the working part of the characteristic. From this point, the motor torque will begin to decrease with increasing speed until the rotor reaches synchronous speed. At this point, the torque of the motor is zero, which is a result of its principle of rotation and the law of induction. The current through the motor decreases with increasing speed, when the rotor rotates at synchronous speed, the current consists only of losses.

The third part of the characteristic corresponds to the condition when the motor is forced to rotate at a speed exceeding the synchronous speed and corresponds to the generator mode.

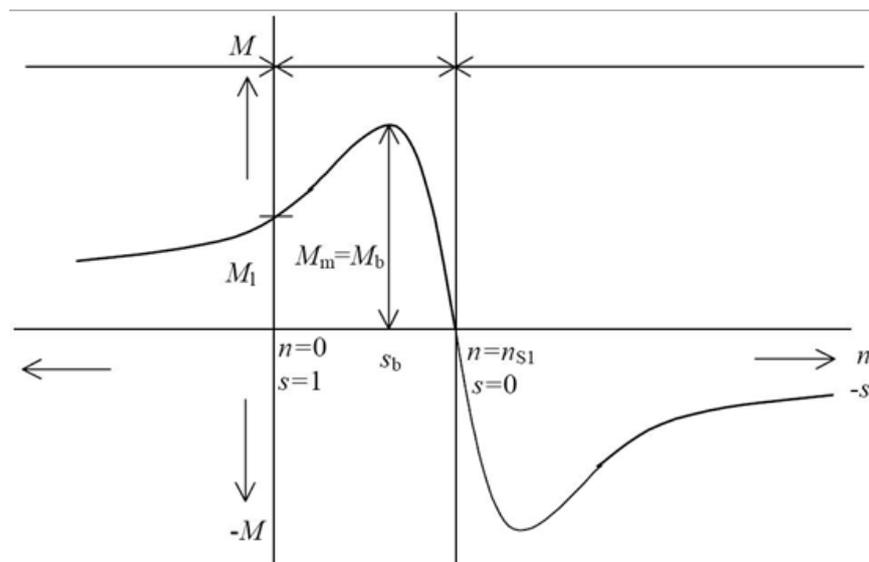


Figure 1.4 - Torque characteristics of an asynchronous machine [3]

Operating modes of AD

Braking mode

In the braking mode, the rotor rotates against the direction of the rotating magnetic field of the stator, a braking torque is created that acts against the direction of rotation, the slip is greater than 1, it consumes excess current from the network, causing thermal and mechanical stress. Therefore, the machine cannot be used for too long in this mode.

Engine mode

The machine in this mode has a higher torque than the load moment. The moment at which the motor starts to rotate is called the starting moment. As the speed increases, the engine torque increases to a maximum, which is called torque. The torque is then rapidly reduced to the point at which the motor reaches synchronous speed. At this stage, the moment is zero, the slip is 0, the engine goes into the next mode.

Generator mode

Another mode is the generator mode, in which the rotor of the machine has higher revolutions than the revolutions of the magnetic field of the stator. The voltage and current are reversed, and the machine generates electricity into the power system [2].

Braking of an asynchronous motor

Due to the kinetic energy of the rotating parts, the machine continues to work for a long time after disconnection from the mains. If necessary, you can use the car to brake another car. Braking is performed in three ways.

Counter current braking

Countercurrent braking is implemented by simply connecting two phases on the stator terminal block. This leads to a change in the direction of rotation of the stator magnetic field. This is very wasteful braking because all the motor energy is converted to heat in the rotor resistors. Also, this braking method can only be used for a short time due to the large currents flowing through the motor windings.

Engine mode

The machine in this mode has a higher torque than the load moment. The moment at which the motor starts to rotate is called the starting moment. As the speed increases, the engine torque increases to a maximum, which is called torque. The torque is then rapidly reduced to the point at which the motor reaches synchronous speed. At this stage, the moment is zero, the slip is 0, the engine goes into the next mode.

Generator mode

Another mode is the generator mode, in which the rotor of the machine has higher revolutions than the revolutions of the magnetic field of the stator. The voltage and current are reversed, and the machine generates electricity into the power system [2].

Braking of an asynchronous motor

Due to the kinetic energy of the rotating parts, the machine continues to work for a long time after disconnection from the mains. If necessary, you can use the car to brake another car. Braking is performed in three ways.

Counter current braking

Countercurrent braking is implemented by simply connecting two phases on the stator terminal block. This leads to a change in the direction of rotation of the stator magnetic field. This is very wasteful braking because all the motor energy is converted

to heat in the rotor resistors. Also, this braking method can only be used for a short time due to the large currents flowing through the motor windings.

Regenerative braking

Braking with energy generation into the network occurs if the rotor rotation frequency is higher than synchronous. Thus, the machine acts as a generator, supplying active power to the network. The motor can be switched to this braking mode by changing the number of poles or by using a frequency converter. Thus, the car cannot be stopped completely.

Dynamic braking

Dynamic braking consists in disconnecting the stator from the alternating current network and exciting it with direct current. A permanent magnetic flux is created in the stator winding. The current induced in the rotor, together with the generated flux in the stator, creates a torque acting against the rotating rotor. The torque can be created even at low revolutions and, thus, brake the engine [2].

Start of asynchronous motor

Due to the large current drop, the motors whose starting power is less than 22 kVA can be directly connected to the public electrical network. This corresponds to approximately 3 kW. Therefore, when starting a motor with a power greater than the already mentioned 3 kW, it is necessary to reduce or eliminate the current throw by one of the following means [2]:

Starting a motor with a short-circuited rotor is performed using:

- using a starter;
- by switching star-delta modes;
- autotransformer;
- semiconductor voltage regulators;
- special cage modification;
- double cage.

Starting a motor with a phase rotor:

- by changing the total active resistance of the rotor.

Regulation of the speed of asynchronous ED

Engine speed control can be implemented in several ways. Changing the slip, which is very uneconomical, or changing the number of poles, which leads to step regulation and, finally, changing the speed of the stator magnetic field. The last adjustment is carried out by a frequency converter [2].

By switching poles

Changing the number of poles allows you to adjust the speed only stepwise, and the number of steps is small, usually two steps. A larger number of poles would require complex commutation and make the proposed machine more expensive. Typical examples of a two-stage induction motor are old elevators that brake just before stopping at a destination, or old washing machines where two stages were used to change the mode (wash and rinse).

By changing the slip and supply voltage

Adjusting the speed by changing the slip in ring motors, including resistance in the rotor circuit is very uneconomical, as the rings and brushes wear out.

For motors with a cage change of the square of the supply voltage, the torque of the motor changes, and with it, the revolutions. This control is mainly used for the so-called soft start.

By changing voltage and frequency

This type of control has been in use for a relatively short time, it began to be used with the development of IGBT transistors capable of switching large powers and maintaining an acceptable switching speed.

Thus, it is reasonable to consider the inverter as a power converter for the electrical equipment under study.

1.3 Speed control of an asynchronous motor using frequency converters

The principle of operation of the frequency converter

This is a lossless control in which the power supplied to the stator comes from a variable frequency source. To regulate the speed, it is necessary to maintain a constant ratio of supply voltage and frequency ($U/f = \text{constant}$). If this ratio is kept constant, the

magnetic flux and the mechanical and torque moments of the motor will be constant. This is used, for example, in trams, where it is advantageous to have the maximum torque, up to a certain speed (and therefore the amount of revolutions) and thereby provide the maximum possible acceleration. After reaching a certain value of the frequency, the increase in voltage stops (given by the design of the converter) and only the frequency increases. The engine begins to extinguish the excitation, the torque decreases hyperbolically, and the power, which until then grew linearly, stabilizes. This behavior is reminiscent of a DC series motor. Therefore, this drive is widely used in electric traction [4].

Types of frequency converters

Frequency converters are made in two main variants: direct and indirect converters.

Direct frequency converters consist of four inverting thyristor rectifiers that switch an input frequency to produce a different output frequency. In this way, an output frequency of up to 25% of the input frequency can be created, which is why these converters are used for slow-running, high-power motors. In matrix inverters, closing transistors or GTO thyristors are used, which allows you to achieve an output frequency higher than the input frequency.

Indirect frequency converters [5] (with an intermediate constant voltage link) have three main parts: a rectifier, an intermediate constant voltage link and an inverter with IGBT transistors.

The most famous and most used are indirect converters with an intermediate link of constant voltage (Fig. 1.5). As a rectifier, you can use a six-pulse rectifier in cheaper versions, and in more expensive versions, this rectifier also allows you to return energy back to the network. The intermediate voltage circuit is formed by an electrolytic capacitor supplemented with a braking resistor, which is used to brake the motor without recuperation. In a three-phase inverter with IGBT transistors, sinusoidal pulse width modulation (PWM) is used, which consists in alternately connecting the load to the voltage of the intermediate link, thanks to the characteristics of the inductive load, an almost sinusoidal current flows.

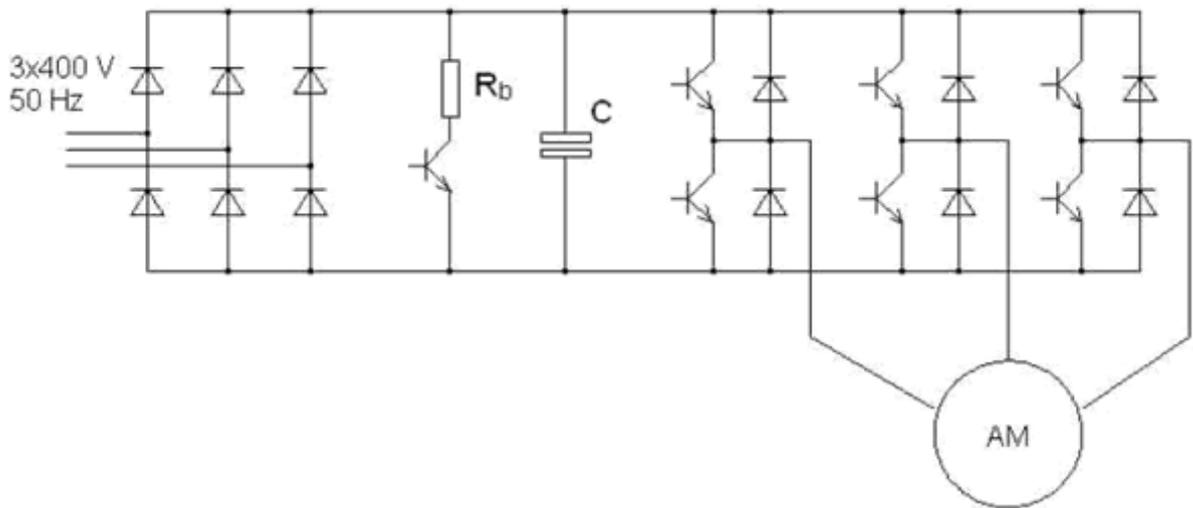


Figure 1.5 - The structure of a frequency converter with an intermediate link of constant voltage [5]

Types of motor control by means of a frequency converter

Scalar control

This is the most commonly used control, sometimes called voltage/frequency control. The advantage of this control method is the possibility of control in an open loop, that is, without feedback. It is reported that more than 90% of regulated induction motors in industry are controlled by scalar control without feedback [4]. The disadvantage of this control is that it does not achieve as good results in controlling static control accuracy and drive dynamics as other control methods using feedback input and using a PI controller, where the static accuracy is greatly improved, but the dynamic properties of the drive still not as effective as other types of management.

Scalar control consists in regulating the constant magnetic flux in the motor, which is ensured by maintaining a constant ratio of input voltage and frequency. At low frequencies, it is not possible to maintain a constant magnetic flux in the motor, and therefore the torque in this area is reduced. At high frequencies, it is impossible to continue its increase due to too high voltage, this leads to a uniform decrease in torque. Figure 1.6 shows the torque characteristic of a motor with scalar control.

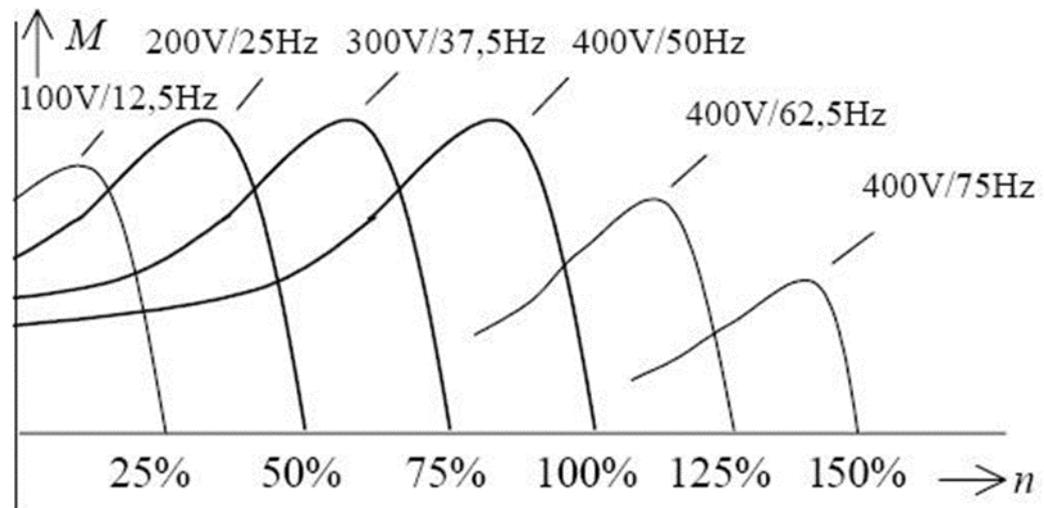


Figure 1.6 - Torque drop with scalar adjustment of AD [4]

Vector control

With vector control, it is necessary to control not only the value of the magnetic vector, but also the position of rotation. Vector control is divided according to the method of obtaining information about the position of the magnetic flux vector into direct and indirect methods.

Direct method - the magnetic flux vector is obtained from the stator voltage and currents. If a mathematical model is available to calculate slip, no additional measurements of rotor speed or position are required.

Indirect method - the magnetic flux vector is calculated from the mathematical model for calculating the slip and rotor position, which entails the need to measure the rotor position. A rotor position sensor can also be used to control speed and position. A PI controller is used for speed control, just like in scalar control, only a PI controller is used for position control.

Maintaining the moment

For this method, it is important to have the exact engine model available. This is determined during the identification run that is performed when the engine is installed in the program. The torque of the motor is formed by the vector product of the magnetic flux vector of the stator and the rotor. If the absolute value of the stator flux is maintained

constant, the torque will be proportional to the magnitude of the stator and rotor flux angle. During the identification run, the main parameters of the engine model are adjusted. Direct torque control requires a powerful microprocessor. The principle consists in creating a rotating magnetic field of the stator with the possibility of controlling the speed of rotation of this field and, thus, the torque of the motor. This control provides very good results for dynamically demanding systems, but the problem of this control is the low speed of reversal [4].

Motor braking using a frequency converter

Frequency converters allow you to brake the motor with a constant voltage. This braking method is used to stop the rotor. For deceleration, generator braking [5], described in the previous sections, is used, during which the frequency is gradually reduced and, thus, the synchronous revolutions are also reduced. Thus, the motor goes into the generator state, and the converter maintains this state until the motor shaft stops. When decelerating the motor, which is more demanding, the DC link generates corresponding pulses, the source of which is the energy generated by the motor. This problem is solved by connecting a resistor, on which the excess power of the intermediate link is converted into thermal energy.

1.4 Tasks of modernization

According to the results of the analysis of AD characteristics and operating modes carried out in the previous paragraphs, the requirements for the engine control system are:

- a wide range of engine speed regulation;
- possibility of maintaining a constant speed/moment;
- motor current control;
- temperature control of the stator windings means of computing power of the power converter;
- smooth start;
- implementation of the accuracy of the positioning of the working body of the mechanism due to the smooth execution of the specified engine operating modes;

Taking into account the established requirements for the AD control system, the tasks of modernization are as follows:

- 1) Select the appropriate elements of the electric motor control system.
- 2) Select the specified three-phase asynchronous motor and frequency converter models.
- 3) Develop a scheme of the electrical principle of the electric drive.
- 4) On the basis of the formed electric drive system, describe the flow characteristics of the corresponding technological process.
- 5) Form conclusions based on the results of modernization.

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Мікроконтролерна система управління
трифазними асинхронними
електродвигунами**

Кваліфікаційна робота бакалавра

Виконав:

Студент групи 201-ПМЕ

Пушкарь В.В.

Керівник:

доцент, канд. техн. наук

Галай В.М.

Полтава 2023

Актуальність теми роботи. Завдяки своїй простоті, надійності, низькій вартості та багатством іншим характеристикам асинхронний двигун (АД) раніше був найбільш використовуваним у задачах, які не вимагали регулювання електричного приводу (ЕП), оскільки це було складним процесом і не давало бажаних результатів. Крім того, стрибки струму, які виникають під час запуску цього типу двигуна, були перешкодою для більш широкого впровадження. Однак з появою силових електроніки проблему регулювання та стрибків струму було вирішено, і сьогодні цей двигун також використовується для точного контролю швидкості, крутного моменту або позиціонування .

Завдяки масовому виробництву блоків керування, наприклад, перетворювачів частоти (ПЧ), їхня ціна знизилася, і, отже, доцільність використання цього приводу розширилася, включаючи механізми, де важливою є точність регулювання ЕП.

Метою роботи є розробка методики побудови мікроконтролерної системи керування трифазними асинхронними електродвигунами.

Задачі роботи:

- 1) Провести вибір відповідних елементів системи керування електродвигуном.
- 2) Обрати визначені моделі трифазного асинхронного двигуна та перетворювача частоти
- 3) Розробити схему електричну принципову електроприводу.
- 4) На основі сформованої системи електроприводу, навести характеристику протікання відповідного технологічного процесу.
- 5) Розробити алгоритм автоматизації технологічного процесу із застосуванням АД, ПЧ та програмованого логічного контролера.
- 6) Скласти висновки за результатами роботи.

Характеристики асинхронного електродвигуна

Електродвигун MEZ Mohelrice 1,1 кВт

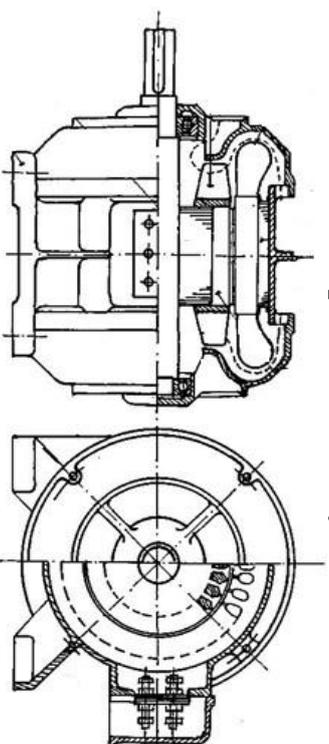


Параметри АД MEZ Mohelrice

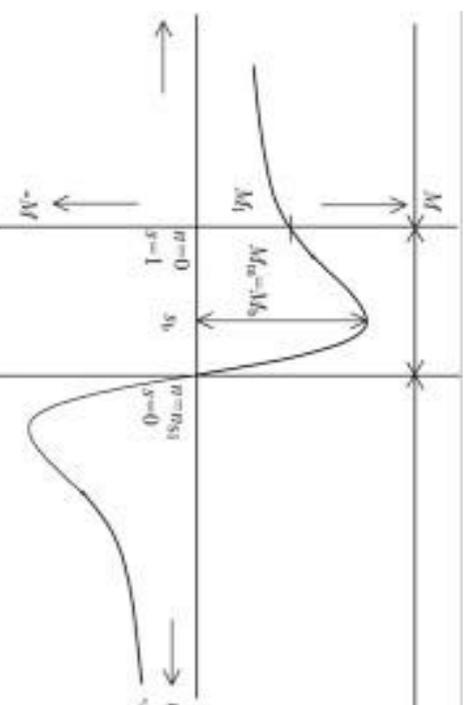
Параметр	Значення
Кількість фаз	3
Тип ротора	Короткозамкнутий
Номінальна потужність	1,1 кВт
Напруга живлення	при 380 Вт
з'єднанні зіркою	
Напруга живлення	при 220 Вт
з'єднанні трикутником	
Кількість обертів на хвилину	930
Номінальний струм	при 3,1 А
з'єднанні зіркою	
Номінальний струм	при 5,4 А
з'єднанні трикутником	
Коефіцієнт потужності (ф)	0,75
Клас ізоляції	B
Максимальна температура двигун	постійна 130С
Захист	IP 44

Розташування основних частин

асинхронного двигуна



Характеристики крутного моменту асинхронної машини



Характеристика контролера та модуля Ethernet/IP

Модуль ПЛК 1756-161 А
серії 5561

Характеристика ПЛК ControlLogix 5561



Параметр	Значення
Пам'ять користувача	2 МБ
Резервна пам'ять	64 МБ
Інтерфейс зв'язку	RS-232
Макс. кількість цифрових входів/виходів	128 000
Макс. кількість аналогових входів/виходів	4000
Пам'ять введення/виведення	478 КБ
Міцність ізоляції	30 В постійно, 707 В протягом 60 секунд
Маса	0,32 кг
Індекс температури ІЕС	Т4 (макс. постійна температура поверхні 135С)
Каталожний номер	1756-161А

Модуль Ethernet/IP
серії 1756-ENBT А



Характеристика модуля 1756-ENBT А

Параметр	Значення
Швидкість передачі	10/100 Мбіт/с
Макс. кількість ліній зв'язку	128 Logix, 64 TCP/IP
Споживана потужність	3,65 Вт
Міцність ізоляції	30 В постійно, 707 В протягом 60 секунд
Роз'єм порту	RJ45, категорія 5
Каталожний номер	1756-ENBT А

Параметри перетворювача частоти PowerFlex 700

Перетворювач частоти
PowerFlex 700

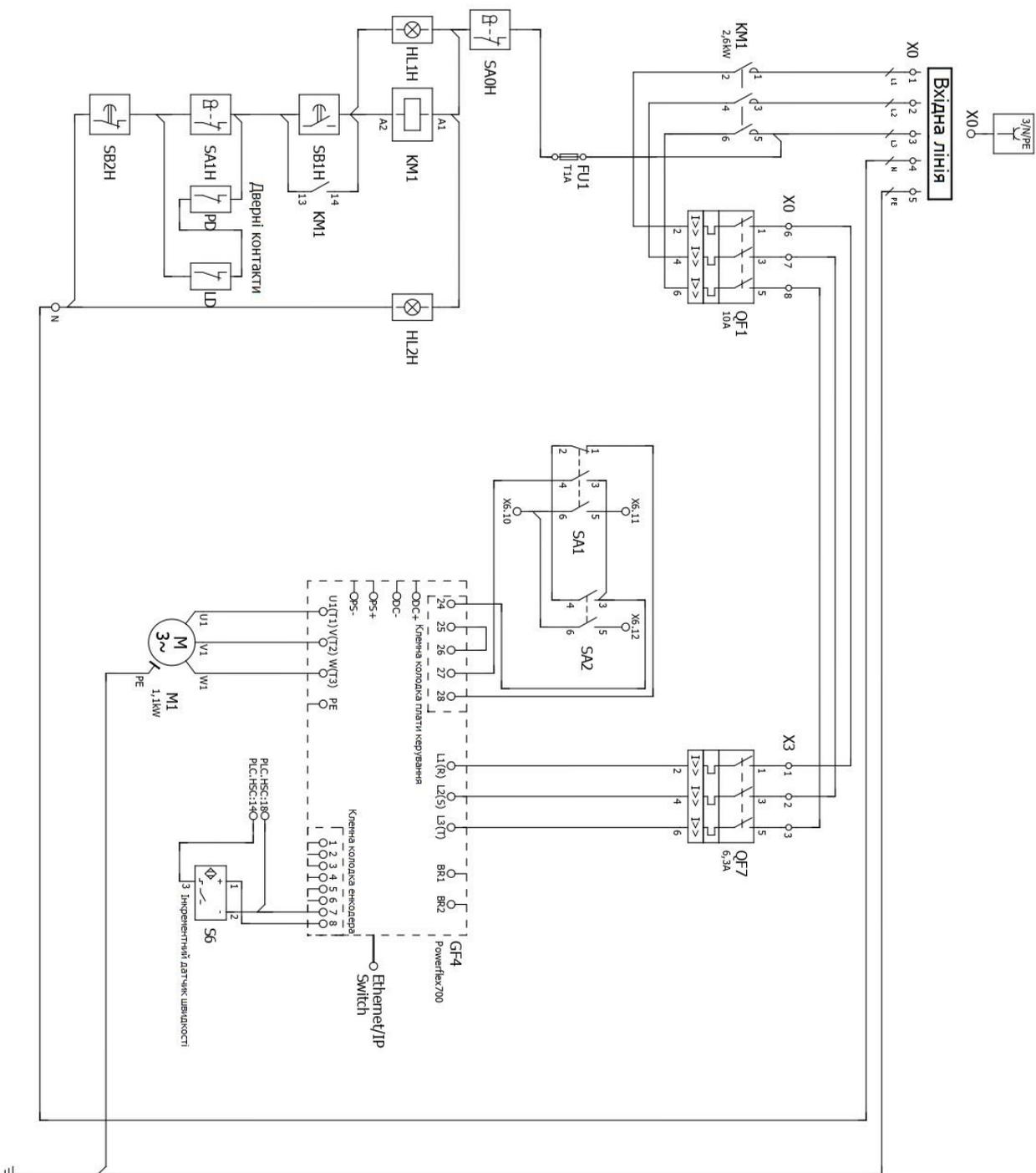


LCD дисплей з клавіатурою



Параметр	Значення
Напруга живлення	400В, 3-ф
Вихідний струм	11А
Ізоляція	IP 20
Напруга керування	24 В змінного/постійного струму
Відхилення вхідної напруги	±10%
Відхилення частоти	47-63 Гц
Макс. струм короткого замикання	200А
Продуктивність при живленні від однієї фази	50%
Межа перенапруги на вході	475 В змінного струму
Межа перенапруги проміжного кола	810 В постійного струму
Межа зниженої напруги проміжного кола	305 В постійного струму
Номінальна напруга проміжного кола	540 В постійного струму
Час роботи при відключенні електроенергії	15 мс при повному навантаженні
Робота керуючої логіки при відключенні електроенергії	2 с
Експлуатація на висоті над рівнем моря	1000 м без падіння показників
Робочий діапазон температури навколишнього середовища	0-50С
Максимальна відносна вологість	90% без конденсації
Допустима вібрація	амплітуда0,152 мм, 1G

Схема електрична принципова електропривоу



Висновки

У першій частині даної роботи наведено опис основних принципів експлуатації асинхронного двигуна, його поведінку в різних режимах роботи

Далі розглянуто питання регулювання швидкості асинхронного двигуна. Тут наведено методи керування за допомогою перетворювачів частоти, описано типи перетворювачів частоти з їх властивостями та методами застосування. Крім того, увагу у роботі присвячено особам управління АД, зокрема скалярному векторному управлінню та управлінням крутним моментом.

Наступним етапом виконання роботи є опис обладнання, яке використовується для керування імітованою виробничою лінією для свердління отворів у металевих заготовках. У подібних механізмах доцільним є застосування автоматизованих електроприводів з поєднанням АД та ПЧ. Так, наведено характеристики контролера *SoftCollLogix*. Описано основну частину параметрів даного контролера, який передбачено для використання якості керуючого елемента автоматизованої системи.

Визначено, що для комунікації елементів автоматизованої системи доцільним варіантом є промислова мережа *EtherNet/IP*. Так, наведено передумови створення стандарту *Ethernet* а потім описано його протокол, сумісність з іншими мережами та рішення для роботи режимі реального часу.

У якості перетворювача потужності для керування асинхронним двигуном обрано ПЧ *PowerFlex 700*. Тож, наведено в яких варіантах випускається перетворювач описано його можливість керування параметри підключення клемної колодки керування та особливості підключення енкадера. Остання частина розділу підсумовує параметри використання асинхронного електродвигуна.

У четвертому розділі роботи наведено особливості налаштування автоматизованої системи керування асинхронним електроприводом у складі технологічної лінії. Так, розглянуто питання візуалізації технологічного процесу, наведено опис робочого циклу керуючої програми та процедур, за допомогою яких реалізується імплементація.

Визначено, що візуалізація всього робочого процесу є ефективною частиною розробки автоматизованих систем керування технологічними процесами. Вона забезпечує відображення найважливішої інформації щодо перебігу технологічного процесу.

Алгоритм роботи автоматизованої лінії механічної обробки заготовок розроблено з урахуванням можливості його використання для навчальних потреб, та є одним із можливих варіантів розробки автоматизованої системи керування електроприводами.