

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

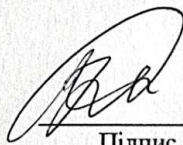
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка стенда для діагностування
підшипників асинхронного електродвигуна

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕТ-21



Підпис

В.О Харчук
Ініціали, прізвище

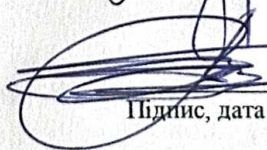
Керівник



Підпис, дата

к.т.н., доц. П.С. Майдан
Ініціали, прізвище

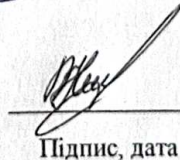
Нормоконтролер



Підпис, дата

доцент, к.т.н. Тимощук О.Г.
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС



Підпис, дата

доцент, к.т.н. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація _____

Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

2. 06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Харчук Володимир Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка стенда для діагностування підшипників асинхронного електродвигуна

керівник роботи Майдан Павло Сергійович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи Механічні та енергетичні характеристики обладнання

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих методів діагностування підшипників асинхронного двигуна 2. Розробка конструкції стенду для діагностування підшипників асинхронного двигуна. 3. Розрахунок до стенда для діагностування підшипників асинхронного двигуна .

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Вид загальний конструкція стенда (ГК). Аркуш 2. Вид загальний конструкція стенда (ГК). Аркуш 3. Документ оглядовий (ДО). Аркуш 4. Структурна схема стенда (С1). Аркуш 5. Електрична схема принципова стенда (Е3). Аркуш 6. Електрична принципова схема АВР(Е3).

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електропобутова техніка

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Харчук Володимир Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

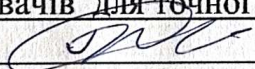
Тема роботи Розробка стенду для діагностування підшипників асинхронного двигуна

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента _____

2. Обсяг бакалаврської роботи: креслень 6 арк, сторінок записки 81

3. Характеристика розділів пояснювальної записки:

В першому розділі розглянуто вплив механічних навантажень на підшипники асинхронного двигуна. Розглянуто програмне забезпечення для програмного контролера Siemens S7-1200. Ознайомлення з принципом роботи Arduino Uno . Розглянуто теоретичні основи ультразвуку . В другому розділі розроблено конструкцію стенда далі до цього було розроблена електрична схема принципова і додаткова впроваджена схема авр для резервного живлення додатково описано підключення Arduino Uno до PLC ,розроблено коди пошкодження і зношення підшипників . В третьому розділі розраховувалось проникнення ультразвуку в сталь для розроблення коду спрацювання дефекту підшипника також розраховано довговічність підшипників при різних навантаженнях, розраховано цифрові значення давачів для точної взаємодії давача і PLC.

Підпис студента 

" 2 " 06 20 25 р.

Р І Ш Е Н Н Я Е К ЗА М Е Н А Ц І Й Н О Ї К О М І С І І:

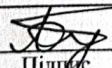
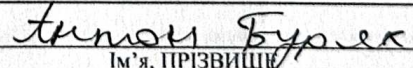
Протокол 4 від 20 06 20 25 р.

Оцінка роботи ЕК 4,5 / В

Рекомендації ЕК впровадження в навчальний

процес

Особливі відмітки -



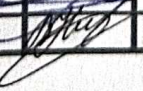

Технічний секретар  
Підпис Ім'я, прізвище

" 20 " 06 20 25 р.

Зміст

	с.
Вступ.....	6
1 Огляд та аналіз існуючих методів діагностування підшипників.....	8
1.1 Вплив механічних навантажень на підшипники асинхронного двигуна	8
1.2 Огляд та аналіз програмного забезпечення для програмного контролера логічного контролера Siemens S7-1200.....	9
1.3 Принцип роботи мікропроцесора Arduino Uno.....	20
1.4 Теоретичні основи ультразвуку	24
2 Розробка конструкції стенду діагностування підшипників асинхронного двигуна.....	38
2.1 Розробка структурної схеми стенду діагностування підшипників..... асинхронного двигуна.....	38
2.2 Розробка електричної принципової схеми стенда для діагностування підшипників асинхронного двигуна.....	39
2.3 Підключення до Arduino Uno до PLC.....	45
2.4 Розробка системи АВР для керування PLC.....	49
2.5 Розробка коду для відстеження зношення підшипників АД в програмі Step7 TIA Portal.....	52
2.6 Розробка коду для відстеження роботи підшипників в реальному часі	54
3 Розрахунки до стенда для діагностування підшипників асинхронного... двигуна.....	58
3.1 Розрахунок аналогових сигналів в програмному середовищі TIA Portal.....	58

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Харчук В.О			Розробка стенду для діагностування підшипників АД	Літ.	Арк.	Акрюшів
Перевір.		Майдан П.С					4	81
Реценз.					ХНУ гр. ЕТ-21-1			
Н. Контр.		Тимошенко О.Г						
Затверд.		Неймак В.С						

3.2 Розрахунок відстані, на яку можна встановлювати ультразвуковий датчик без втрат електромеханічних властивостей.....	63
3.3 Розрахунок основних акустичних параметрів.....	65
3.4 Розрахунок на довговічність підшипників АД для програмування в програмі TIA Portal.....	69
3.5 Розрахунок системи АВР для керування PLC.....	71
3.6 Розрахунок кошторису стенда.....	73
Висновки.....	76
Перелік джерел посилань.....	77
Додатки	

ВСТУП

Асинхронні електродвигуни (АЕД) є невід’ємною складовою промислових об’єктів і споживають левову частку електроенергії в технологічних процесах. За даними різних досліджень, приблизно 75 % усієї виробленої електроенергії витрачається на електроприводи, причому більшість із них — це трифазний АЕД. Несправності таких машин (зокрема через зношені підшипники, дефекти ротора чи статора) часто призводять до простоїв у виробництві та високих матеріальних втрат. Саме тому впровадження сучасних методів технічного діагностування, які дозволяють вчасно виявляти дефекти та запобігати аваріям, є надзвичайно актуальним [1].

Головна мета цього розробки стенда — спроектувати технологію для діагностики АЕД із використанням інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. Даний метод дозволить підвищити надійність роботи електроприводів і зменшити фінансові витрати на обслуговування шляхом своєчасного виявлення дефектів.

У ході конструювання стенда вирішуються такі завдання:

- аналіз сучасних методів спектрально-ультразвукової діагностики АЕД;
- виявлення характерних частотних ознак, які свідчать про наявність різних видів ушкоджень;
- розробка алгоритмів для ідентифікації двигунів у мережі та постійного моніторингу параметрів;
- проведення техніко-економічного обґрунтування ефективності запропонованої технології [1].

Запропонована інформаційна технологія дозволяє оперативно виявляти ознаки потенційних несправностей. Це сприяє безперебійній роботі промислових систем, підвищенню надійності обладнання та зниженню витрат на технічне обслуговування і ремонт [1].

У процесі проєктування та реалізація інтелектуальних систем діагностики можливо стикається з низкою викликів.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-перше, необхідно розрахувати наближеність до реальних фізичних ситуацій, щоб точніше задати дані алгоритмів автоматизацій.

По-друге, інтеграція таких рішень у реальні виробничі системи потребує узгодження з існуючими стандартами і залученням фахівців із різних галузей — від електротехніків до інженерів КВПіА .

У подальшій перспективі з подальшим розвитком стаціонарних діагностичних вузлів, оснащені давачами струму й ультразвуку, можуть постійно передавати дані до централізованої платформи, де алгоритми машинного навчання в режимі реального часу аналізуватимуть їх і повідомлятимуть про найменші відхилення від норми.

Це відкриває нові можливості для прогностичного обслуговування: замість разових перевірок технічний персонал матиме доступ до щоденних звітів і рекомендацій щодо планування ремонтних робіт.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ

1.1 Вплив механічних навантажень на підшипники асинхронного двигуна

В асинхронних двигунах зазвичай використовуються підшипники кочення. У процесі експлуатації з різних причин підшипники виходять з ладу, внаслідок чого двигун підлягає дорогому ремонту чи навіть заміні. Контроль стану підшипників в асинхронних двигунах має у сучасній промисловості велике значення. На рис. 1.1 наведено основні види несправностей підшипників [2].



Рисунок 1.1 - Основні несправності підшипників [3]

Причини пошкодження підшипників в електродвигуні розподіляються таким чином: надлишок або нестача мастила – 43%, неправильне встановлення — 27%, неправильне складання, експлуатація - 24%, зношування природним чином – 9%. Підшипник є опорою валу асинхронного двигуна та забезпечує його обертання з найменшим опором. Від стану підшипника залежить справність роботи двигуна загалом. Підвищені навантаження та складні умови експлуатації призводять до пошкоджень підшипника та його руйнування. Ушкодження спричиняють появу

додаткових вібрацій і шуму, з'являються додаткові зусилля, що ускладнюють обертання валу двигуна. При абразивному зносі підшипника вісь валу відхиляється від нормального просторового становища і з'являється статичний ексцентриситет ротора [3].

Несправність підшипника має бути виявлена якомога раніше, бо у разі навіть незначних дефектів процес подальшого їх розвитку йде лавиноподібним.

На першому етапі експлуатації підшипник інтенсивно зношується до певного моменту, знос на цьому проміжку часу буде мінімальним за дотримання всіх правил установки, оптимальної кількості мастила та умов експлуатації [3].

На другому етапі підшипник практично не зношується, однак при досягненні критичного значення зносу процес починає протікати дуже швидко і неминуче веде до виходу з ладу підшипника. Багаторічний досвід показує, що підшипники практично ніколи не допрацьовують проектний термін служби. Це зумовлено дефектами виготовлення, умовами зберігання та транспортування, важкими експлуатаційними умовами, навантаженням. Несправність підшипника призводить до виникнення статичного ексцентриситету ротора АТ і викликає одностороннє магнітне тяжіння, а також додаткові електромагнітні гармоніки у полі статора [3].

1.2 Огляд та аналіз програмного забезпечення для програмованого логічного контролера Siemens S7-1200

Промислова автоматизація включає в себе різноманітне обладнання та процеси, спрямовані на вдосконалення всіх ліній виробництва більш ефективними. Іншими словами, те, що раніше робили людські оператори, зараз може бути легко здійснено автоматизованим обладнанням. Пропонуючи чітку перевагу, автоматизація займає позиції в майже усіх підгалузях промисловості і не тільки. Промислова автоматизація розглядається і розглядається як необхідність для існування, виживання та розвитку будь-якої компанії, яка має високу продуктивність. Представляючи широке поле, автоматизація є складною галуззю техніки, без якої великі та малі виробники не можуть продовжувати працювати.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд контролера S7-1200 [4]

Базовий контролер SIMATIC S7-1200 - ідеальний вибір для універсальних і ефективних рішень задач в області автоматизації в низькому і середньому діапазоні продуктивності. Вони мають широкий спектр технологічних функцій і інтегрованою систему вводу-виводу, а також компактний дизайн. SIMATIC S7-1200 було обрано для розробки системи діагностики електричних машин електроприводу через його широкий функціонал та надійність. Цей контролер має високу продуктивність, а також простий у використанні програмний інтерфейс, що робить його ідеальним вибором для автоматизації та моніторингу процесів в промислових середовищах. Крім того, Siemens S7-1200 має вбудовані можливості збору та обробки даних, що дозволяє ефективно взаємодіяти з електричними машинами, контролюючи їх стан та виявляючи можливі відхилення. Такий контролер відповідає вимогам сучасного промислового обладнання та забезпечує надійну та ефективну систему діагностики електричних машин електроприводу [4].

Крім того, SIMATIC S7-1200 є частиною інтегрованої системи автоматизації Siemens, що дозволяє легко і надійно інтегрувати його з іншими компонентами автоматизації, такими як сенсори, приводи та інші контролери. Це забезпечує можливість розширення функціоналу системи діагностики та її адаптації під конкретні потреби і умови роботи. Крім того, Siemens S7-1200 має широкий спектр доступних інтерфейсів зв'язку, що дозволяє легко інтегрувати систему діагностики з іншими

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

промисловими системами управління та моніторингу. Таким чином, обрання SIMATIC S7-1200 для розробки системи діагностики електричних машин електроприводу забезпечує комбінацію високої продуктивності, надійності та гнучкості, що необхідно для успішного впровадження такої системи в промислове середовище [4].

Для студентського стенду використання контролера Siemens S7-1200 є зручним і ефективним вибором. Порівняно з більш потужними моделями, такими як S7-1500, S7-300 або S7-400, S7-1200 має меншу вартість, що робить його більш доступним для студентів та освітніх закладів. Крім того, S7-1200 має компактну конструкцію і простий у використанні інтерфейс, що дозволяє швидко навчитися його програмувати та налаштовувати. Він також має достатню функціональність для більшості освітніх завдань та проектів, пов'язаних з автоматизацією. Таким чином, S7-1200 є оптимальним вибором для студентського стенду з урахуванням його продуктивності, доступності та легкості використання [4].



Рисунок 1.3 - Дискретний сигнальний модуль [5]

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рисунок 1.4 - Аналоговий сигнальний модуль [6]

Модулі аналогових і цифрових сигналів є важливими компонентами для програмування PLC S7-1200, що дозволяє йому взаємодіяти з реальним світом [4].

Аналогові модулі перетворюють сигнали від датчиків, таких як термомпари, тензодатчики та аналогові виходи інших пристроїв, в цифрові значення, які можуть бути оброблені PLC [4].

Дискретні модулі обробляють двійкові сигнали, такі як сигнали від кінцевих вимикачів, реле, кнопок і фотодатчиків.

Вибір типу модуля залежить від типу сигналу, який обробляється PLC.

Аналогові модулі використовуються для безперервних сигналів, в той час як цифрові модулі використовуються для дискретних сигналів.

S7-1200 пропонує широкий вибір аналогових і цифрових модулів, що дозволяє вибрати найкраще рішення для будь-якого застосування [4].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Рисунок 1.5 - Комутаційний модулі CM1242 [7]



Рисунок 1.6 - Комутаційний модулі CP 340 [8]

Комунікаційні модулі для S7-1200 – це невід’ємна частина програмування ПЛК S7-1200, що дають йому можливість обмінюватися даними з іншими пристроями та системами. Завдяки їм S7-1200 стає не просто автономним контролером,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

а й частиною інтегрованої системи автоматизації [4].

Різноманіття модулів S7-1200 пропонує широкий спектр комунікаційних модулів, що дає можливість підібрати оптимальне рішення для будь-якої задачі:

- PROFIBUS: CP 342-5, CP 343-1;
- PROFINET: CM 1241, CM 1242;
- Ethernet/IP: CP 343-1;
- Modbus TCP/IP: CM 1241, CM 1242;

Використання комунікаційних модулів S7-1200 відкриває широкі можливості для створення сучасних, гнучких та надійних систем автоматизації. Важливо зазначити, що для успішного використання комунікаційних модулів S7-1200:

Мови програмування в контролерах

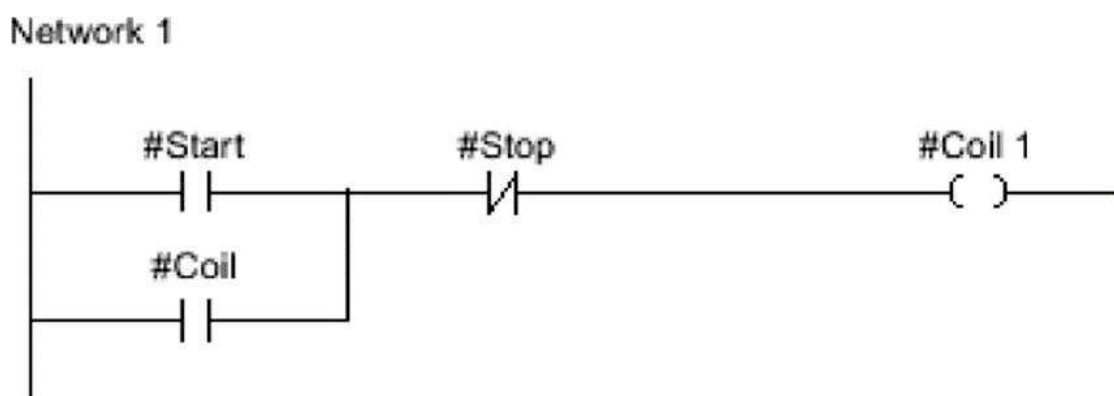


Рисунок 1.7 - Мова програмування LAD

Мова програмування LAD (Ladder Diagram) – це графічна мова програмування, що використовується в PLC Siemens S7-1200 для створення програм керування. Вона візуально схожа на електричні схеми, що робить її простою для розуміння та використання.

Функціонування LAD використовує контакти та катушки для створення логічних ланцюгів. Контакти перевіряють умови, а катушки виконують дії.

LAD використовує теги для адресації входів, виходів, змінних та інших даних. Теги – це символи, які унікально ідентифікують дані.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

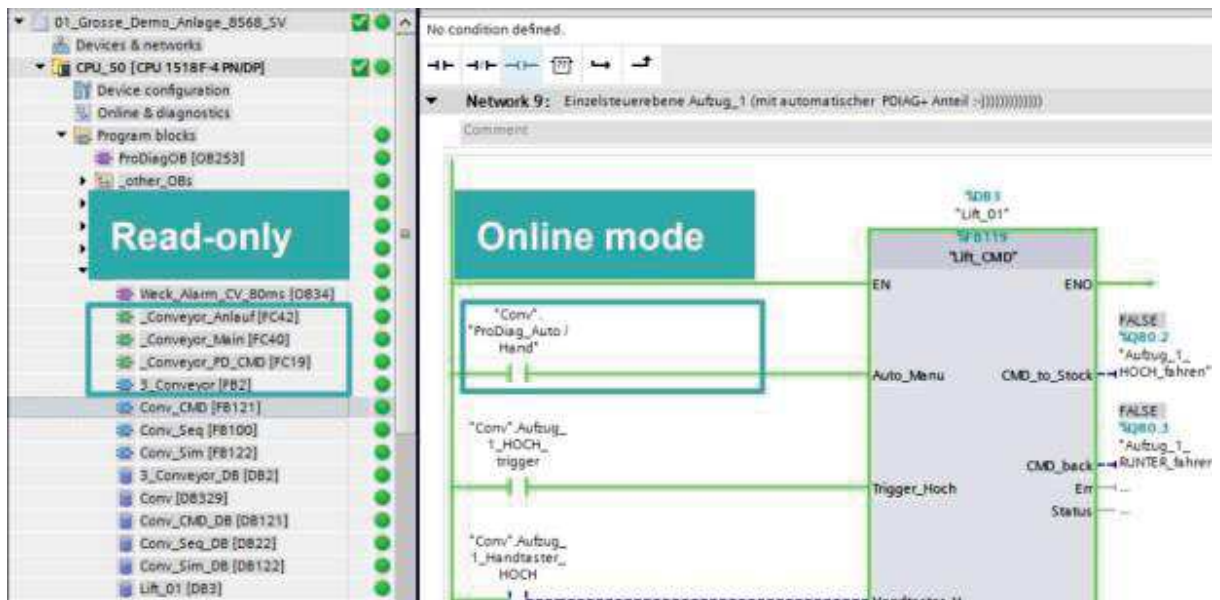


Рисунок 1.8 - Подача сигналу в онлайн режимі

Деякі приклади тегів, що використовуються в LAD:

- I0.0 Вхід 0.0;
- Q0.1 Вихід 0.1;
- MW10 Змінна в пам'яті з адресою 10;
- DB2.DBX10.0 Біт 0 байта 10 в блоці даних 2.

Однак LAD також має деякі недоліки:

- Складність LAD може бути складною для програмування складних задач;
- Неефективність LAD програми можуть бути неефективними з точки зору використання пам'яті;

-Обмеження LAD не може використовуватися для програмування всіх задач керування. В цілому, LAD – це потужна та гнучка мова програмування, що може використовуватися для програмування широкого спектру задач керування.

Важливо зазначити, що для успішного використання LAD:

- Необхідно мати базове розуміння логіки та програмування;
- Вивчити правила та синтаксис LAD;

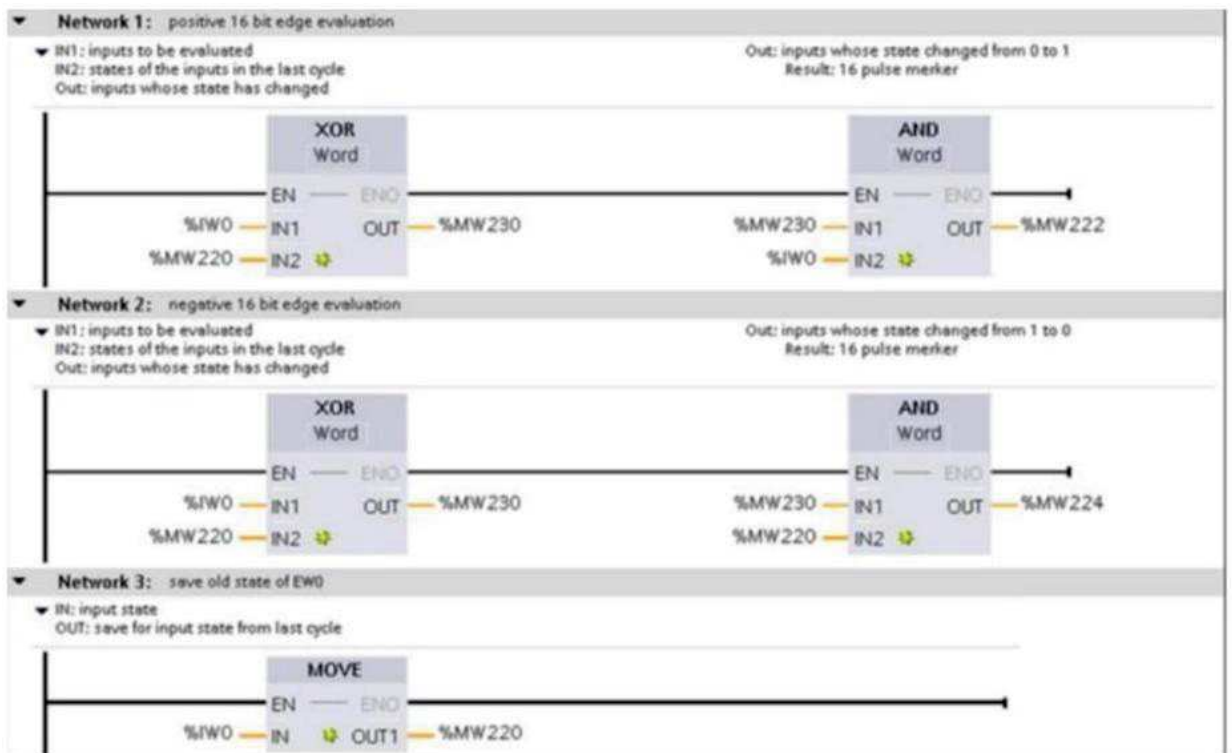


Рисунок 1.9 - Мова програмування Функціональні блоки

Функціональні блоки (FB) у середовищі TIA Portal— це самостійні модулі з власною областю пам’яті (Instance DB), які інкапсулюють складну логіку та зберігають стан між скануваннями, що дозволяє повторно використовувати один і той самий код у різних частинах проєкту без дублювання.

Кожен екземпляр FB має свій DB із змінними VAR_INPUT, VAR_OUTPUT та VAR_IN_OUT, у якому утримуються лічильники, таймери, прапорці станів автомата або будь-які інші внутрішні дані, тому блок «пам’ятає» попередні значення й може реалізовувати скінченні автомати, регулятори або складні алгоритми. Завдяки такій інкапсуляції у головній програмі достатньо викликати один і той самий FB із різними DB-інстанціями — наприклад, FB_ConveyorControl із параметрами швидкості та сигналами датчиків (Start, Stop, Emergency) керуватиме кожною ділянкою конвеєра окремо, оновлюючи свій таймер розгону/гальмування і формуючи виходи Motor_On/Motor_Off без необхідності заново малювати логіку. Це значно спрощує читання, масштабування та підтримку проєкту, оскільки всі зміни в алгоритмі вносяться в одному місці, а налаштування різних екземплярів здійснюється через інтерфейс блоку. Фактично FB реалізують об’єктно-орієнтований підхід у

										Арк.
										16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

PLC-програмуванні, забезпечуючи модульність, повторне використання, збереження стану та гнучке налаштування під конкретні завдання.

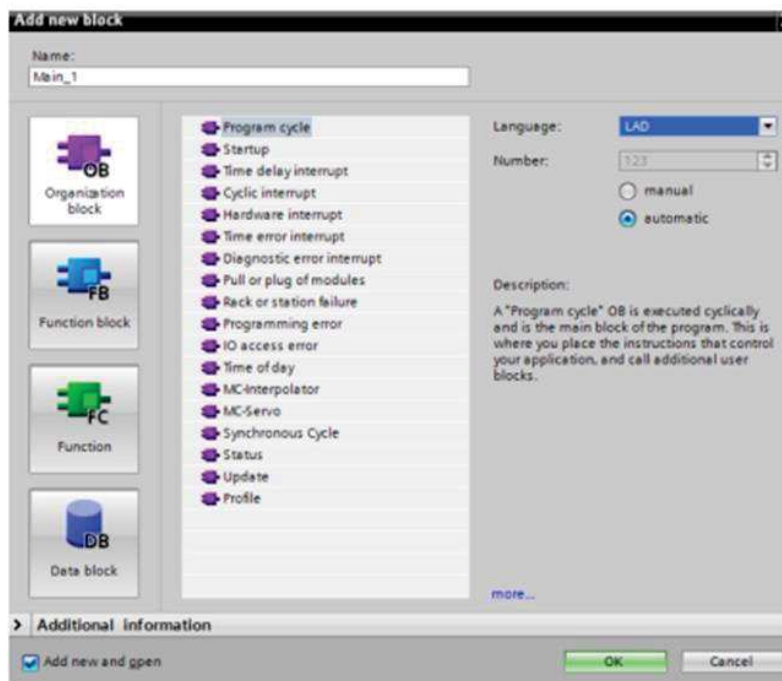


Рисунок 1.10 - Вибір Функціональних блоків

Мова SCL (Structured Control Language) у контролерах Siemens S7-1200 створена для текстового опису складних алгоритмів відповідно до стандарту IEC 61131-3 і поєднує в собі простоту Pascal-подібного синтаксису з можливостями промислового контролера.

Використовувати SCL виправдано тоді, коли графічні рішення в LAD чи FBD розростаються в громіздкі мережі: наприклад, для обробки масивів із сотні датчиків достатньо оголосити `SensorValues: ARRAY[0..99] OF REAL;` і написати цикл `FOR i := 0 TO 99 DO ... END_FOR`, щоб обчислити середнє значення і стандартне відхилення, замість сотень блоків і з'єднань у LAD.

Аналогічно, складні PID-алгоритми з динамічною адаптацією констант описуються в SCL через вкладені конструкції `IF...THEN...ELSIF` і підпрограми, тоді як у FBD довелося б використовувати низку спеціальних функціональних блоків. Робота зі структурами даних теж спрощена: оголосивши `TYPE OrderType : STRUCT OrderID: INT; Qty: INT; END_STRUCT;` `VAR Orders: ARRAY[0..49] OF`

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

код, завантажувати його на плату та створювати власні інтерактивні пристрої [9].

Найбільш популярні плати Arduino:

Arduino Uno Arduino Uno є стандартною платою Arduino і, можливо, найпоширенішою. Вона заснована на чіпі Atmel ATmega328, що має на борту 32 КБ флеш-пам'яті, 2 Кб SRAM та 1 Кбайт EEPROM пам'яті. На периферії має 14 дискретних (цифрових) каналів введення/виведення та 6 аналогових каналів введення/виведення, це дуже різнобічно-корисні девайси, що дозволяють перекривати більшість аматорських завдань у галузі мікроконтролерної техніки. Чіп ATmega16u2 на борту керує послідовним зв'язком. Дана плата контролера є однією з найдешевших і найчастіше використовуваних. При плануванні нового проекту, якщо ви не знайомі з платформою Arduino, раджу почати з Uno Arduino Leonardo [9].

Платформа Arduino Leonardo трохи відрізняється від Uno. На основі ATmega32u4 цей мікроконтролер має розширені можливості USB і, отже, не вимагає окремого мікрочіпа для послідовного зв'язку по USB, як Uno. Це означає меншу вартість; менше мікросхем - дешевше за рішення. Це також означає, що розробник може використовувати мікроконтролер як рідний USB-пристрій, збільшується гнучкість при комунікації з комп'ютером. Леонардо може ефективно емулювати клавіатуру та мишу через USB HID [9].

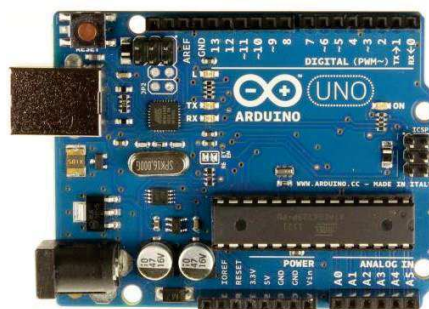


Рисунок 1.14 - Arduino Uno

Платформа Arduino Ethernet на основі ATmega328, взята з Uno, може підключатися до мережі Ethernet, функціональність необхідна в багатьох проектах. Фізично, платформа Arduino Ethernet має ті ж 14-дискретних входів/виходів, як

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Arduino Uno, з тим винятком, що 4 використовуються для управління модулем Ethernet і вбудованим зчитувачем мікро-SD карт, обмежуючи кількість доступних висновків [9].

Цікаво відзначити, що Arduino Ethernet має додатковий модуль POE (Power Over Ethernet). Ця опція дозволяє Arduino Ethernet житися безпосередньо від мережі Ethernet, без необхідності використання зовнішнього джерела живлення за умови, що живлення POE підключено на іншому кінці кабелю Ethernet. Без POE Arduino має бути заживлений за допомогою зовнішнього джерела живлення.

Ще одна відмінність від інших плат Arduino – це відсутність роз'єму USB. Тому що досить багато місця зайнято роз'ємом Ethernet, проте пристрій підтримує комунікації через звичайні висновки [9].

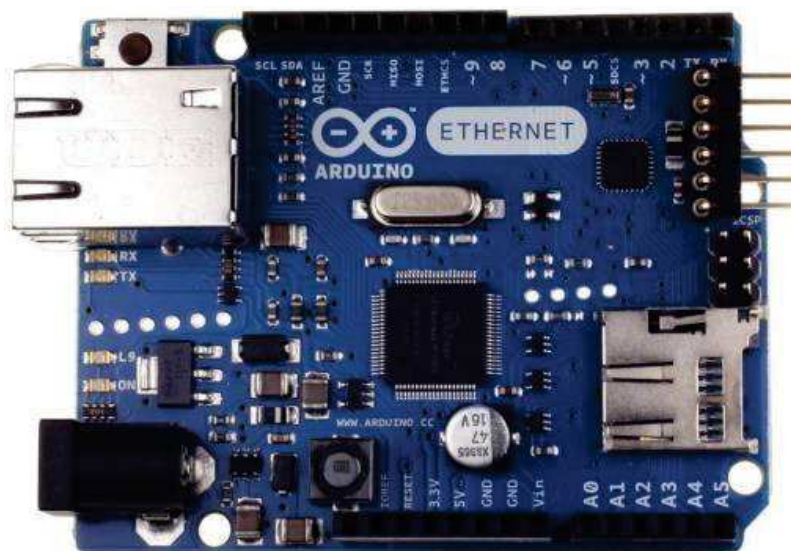


Рисунок 1.15 - Arduino Ethernet

Arduino Mega 2560 лише трохи довша, ніж Arduino Uno, але вона має значно більше каналів введення/виведення. Вона має загалом 54 цифрових лінії введення/виведення та 16 аналогових входів. Вона також має велику кількість флеш-пам'яті: 256 КБ, що дозволяє зберігати більші програми, ніж Uno. Вона також має чималу SRAM та EEPROM: 8 КБ та 4 КБ, відповідно. Вона також має 4 апаратні UART порти, що робить її ідеальною платформою для комунікацій з кількома пристроями паралельно.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Плати Arduino Mega використовуються там, де необхідна велика кількість входів та виходів [9].

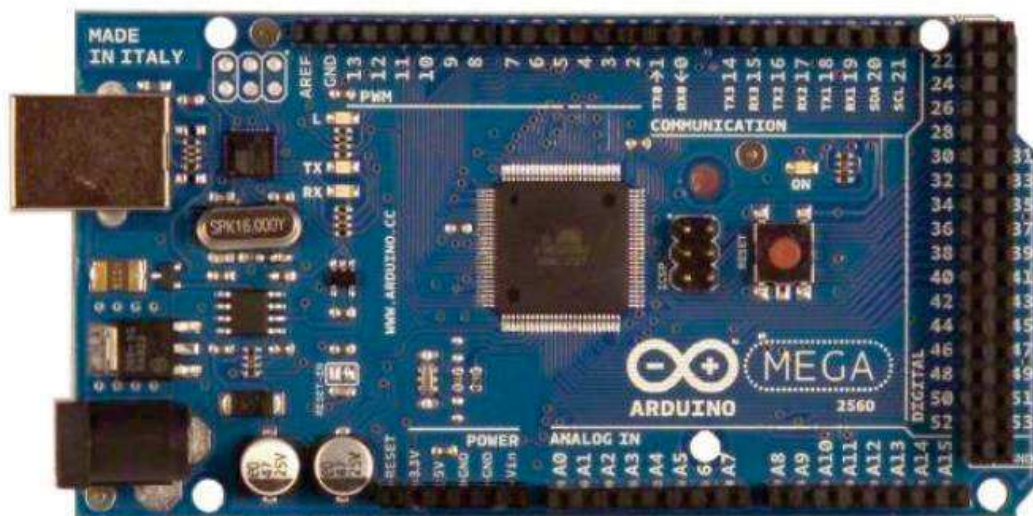


Рисунок 1.16 - Зображення Arduino Mega 2560 [9]

Мікроконтролер Arduino Micro повністю відповідає своїй назві; це одна з найменших плат з лінійки Arduino. Незважаючи на свій невеликий розмір, вона все ж таки має велику кількість входних і вихідних пінів; вона має 20 цифрових каналів введення/виведення, з яких 7 можуть бути використані як виходи ШІМ. Вона також має 12 аналогових входів. Мікро не спроектована для нарощування шилдами, але в неї таке розташування гребінок, що зручно розміщувати безпосередньо на макетній платі [9].



Рисунок 1.17 – Arduino Micro [9]

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Також варто розповісти про технічні характеристики Arduino. Найкраще це можна продемонструвати на платі Arduino Uno [9].

Особливості:

- процесор ATmega328P пам'ять;
- процесор AVR до 16 МГц;
- 32 кб Flash;
- кб Sram;
- 1 кб Eeprom.

Безпека

- скидання при включенні (POR);
- виявлення коричневого кольору (BOD).

Периферійні пристрої

- 2x 8-бітний таймер/лічильник із спеціальним реєстром періодів і порівнянням каналів;
- 1x 16-розрядний таймер/лічильник із спеціальним реєстром періоду, записом вхідних даних і каналами порівняння;
- 1x USART з генератором дробової швидкості передачі даних і визначенням початку кадру;
- 1x контролер/периферійний послідовний периферійний інтерфейс (SPI)
- 1x дворежимний контролер/периферійний I2C;
- 1x аналоговий компаратор (AC) з масштабованим опорним входом;
- сторожовий таймер з окремим вбудованим генератором;
- шість каналів ШІМ;
- переривання та пробудження при зміні PIN-коду.

Процесор ATmega16U2

- 8-розрядний мікроконтролер на базі AVR® RISC Пам'ять;
- 16 кб ISP Flash;
- 512B EEPROM;
- 512B SRAM;
- інтерфейс debugWIRE для налагодження та програмування на чіпі

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

потужність;

- 2,7-5,5 вольт.

Тож найбільш популярною та доступною версією Arduino є Arduino Uno та Nano[4].

1.4 Огляд і аналіз теоретичних основ ультразвуку

Розглядаємо теорія поширення ультразвуку та його взаємодії з різними середовищами. Описуємо ключові аспекти обладнання, перетворювачів та методів обробки, необхідних для збору ультразвукових даних.

Ультразвук — це особливий тип акустичного сигналу, що являє собою поширення звукових хвиль або механічних коливань через середовище [10]. Ультразвук характеризується високою частотою, яка перевищує межу чутності людського вуха, зазвичай понад 20 кГц. Поширення пружних хвиль можливе завдяки пружним властивостям середовища; якщо матеріал не перевищує межу пружності, його частинки можуть здійснювати пружні коливання. Коли частинки зміщуються зі свого рівноважного стану, електростатичні сили відновлення разом з інерцією частинок викликають коливання в середовищі [12]. Ультразвук має широке застосування, найвідомішим з яких є медичні сканування під час вагітності. У механічній інженерії ультразвук традиційно використовується для неруйнівного контролю (NDT), але останнім часом розроблено методи для трибологічних інтерфейсів [11,13,14].

Особливості поширення ультразвуку

Ультразвукові хвилі бувають різних типів, зокрема об'ємні, поверхневі та пластинчасті. У цій роботі основна увага приділяється об'ємним хвилям, які поділяються на поздовжні та поперечні. Поздовжні хвилі поширюються в напрямку коливань, тоді як поперечні хвилі поширюються перпендикулярно до напрямку коливань, як показано на рисунку 1.18 [15].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

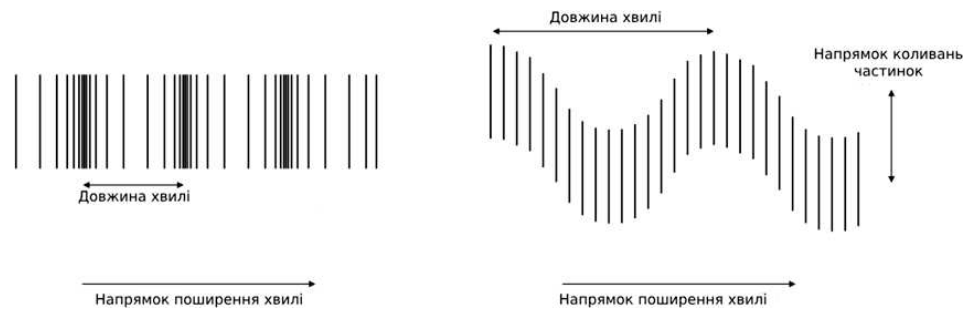


Рисунок 1.18 - Поширення об'ємних хвиль: (а) поздовжніх та (б) поперечних [32]

Фактори, що впливають на поширення

Важливі концепції в поширенні звуку включають швидкість звуку, зату- хання, відбиття та заломлення.

Швидкість звуку пов'язана з довжиною хвилі та частотою звуку, як описано рівнянням 1.1:

$$c = f \cdot \lambda . \quad (1.1)$$

Поздовжні та поперечні хвилі поширюються з різною швидкістю і в твердих тілах поздовжні хвилі зазвичай поширюються майже вдвічі швидше, ніж поперечні хвилі. Зміни температури матеріалу також можуть впливати на швидкість звуку. Поле напружень може змінити швидкість звуку акустичної хвилі. Це явище відоме як акустично еластичний ефект. Коли матеріал знаходиться в стисненні, швидкість звуку збільшується, а коли він знаходиться в розтягуванні, швидкість звуку змен- шується. Акустично еластичну константу можна визначити для опису цієї поведі- нки:

$$L = \frac{d_{cp} / c_0}{d_g} \quad (1.2)$$

Різні акустично еластичні константи визначаються залежно від режиму

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хвилі, напрямку її поширення відносно поля напружень та напрямку коливання частинки відносно поля напружень [16].

Затухання ультразвуку — це зменшення акустичної енергії при поширенні хвилі через середовище, чого не можна уникнути. Затухання є комбінованим ефектом поглинання (перетворення акустичної енергії в теплову енергію) та розсіювання (відбиття звукової енергії від її початкового напрямку поширення) [17].

Швидкість, з якою сигнал затухає, залежить від характеристик звукової хвилі, а також від властивостей матеріалу та структури середовища. Звук затухає швидше на вищих частотах, тому звук нижчої частоти поширюватиметься далі через компонент [17].

Більш пористий матеріал розсіюватиме більше акустичної енергії, тому ультразвук затухатиме швидше, наприклад, у литих металах, ніж у кованих металах. Властивості матеріалу також можуть мати вплив: сталь зазвичай затухає звук швидше, ніж алюміній, якщо використовуються подібні методи виробництва. Швидкість згасання амплітуди сигналу через затухання зазвичай визначається як експоненціальне згасання, яке є функцією пройденої відстані [17].

Коли звукова хвиля потрапляє на інтерфейс, частина хвилі відбивається від інтерфейсу, а частина звуку проходить через інтерфейс, як показано на рисунку 1.19

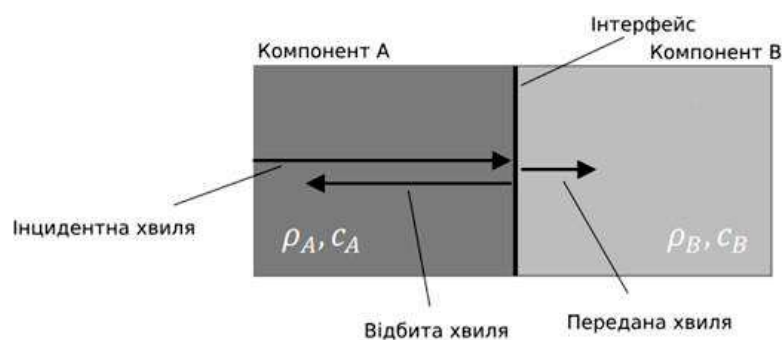


Рисунок 1.19 - Відбиття та проходження звуку на межі розділу [32]

Якщо розглядати ідеально зв'язаний плоский інтерфейс, то частка акустичної хвилі, яка відбивається від інтерфейсу, залежить від акустичного імпедансу

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

матеріалів, що утворюють цей інтерфейс [18]:

$$R = \frac{Z_B - Z_A}{Z_A + Z_B}, \quad (1.3)$$

$$Z = \rho \cdot c, \quad (1.4)$$

де R — це коефіцієнт відбиття, і він має значення від мінус 1 до +1. $R=1$ означає, що вся хвиля відбивається, а $R=0$ означає, що нічого не відбивається. Від'ємне значення вказує на те, що фаза відбитого сигналу буде інвертована. Для інтерфейсу між сталлю та повітря, де $Z_{\text{сталь}} = 4.7 \times 10^7 \text{ кг/м}^2\text{s}$ і $Z_{\text{повітря}} = 0.4 \times 10^3 \text{ кг/м}^2\text{s}$ [19], $R=-0.99998$. Майже вся хвиля відбивається. Таким чином, коефіцієнт відбиття можна отримати експериментально, поділивши амплітуду отриманого відбиття з інтерфейсом (вимірювання) на амплітуду, отриману, коли присутнє лише повітря (довідкове значення), як показано на рисунку 1.20. Рівняння 1.5 впливає з цього [19].

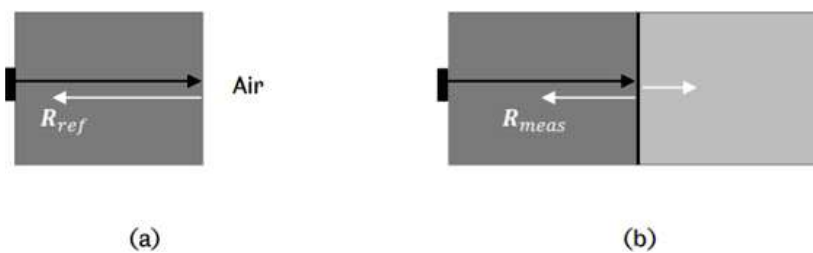


Рисунок 1.20 -Ультразвукове вимірювання (а) без межі та (б) з наявністю межі, що демонструє використання повітря як еталонного середовища [32]

$$[R] = \frac{[R_{meas}]}{[ref]}. \quad (1.5)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рівняння 1.3 не є повністю реалістичним (оскільки, якщо два тіла знаходяться в контакті, вони не будуть ідеально з'єднані, а поверхня межі ніколи не буде повністю рівною), але воно дає достатньо точне наближення. Таттерсолл [20] використав «пружинну модель» для межі, щоб розширити вираз для коефіцієнта відбиття, включивши вплив жорсткості

$$R = \frac{Z_B - Z_A + iw(Z_A - Z_B / k)}{Z_B + Z_A + iw(Z_A - Z_B / k)}. \quad (1.6)$$

Модуль коефіцієнта відбиття за допомогою тригонометрії тоді визначається як:

$$[R] = \sqrt{\frac{(Z_B - Z_A)^2 + (wZ_A - Z_B / k)^2}{(Z_B + Z_A)^2 + (wZ_A - Z_B / k)^2}}. \quad (1.7)$$

Якщо два матеріали, що перебувають у контакті, виготовлені з одного й того ж матеріалу й, відповідно, мають однаковий акустичний імпеданс (що часто спостерігається в підшипниках кочення), тоді (1.8) можна спростити та переписати для визначення жорсткості контакту як функції коефіцієнта відбиття [21]:

$$k = \frac{wz}{2} \sqrt{\frac{1}{[R]^2} - 1}. \quad (1.8)$$

Жорсткість дуже тонкого шару змащувальної речовини визначається наступною залежністю:

$$k = \frac{\rho c^2}{h}. \quad (1.9)$$

Таким чином, об'єднуючи (1.8) або (1.9) з (1.10) та здійснюючи перетворення, товщину мастильного шару можна визначити як функцію коефіцієнта

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбиття [22]:

$$k = \frac{\rho c^2}{wZ_A Z_B} \sqrt{\frac{[R]^2 (Z_A - Z_B)^2 - (Z_A + Z_B)^2}{1 - [R]^2}}. \quad (1.10)$$

Спрощена формула :

$$k = \frac{\rho c^2}{wZ} \sqrt{\frac{[R]^2}{1 - [R]^2}}. \quad (1.11)$$

Об'ємний модуль пружності визначається як:

$$B = \rho \cdot c^2. \quad (1.12)$$

Знання об'ємного модуля пружності мастила ϵ , отже, необхідним для визначення товщини мастильного шару на основі вимірювання коефіцієнта відбиття. Проте відомо, що об'ємний модуль мастила змінюється під тиском. Значення тиску можна оцінити за допомогою розрахунків за Герцем, а значення об'ємного модуля при цих тисках — визначити експериментально або за теоретичними залежностями. Якщо звукові хвилі падають на межу під кутом, вони будуть відбиті або проходити через неї під певним кутом відповідно до закону Снелліуса [23], що можна пояснити за допомогою (1.13) та рисунка 1.21. Звук, що передається в компонент В, заломлюється під кутом, який залежить від кута падіння та властивостей компонентів А і В.

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{C_A}{C_B}. \quad (1.13)$$

Наявність небажаних меж у компоненті, таких як тріщини, можна виявити за допомогою ультразвуку — це й є основа ультразвукових методів неруйнівного

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

контролю (NDT). Місце розташування тріщини можна визначити за часом проходження (ToF) відбитого сигналу, а її розміри та орієнтацію — за допомогою реєстрації відбиттів з кількох точок уздовж довжини тріщини. Подібними методами зміни в часі проходження можна також використовувати для вимірювання прогину та зношування меж [11,24].

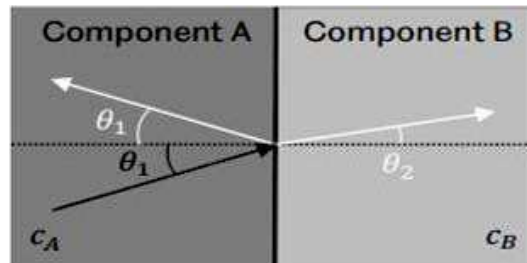


Рисунок 1.21 - Закон Снелла як звукова хвиля відбивається та заломлюється на межі розділу, коли падаюча хвиля не перпендикулярна до інтерфейсу [32]

Фронти хвиль та форма пучка, принцип Гюйгенса стверджує, що будь-який фронт хвилі може бути побудований з великої кількості сферичних хвиль однакової частоти [10]. Це корисно для візуалізації джерел, поширення та відбиття звукових хвиль. Рисунок 1.22 показує, як цей принцип може бути застосований до джерела ультразвукової хвилі для візуалізації форми фронту хвилі. Припускаючи, що перетворювач діє як поршневий генератор, показано п'ять сферичних фронтів хвиль. Результуючий фронт хвилі перед перетворювачем є плоскою хвилею, тоді як на краю перетворювача утворюється кільцеподібний фронт хвилі.

Принцип Гюйгенса також може бути застосований до відбитого звуку, де кожна точка на фронті хвилі, яка потрапляє на інтерфейс, також діє як сферичний випромінювач. Це візуалізовано на рисунку 1.23 [25].

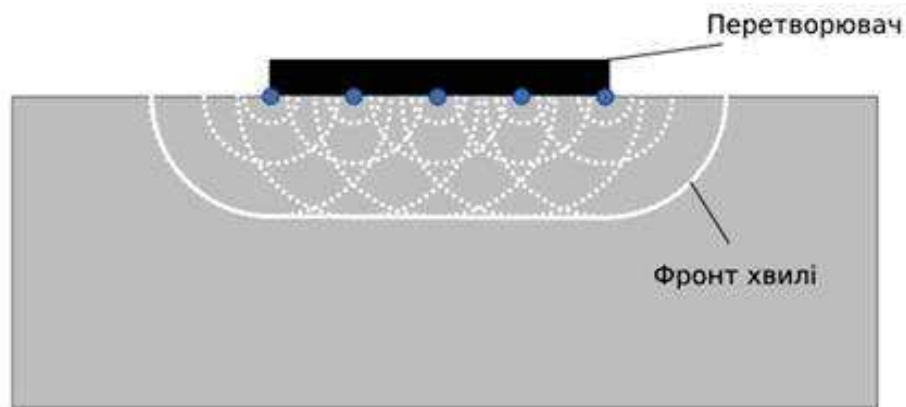


Рисунок 1.22 - Візуалізація джерела хвилі за допомогою принципу Гюйгенса [32]

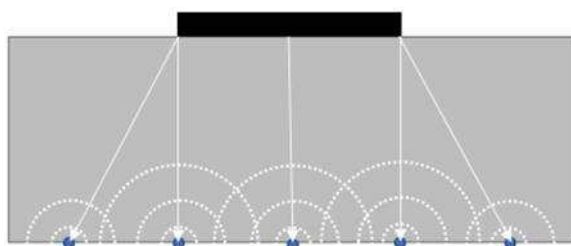


Рисунок 1.23 - Візуалізація відбитої хвилі за допомогою принципу Гюйгенса [32]

Принцип Гюйгенса описує, як звукове поле поширюється від джерела, але не описує, наскільки сильною стає збудження в даній точці поля. Перерізи поля тиску, що виникають від ідеального осцилятора, можна побачити на рисунку 1.24 .

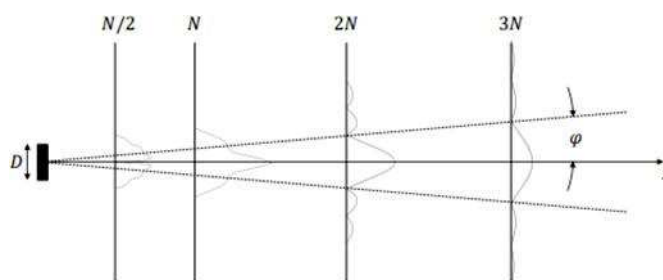


Рисунок 1.24 - Поперечні перерізи розподілу звукового тиску для кругового осцилятора [10]

Щоб повністю пояснити рисунок 1.24, необхідно ввести поняття відстані ближнього поля [10]:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

$$N = d \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (1.14)$$

де d дорівнює 1 для кругових осциляторів або залежить від співвідношення довжин сторін для прямокутних осциляторів, а D — це довжина більшої сторони. Значення для d для різних співвідношень довжин сторін [10].

Ближнє поле — це звукове поле до довжини ближнього поля і має досить складну структуру через конструктивну та деструктивну інтерференцію хвиль від осцилятора. Вимірювання в цьому діапазоні можуть бути проблематичними і їх слід уникати, де це можливо [25]. На довжині ближнього поля існує єдиний максимум тиску, після якого утворюється простіше поле: дальнє поле. У дальньому полі амплітуда тиску поступово зменшується, оскільки пучок розходиться. Кут розходження показано на рисунку 1.24 [10].

Кут розходження для кругових осциляторів можна розрахувати за формулою:

$$\sin(\varphi_0) = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (1.15)$$

Для прямокутних осциляторів існує два кути розходження пучка, по одному для кожної орієнтації перетворювача [10]. У кожному випадку використовується ширина осцилятора в кожній площині. Ширину пучка можна знайти за допомогою простої тригонометрії:

$$w = 2L \cdot \tan(\varphi_0), \quad (1.16)$$

де L — це відстань від джерела.

Ці рівняння дійсні лише тоді, коли D набагато більша за λ . Зменшення співвідношення $\frac{D}{\lambda}$ призводить до того, що кут розходження наближається до 90° , і $\frac{D}{\lambda}$ поле тиску стає майже сферичним [10].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Вимірювальні системи типові ультразвукові системи включають один або кілька перетворювачів, ультразвуковий імпульсний приймач (UPR), цифровий перетворювач, персональний комп'ютер та кабелі для з'єднання всіх цих компонентів. Усі ці елементи описано детальніше в наступних підрозділах. Схема типового ультразвукового пристрою в режимі імпульс-ехо може бути представлена на рисунку 1.25 Режим імпульс-ехо — це режим, в якому один і той же перетворювач випромінює та приймає ультразвукові хвилі. У режимі імпульс-прийом (також відомому як режим pitch-catch) інший перетворювач приймає ультразвукові хвилі, які випромінює перший перетворювач [32].

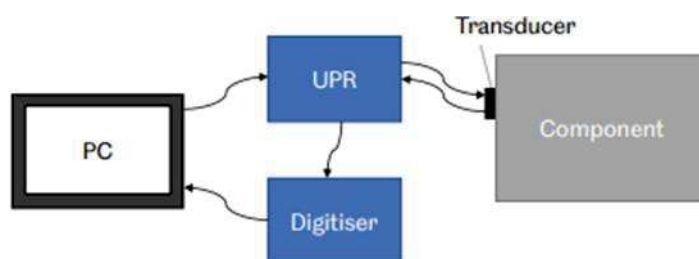


Рисунок 1.25 - Схема ультразвукової системи — конфігурація імпульс-ехо [32]

Перетворювачі

Ультразвуковий перетворювач перетворює електричні сигнали в звукові хвилі і навпаки. Перетворювачі, що використовуються в цій роботі, функціонують завдяки п'єзоелектричному ефекту [26]. Ці типи перетворювачів мають температуру Кюрі [27], і якщо ця температура перевищена, вони більше не функціонуватимуть, навіть якщо температура знову опуститься нижче цього порогу. Для матеріалів PZT температура Кюрі становить близько 300 °С, але може значно варіюватися залежно від складу [32].

Перетворювачі зазвичай складаються з п'єзоелектричного матеріалу, розташованого між двома електродами. Застосування коливної напруги між заземленим і активним (або позитивним і негативним) електродами дозволяє збуджувати перетворювач, змушуючи його вібрувати. Зовнішні вібрації, які змушують

перетворювач вібрувати, перетворюються в електричний сигнал [32].

Деякі перетворювачі мають "обгортальні" електроди, які дозволяють приєднувати кабелі до однієї сторони перетворювача, але це зменшує активну площу. Стандартні перетворювачі можуть бути заземлені через електропровідні компоненти [32].

Ультразвукові зонди в неруйнівному контролі (NDT) часто використовуються ультразвукові зонди, які передають звукові хвилі в компонент. Зонд складається з перетворювача, який містить демпфуючий матеріал у захисному корпусі. Демпфер зменшує коливання, забезпечуючи короткий сигнал з широкою смугою частот [32].

Частота перетворювача залежить від його товщини [25]. Наприклад, перетворювач на частоті 10 МГц має товщину близько 0.2 мм, а його мінімальний розмір повинен бути не менше 0.6 мм, тобто втричі більшим. Зменшення розміру перетворювача призводить до небажаних ефектів і втрати ефективності. З іншого боку, більший перетворювач забезпечує сильніший сигнал і краще співвідношення сигнал/шум (SNR). Враховують розповсюдження пучка перетворювача. Вимірювальна площа зв'язаного перетворювача раніше описувалася як площа ультразвукового перетворювача, де вимірювана поверхня паралельна поверхні перетворювача Рисунок 1.26 допомагає пояснити це міркування. У конфігурації імпульс-ехо звук, який випромінюється перпендикулярно до поверхні, відбивається прямо назад до датчика і виявляється. Звук, який випромінюється з країв перетворювача, потрапляє на вимірювану поверхню і відбивається від перетворювача відповідно до закону Снелла [17].

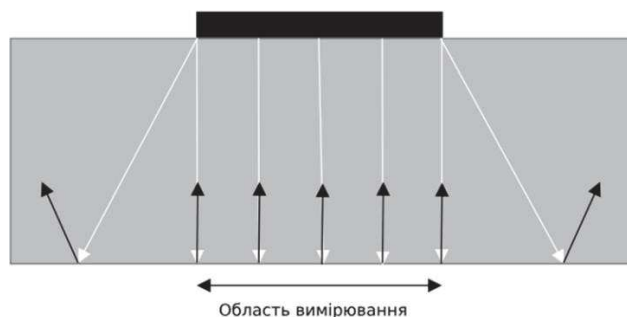


Рисунок 1.26 - Вимірювальна площа перетворювача [32]

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вимірювана перетворювачем, ймовірно, буде ближчою до розміру плями. Для неруйнівного перетворювача площу, що вимірюється, можна наближено розрахувати за допомогою рівнянь 1.7 [30]. Вимірювання фронт хвилі датчика розміром 1.5×7 мм, прикріпленого до доріжки підшипника використовуючи систему крокових двигунів та ультразвуковий зонд. Результати на рисунку 1.27 показують ширину пучка 3,8 мм при -6 дБ і приблизно 5 мм ширину пучка до першого мінімуму. Розрахунки ширини пучка для цього розміру датчика вказують на те, що ширина пучка повинна бути 9.7 мм при -6 дБ і 16.9 мм на першому мінімумі. З огляду на те, що розмір датчика наближається до довжини хвилі ультразвуку (0.6 мм), можна очікувати, що це розповсюдження пучка буде ще більше збільшено, ніж передбачають ці рівняння [32].

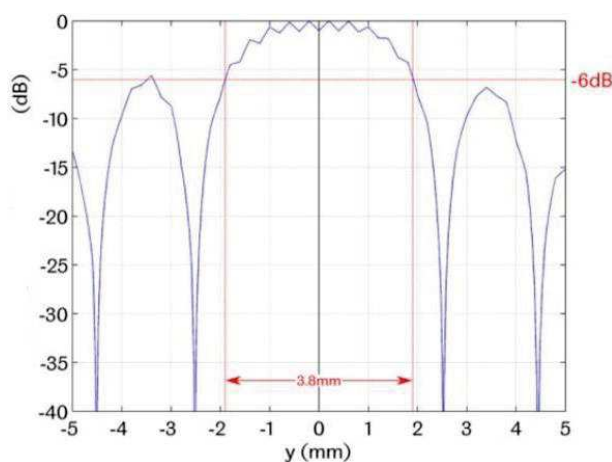


Рисунок 1.27 - Приклад вимірювання фронту хвилі перетворювача [32]

Поширення ультразвуку в твердих тілах

Жорсткість зв'язків між частинками і, як наслідок, механічні властивості матеріалу впливають на швидкість звуку в середовищі. Наявність сторонніх частинок у матеріалі, наприклад, повітряних включень у кераміці, також впливає на швидкість звуку, і тому вже століттями використовується метод постукування по порцеляні для оцінки її структурної цілісності [31].

Швидкість звуку, однак, не залежить від частоти і, отже, не має дисперсії. Це дійсно лише для звукових хвиль, що поширюються через однорідні матеріали. Акустична дисперсія — це явище, при якому звукова хвиля розпадається на свої

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

складові частоти при проходженні через матеріал . Ці розділені хвилі різних складових частот мали б різну швидкість звуку. Тріскання крижаних плит описує це явище, коли високочастотні компоненти звуку передаються швидше через лід і, таким чином, досягають слухача першими, а потім йдуть більш низькі частоти після деякої затримки [31].

Швидкість звуку для поздовжніх C_L , і поперечних хвиль C_T , що поширюються в твердих тілах, може бути визначена за допомогою наступних рівнянь, де E — модуль пружності, ν — коефіцієнт Пуассона, ρ — щільність матеріалу, а G — модуль зсуву [31].

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-\nu)}}. \quad (1.18)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (1.19)$$

Коефіцієнт Пуассона та модуль пружності сталі становлять приблизно 0,28 та 210 ГПа відповідно. Співвідношення поперечної та поздовжньої швидкостей може бути визначено за допомогою рівняння (1.20), і воно зазвичай становить близько 0,55 для сталі. Таким чином, швидкість поперечної хвилі в сталі приблизно вдвічі менша за швидкість поздовжньої хвилі [31].

$$\frac{C_T}{C_L} = \sqrt{\frac{1-\nu}{2(1+\nu)}}. \quad (1.20)$$

Зазвичай швидкість звуку в матеріалі визначається шляхом вимірювання часу проходження ультразвукової хвилі через матеріал відомої товщини. Для підшипникової сталі швидкість поздовжньої хвилі становить близько 5900 м/с, тоді як швидкість зсувної хвилі становить близько 3400 м/с [31].

Крім властивостей матеріалу, швидкість звуку в матеріалі також впливає температура та напруга (акустоеластичний ефект). Швидкість звуку зменшується з

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурою, в середньому приблизно на 1 м/с на градус до 1200 °С [31].

Вплив напруги на швидкість звуку є більш складним, оскільки він залежить від напрямку прикладеної напруги та типу хвилі, що поширюється через поле напруги. Поздовжня хвиля, що поширюється паралельно стискаючій нарузі, збільшить швидкість звуку, тоді як розтягуюча напруга зменшить швидкість звуку [31].

Висновки до першого розділу

Аналіз показав, що асинхронні електродвигуни (АЕД) становлять понад 75 % усіх споживаних у промисловості електроприводів і є критично важливою складовою технологічних процесів, ушкодження підшипників, дефекти ротора чи статора часто призводять до зупинок виробництва і значних фінансових втрат через аварії та простій обладнання .

Головною метою розробки стенда створення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для діагностики АЕД із використанням спектрально-ультразвукових методів, що дозволяє вчасно виявляти дефекти, підвищувати надійність електроприводів та знижувати витрати на їхнє обслуговування . Запропонована технічне рішення забезпечить оперативне виявлення потенційних несправностей, сприяючи безперебійній роботі промислових систем, підвищенню надійності обладнання та зниженню витрат на технічне обслуговування і ремонт .

Реалізація системи діагностування стикнеться з технічними викликами: необхідністю точного моделювання фізичних процесів для коректних даних алгоритмів і складнощами інтеграції рішень у реальне виробниче середовище .

Для побудови стенда обрана платформа Siemens SIMATIC S7-1200 завдяки її високій продуктивності, надійності, компактності, вбудованим засобам збору й обробки даних, широкому спектру комунікаційних інтерфейсів та доступній вартості, що робить її оптимальним вибором як для студентського прототипу, так і для промислових застосувань .

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1 Розробка структурної схеми стенду діагностування підшипників асинхронного двигуна

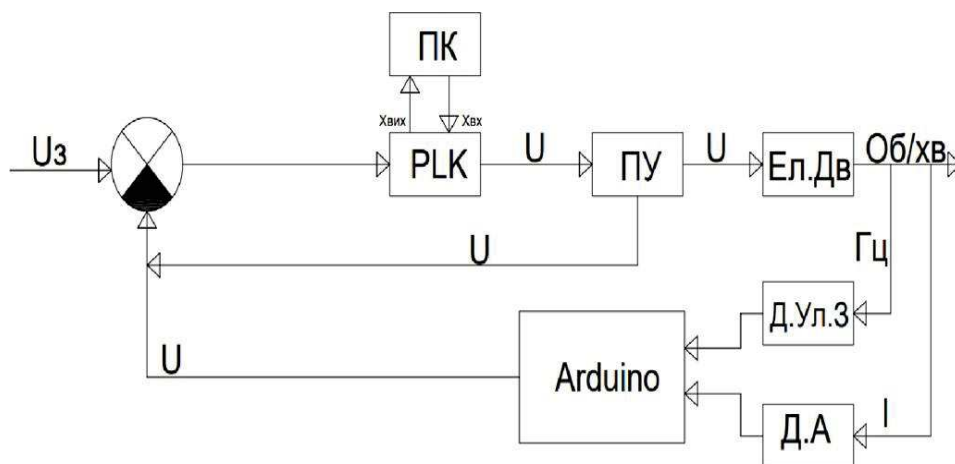


Рисунок 2.1- Структурна схема стенду для дослідження підшипників АЕД на струм, ультразвук

PLC (Програмований Логічний Контролер) відповідає за основне управління системою. Він містить елементи: ПЕ (Перетворювальний елемент), який зчитує дані з сенсорів; КЕ (Керуючий елемент) порівнює показники від сенсорів із заданими параметрами; РЕ (Регулювальний елемент) коригує вихідні сигнали для управління; Порівнювальний елемент порівнює фактичні дані з контрольними параметрами для активації виконавчих дій. PLC взаємодіє з пускачем і інвертором для контролю роботи двигуна.

Arduino Uno виконує допоміжний контроль, отримуючи сигнали від сенсорів (вібраційний і ультразвуковий сенсори) для додаткового моніторингу. Він містить ПЕ для отримання даних від сенсорів; ВЕ (Вимірювальний елемент) для вимірювання вібрації та ультразвуку; КПЕ (Контрольний перетворювальний елемент) для обробки зібраних даних і формування контрольного сигналу; Порівнювальний елемент порівнює отримані дані з контрольними параметрами. Arduino Uno передає дані до PLC для остаточного контролю роботи двигуна.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Пускач (Контактор) виконує включення та вимкнення асинхронного двигуна, замикаючи або розмикаючи силову лінію за сигналом від PLC.

АЕД є виконавчим елементом, який обертається за рахунок електричного струму і виконує механічну роботу. Його робота контролюється через пускач, що керує живленням двигуна.

Інвертор (Перетворювач змінного струму в постійний) перетворює змінний струм на постійний для живлення Arduino Uno та інших компонентів. Він забезпечує стабільне живлення елементів управління та моніторингу.

Взаємодія елементів виглядає наступним чином: PLC отримує дані з сенсорів, підключених до Arduino Uno, які контролюють вібрацію та ультразвук. На основі цих даних PLC вирішує, чи потрібно вмикати або вимикати двигун через пускач. Arduino Uno виступає як допоміжний контролер, який передає попередньо оброблені дані до PLC, дозволяючи основному контролеру приймати остаточні рішення. Інвертор забезпечує безперервне живлення для Arduino Uno, а PLC працює від основної мережі.

2.2 Розробка електричної принципової схеми стенда для діагностування підшипників асинхронного двигуна

Електрична принципова схема складається з силової частини, СК, джерел живлення, модулів обробки сигналів і засобів передачі даних. Робота системи відбувається в чіткій послідовності, яка забезпечує безпечне увімкнення, точний моніторинг і аварійне вимкнення при потребі.

На вході системи встановлено триполюсний автомат, через який на стенд подається трифазна напруга 380 В. Далі вона надходить до магнітного пускача, котушка якого керується напругою 24 В. Після замикання пускача трифазна напруга подається на АЕД — об'єкт дослідження.

Паралельно з силовою частиною функціонує система живлення для низьковольтної електроніки. Від однієї з фаз через вставний резистор струм надходить на автоматичний вимикач Q5, після чого потрапляє на блок живлення 220 В → 24 В.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Блок формує стабільну постійну напругу 24 В для живлення програмованого логічного контролера (PLC), керування котушкою пускача, плати Arduino та іншої логіки.

У схемі передбачено окрему розвилку для підключення комп'ютера (ПК) та системи резервного живлення — АВР, інвертора та акумуляторів. У разі знеструмлення основної мережі АВР миттєво перемикає живлення керуючої частини на акумулятори, а конденсатори на виході блоку живлення згладжують перехідні процеси.

Після подачі живлення PLC проходить ініціалізацію: перевіряє аварійні сигнали, стан входів, отримує первинні дані від Arduino.

Після завершення первинної ініціалізації та стабілізації живлення, датчики тимчасово не зчитує параметри з об'єкта дослідження. Якщо всі вхідні сигнали перебувають у межах норми, PLC активує вихід керування пускачем і система переходить у режим моніторингу.

Основна особливість роботи Arduino полягає в тому, що для зчитування сигналів від ультразвукових датчика (частотою 1–5 МГц) використання PLC для прямого зчитування сигналів є недоцільним через його обмеження за частотою опитування.

Навіть у разі застосування підсилювача типу AD620, що збільшує амплітуду сигналу, сама частота сигналу залишається занадто високою — у межах сотень кілогерц або мегагерців.

Типовий PLC має частоту опитування аналогових входів від 1 до 10 кГц, тому не здатен адекватно сприймати такі високочастотні імпульси. Натомість Arduino може компіювати сигнал із частотою до 1 МГц, виконувати цифрову фільтрацію, виявлення піків, обчислення амплітуд, затримок, середніх значень. Оброблені результати у вигляді цифрових або усереднених аналогових значень Arduino передає в PLC для подальшої обробки.

Таким чином, Arduino працює як попередній процесор і аналоговий осцилограф. Воно зчитує сигнали з ультразвукового сенсора і датчика струму, відображає їх на своєму LCD-дисплеї, а також передає через PROFINET до PLC.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PLC приймає оброблені сигнали та передає їх далі на ПК за протоколом PROFINET, де оператор може бачити стан системи.

У разі перевищення струму або появи аномальних частоти PLC автоматично знімає сигнал керування з пускача, двигун відключається, а на дисплеї з'являється повідомлення про аварію. Усі події реєструються й можуть бути переглянуті або передані на сервер.

Якщо під час роботи зникає основне живлення, система резервного живлення миттєво підтримує 24 В для PLC і Arduino. Конденсатори згладжують провали, забезпечуючи стабільну напругу на час перемикавання. Це дозволяє уникнути перезавантаження логіки та втрати даних.

Завершення роботи станда відбувається після зупинки двигуна за командою PLC або оператора, після чого живлення знімається, а вся інформація зберігається для подальшого аналізу.

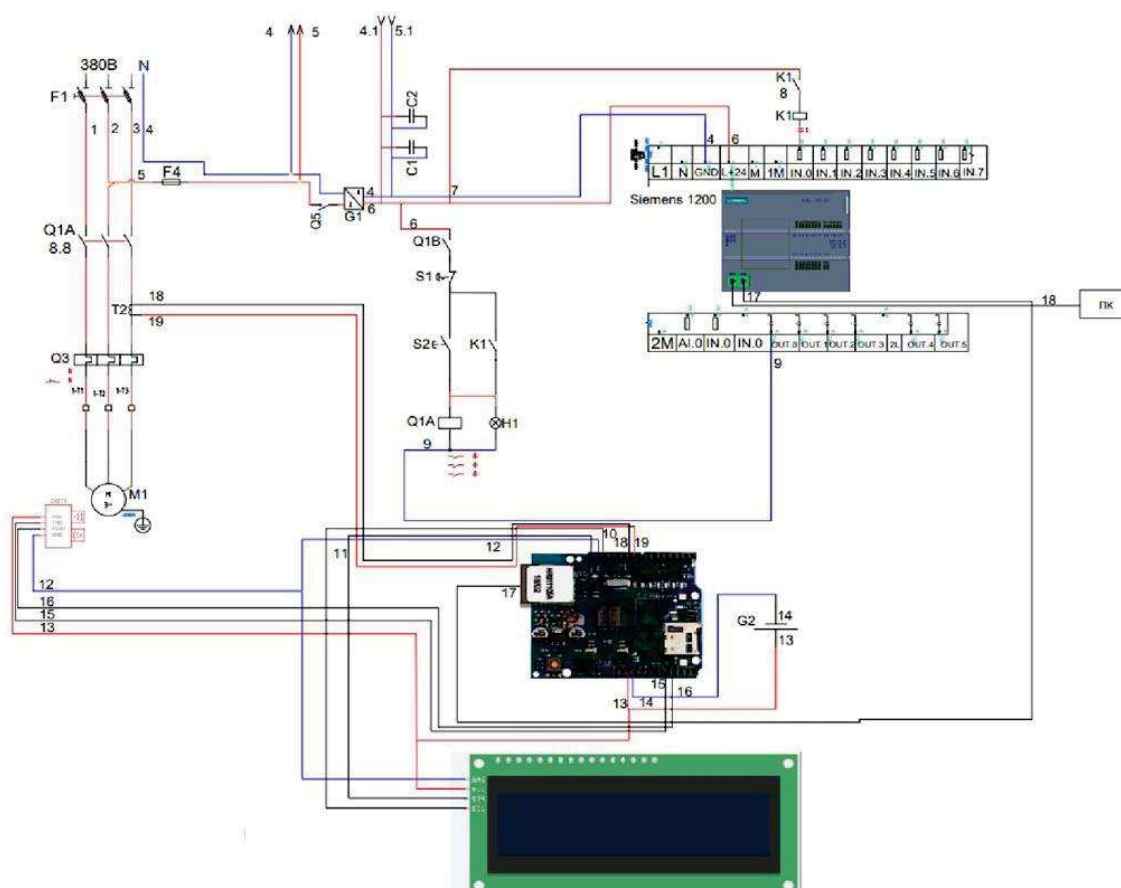


Рисунок 2.2 - Електрична принципова схема стану для діагностування підшипників АЕД

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Розробка електричної принципової схеми для Arduino Uno

Компоненти схеми: Arduino Uno основний контролер для обробки сигналів.
Живиться через USB-порт або роз'єм для зовнішнього джерела живлення.
Ультразвуковий датчик використовується для вимірювання звуків на малих частотах

Має чотири основні піни:

- VCC подача живлення (5В від Arduino);
- GND Заземлення;
- Trig вхідний сигнал (ініціалізація ультразвукового імпульсу);
- Echo вихідний сигнал (вимірювання ультразвуком через сталь).

ПК-дисплей (LCD) з підключенням через I2C-адаптер для спрощення підключення.

Основні піни:

- VCC подача живлення (5В від Arduino);
- GND заземлення;
- SDA лінія даних I2C;
- SCL лінія синхронізації I2C;

Принцип роботи:

Arduino подає сигнал на пін Trig ультразвукового датчика, щоб ініціювати випромінювання звукового імпульсу.

Ультразвуковий датчик через пін Echo вимірювання ультразвуком через сталь та обчислює звукові сигнали на низьких частотах.

Arduino зчитує звуки в об'єкті які не характерні не для нього на основі отриманого часу.

Результат виводиться на ПК-дисплей через інтерфейс I2C.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

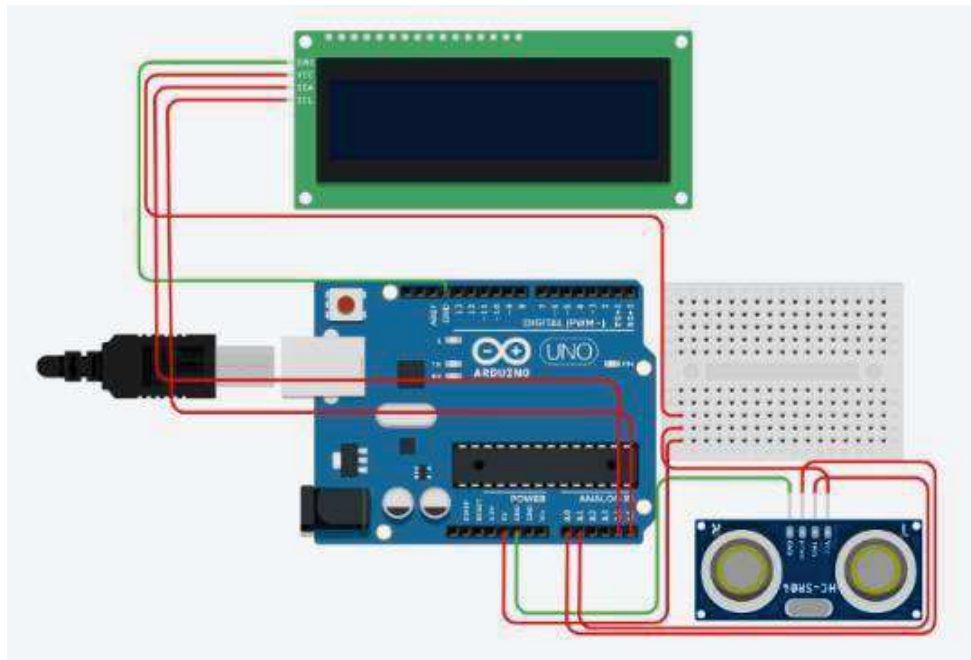


Рисунок 2.3 - Електрична принципова схема Arduino Uno

Програмний код наведено в Додатку А.

Опис коду

У самому початку підключаються необхідні бібліотеки `Wire.h` для роботи I²C-шини, `Adafruit_GFX.h` і `Adafruit_SSD1306.h` для керування OLED-дисплеєм на контролері SSD1306, а також `ArduinoFFT.h` для обчислення швидкого перетворення Фур'є (FFT).

Задаються константи розміри екрану (128×64 пікселів) і вказівка, що лінія RESET дисплея не використовується (`OLED_RESET_PIN = -1`), номер каналу ADC для ультразвукового давача (`ULTRASOUND_ADC_PIN = 34`) та для давача струму ACS712 (`CURRENT_ADC_PIN = 35`).

Для FFT визначено 256 зразків (ступінь двійки) і частоту дискретизації 1 000 000 Hz (1 МГц), яка є максимальною для ADC ESP32.

Параметри давача ACS712 — чутливість 0.066 В/А (модуль на 30 А) і опорна напруга АЦП 3.3 V.

Створюються глобальні об'єкти: `display` для OLED, `fft` для виконання FFT, масиви `vReal` і `vImag` довжиною 256 для зберігання даних, а також змінна `acsOffsetVoltage` для зсуву “нуля” струмового датчика.

У функції `setup()` відбувається ініціалізація серійного порту на швидкості

										Арк.
										43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 25.00.00.000 ПЗ					

115200 бод і запуск I²C-шини.

Якщо OLED-дисплей не відповідає на адресу 0x3C, код виводить повідомлення про помилку й зупиняється в нескінченному циклі. Інакше на екрані з'являється повідомлення “Калібрування...”, після чого виконується функція `calibrateCurrentSensor()`: вона читає 500 вимірів з входу давача струму, усереднює їх і перераховує в напругу — це значення зберігається як `acsOffsetVoltage`, щоб потім віднімати внутрішню похибку ADC при нульовому струмі. Через секунду після калібрування переходимо до основного циклу.

У `loop()` двома викликами допоміжних функцій отримуємо пікову частоту ультразвукового сигналу та миттєве значення струму. Спочатку `performFFT()` обчислює інтервал між вимірами 1 μ s (відповідно до 1 МГц), читає 256 значень з `ULTRASOUND_ADC_PIN`, заповнює масив реальних частин `vReal`, обнуляє уявні `vImag` і затримується між зчитуваннями за допомогою `delayMicroseconds(1)`. Потім накладається вікно Геммінга, виконується FFT, перетворюється комплексний спектр в амплітудний, після чого знаходиться індекс максимального результату (ігноруючи нульовий бін).

Функція `fft.majorPeak(...)` повертає частоту піка в герцах. Другий виклик — `readCurrent()` — читає сире значення ADC, перетворює його в напругу, віднімає `acsOffsetVoltage` і ділить на чутливість модуля (0.066 В/А), отримуючи струм в амперах.

Після обчислень дисплей очищується, і на його верхньому рядку виводиться рядок “Freq: X.X Hz” з одним десятковим знаком, а на другому — “Current: Y.YY A” з двома знаками. Такі ж дані одразу ж виводяться в серійний монітор через `Serial.printf()`. Наприкінці циклу стоїть затримка 500 мс, щоб обмежити частоту оновлення.

Таким чином, код забезпечує безперервний збір ультразвукових даних з частотою 1 МГц, обчислення спектральних характеристик за допомогою FFT і одночасне вимірювання струму, відображаючи результати як на OLED-дисплеї, так і в серійному моніторі.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

2.3 Підключення до Arduino Uno до PLC

Реалізація передавання аналогових даних із сенсора через Arduino Uno до програмованого логічного контролера (ПЛК) за протоколом Modbus TCP. Для цього потрібно сенсор під'єднати до аналогового входу A0 плати Arduino, а мережевий інтерфейс забезпечено Ethernet-шилдом W5500 або ENC28J60, що сполучається з портами SPI піни 10–13.

Живлення системи здійснюється через USB або зовнішній адаптер 9–12 В, а зв'язок із PLC організовано в локальній мережі через комутатор чи маршрутизатор.

Програмна частина на Arduino реалізується із застосуванням бібліотек Ethernet або UIPEthernet для ENC28J60 та ModbusIP. Статичні MAC- та IP-адреси 0xDE:0xAD:0xBE:0xEF:0xFE:0xED і 192.168.2.120 конфігуруються в методі setup().

За допомогою mb.addHreg SENSOR_REG створюється Holding-регістр із початковим номером 100, який відповідає регістру 40101 у традиційній схемі Modbus. Основний цикл loop() виконує обробку вхідних запитів від ПЛК і, кожні 2000 мс, зчитує значення з A0, записує його у віртуальний регістр mb.Hreg(SENSOR_REG, sensorValue) та виводить у серійний монітор для відлагодження.

Код програми наведено в Додатку Б.

Опис роботи коду для Arduino Uno

Код реалізує роботу мікроконтролера Arduino як Modbus TCP сервер, що передає аналогові дані з сенсора у мережу Ethernet для подальшого зчитування іншим пристроєм SCADA-системою або PLC, який працює як Modbus Master.

Для реалізації цього функціоналу використовуються бібліотеки Ethernet.h та ModbusIP.h. Бібліотека Ethernet.h забезпечує з'єднання Arduino з локальною мережею за допомогою Ethernet-шилда, а ModbusIP.h реалізує протокол Modbus TCP.

На початку оголошуються такі змінні:

- SENSOR_REG — номер Modbus-регістру, в який буде записуватись значення з сенсора (в даному випадку регістр з адресою 100).

- sensorPin — аналоговий вхід A0, до якого підключений сенсор.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- mb — об'єкт класу ModbusIP, який буде обробляти Modbus TCP-запити.

- ts — таймер для періодичного зчитування даних з сенсора.

У функції setup() відбувається ініціалізація:

- Запускається серійний порт для виведення даних на монітор порту.

- Встановлюється MAC-адреса і IP-адреса Ethernet-пристрою. У прикладі MAC: DE:AD:BE:EF:FE:ED, IP: 192.168.2.120.

- Використовуючи функції Ethernet.begin() та mb.config(), мікроконтролер підключається до мережі та налаштовується як Modbus TCP-сервер.

- Додається один Modbus Holding-регістр з адресою 100, який буде використовуватись для передачі даних з сенсора.

- Фіксується поточний час у змінну ts, щоб відраховувати інтервали між зчитуваннями.

У функції loop() реалізується основна логіка програми:

- Функція mb.task() постійно перевіряє наявність запитів від Modbus Master-пристроїв це обов'язковий виклик для обробки TCP-з'єднань.

Далі перевіряється, чи пройшло більше 2 секунд з моменту останнього зчитування сенсора. Якщо так, то:

- Поточний час оновлюється в ts.

- Зчитується аналогове значення з порту A0 (в діапазоні 0–1023).

- Це значення записується у Modbus Holding-регістр з адресою 100 за допомогою функції mb.Hreg().

- Потім це значення виводиться у серійний порт через Serial.println() для локального моніторингу.

Arduino Uno постійно оновлює одне значення сенсора кожні 2 секунди і робить його доступним у вигляді Modbus Holding-регістру. Це дозволяє будь-якому Modbus TCP Master з відповідним ПЗ підключитися до Arduino і зчитувати сенсорні дані через локальну мережу.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

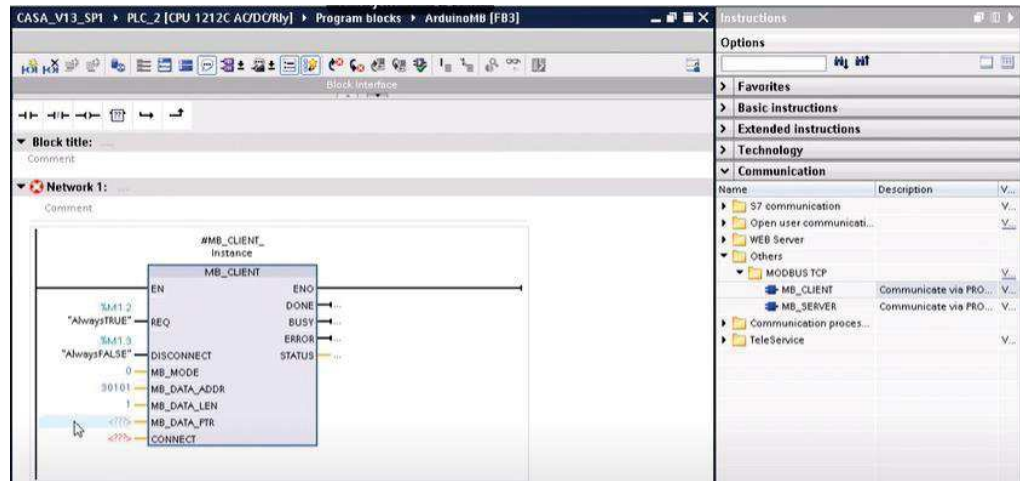


Рисунок 2.4 – Налаштування підключення блоку MB_CLIENT [33]

На PLC у TIA Portal використовується блок MB_CLIENT, який додається через розділ Communication → MODBUS TCP.

У блоці налаштовуються параметри: EN активація, MB_MODE режим читання/запису, MB_DATA_ADDR адреса регістру, MB_DATA_LEN кількість регістрів, MB_DATA_PTR вказівник на буфер даних у ПЛК як приклад %MW202 та CONNECT параметри підключення, такі як IP-адреса Arduino та порт 502.

Блок MB_CLIENT періодично запитує дані з Arduino та зберігає їх у вказаному буфері. Для стабільної роботи також налаштовується обробка помилок Error, Status та перевірка стану з'єднання Busy, Done.

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible	Visible in	Setpoint
Static							
Arduino_1	Struct						
Configuration	TCOON_IP_v4						
InterfaceId	HW_ANY		16#0				
ID	CONN_OUC		16#0				
ConnectionType	Byte		16#0B				
ActiveEstablis...	Bool		false				
RemoteAddress	IP_V4						
RemotePort	UInt		0				
LocalPort	UInt		0				
<Add new>							
<Add new>							

Рисунок 2.5 - Структура параметрів з'єднань [33]

Структура, Arduino_1, яка містить набір ключових полів, що забезпечують

коректне підключення до віддаленого пристрою в даному випадку — Arduino з Ethernet-шилдом.

Структура Arduino_1 має наступні елементи:

- Configuration TCON_IP_v4 це поле визначає базову конфігурацію IP-з'єднання, зокрема тип з'єднання (TCP/IP), формат адресації (IPv4), а також загальні параметри, пов'язані з протоколом. Встановлюється типове TCP-з'єднання для обміну даними через Ethernet.

- InterfaceID (HW_ANY) вказує, який фізичний мережевий інтерфейс буде використано на ПЛК. Значення 16#0 (тобто HW_ANY) означає, що може використовуватись будь-який доступний Ethernet-інтерфейс контролера. Це спрощує налаштування, оскільки система автоматично вибирає доступний порт.

- ID (CONN_OUC) Ідентифікатор з'єднання, що використовується для моніторингу або логічного розмежування кількох з'єднань. Значення 16#0 означає, що конкретний ідентифікатор не використовується.

- ConnectionType (Byte) тип з'єднання для Modbus TCP прийнято використовувати значення 16#0B, яке відповідає клієнтському TCP-з'єднанню.

- ActiveEstablished (Bool) логічний параметр, що визначає режим ініціалізації з'єднання, якщо значення встановлено в True , ПЛК самостійно ініціює з'єднання при старті програми.

- RemoteAddress (IP_v4) IP-адреса пристрою, до якого здійснюється підключення до Arduino, це фіксована адреса, наприклад 192.168.2.120, задана у скетчі Arduino через функцію Ethernet.begin().

- RemotePort (UInt) порт, на якому Arduino очікує з'єднання по протоколу Modbus TCP стандартне значення порту 502, що є загальноприйнятим у Modbus TCP.

- LocalPort (UInt) Локальний порт PLC, який може бути використаний для вихідного з'єднання. Якщо вказати 0, система самостійно вибере вільний порт для комунікації.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

2.4 Розробка системи АВР для керування PLC

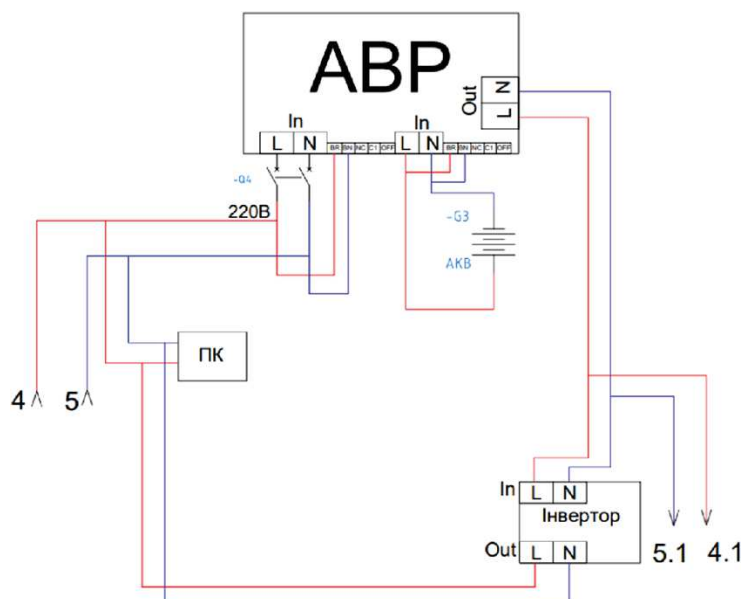


Рисунок 2.6 - Електрична схема АВР резервне живлення

По проводах 4 і 5 безпосередньо з розподільного щита надходить мережна напруга 220 В, яка через автоматичний вимикач Q4 подається на живлення комп'ютера та системи керування. У нормальних умовах Q4 перебуває в положенні «вимкнено». При роботі забезпечує прямий шлях струму та захищаючи лінію від перевантажень і коротких замикань.

Як тільки напруга з мережі зникає нижче встановленого порогу або зникає зовсім, модуль автоматичного введення резерву АВР входить у положення «включення» з затримкою 0,1–1 с, щоб уникнути багатократних перемикань за коротких перебоїв.

Після цього той самий модуль АВР подає команду на включення резервного ланцюга: напруга від акумуляторного блоку АКБ через інвертор стає єдиним джерелом живлення. Інвертор перетворює постійні 24В або іншу номінальну напругу АКБ у стабільні 220 В змінного струму, забезпечуючи безперервну роботу комп'ютера під час тривалих аварійних відключень мережі.

Акумулятори розраховані на 24 години автономної роботи, що дає достатньо часу для відновлення живлення або виконання планових вимкнень.

Вихідні дроти від інвертора підключаються до тих самих магістралей 4 і 5, а

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

далі розгалужуються на клеми 4.1 і 5.1, які живлять PLC та частину управління асинхронним двигуном. PLC контролює стан заряду АКБ за допомогою вбудованих аналогових входів. За потреби — наприклад, при досягненні мінімального порогу заряду — PLC подає сигнал тривоги.

При відновленні стабільного мережного живлення АВР автоматично відсікає інвертор й переключає на живлення на основне джерело, одночасно направляючи інвертор у режим підзарядки АКБ і технічного обслуговування.

Енергозабезпечення основні формули для розрахунку

Визначення потужності СК і живлення ПК:

$$U \cdot I = P. \quad (2.1)$$

Визначення необхідної енергії батареї для забезпечення роботи СК на 24 години:

$$E_{(\epsilon\text{мніть})} = P \cdot T_{\text{час}}. \quad (2.2)$$

Розрахунок на втрати на інверторі і внутрішньому опорі акумулятора із запасом в 20%:

$$E_{(\text{ен.втратах})} = \frac{E_{\epsilon\text{мніть}}}{\eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{batt}}}, \quad (2.3)$$

де $\eta_{\text{інв}}$ - коефіцієнт втрат на інверторі 0,9; η_{batt} - коефіцієнт втрат на акумуляторах 0,9.

Визначення ємності 24В акумулятора в Ампер·годинах :

$$Q = \frac{E}{U}. \quad (2.4)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначення енергії супер конденсаторів для стабілізації живлення під час перемикання АВР:

$$E = P \cdot \Delta t, \quad (2.5)$$

де P - потужність керування; t - час перемикання 1-2с.

Визначення величини ємності конденсатора:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \rightarrow C = \frac{2E}{U^2}. \quad (2.6)$$

Визначення необхідної кількості конденсаторів, щоб отримати 24В для СК:

$$N = \frac{U}{E}. \quad (2.7)$$

Визначення загальної ємності батареї конденсаторів:

$$C_{cell} = E \cdot N. \quad (2.8)$$

Рекомендації щодо використання балансувальних резисторів у банках супер конденсаторів.

Під час з'єднання супер конденсаторів у серію для досягнення вищої напруги (наприклад, 24 В), обов'язково слід встановлювати балансувальні резистори.

Їх головна мета — вирівнювати напругу на кожній банці, оскільки через відмінності у внутрішньому опорі (ESR) та залишковій ємності напруга на окремих елементах може розподілятися нерівномірно. Це призводить до того, що одна з банок може перевищити свій номінальний рівень (наприклад, 2.7 В), що викликає її деградацію або навіть пошкодження.

Щоб запобігти цьому, паралельно до кожної банки підключається резистор,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який створює невеликий витік струму і компенсує нерівномірності в розподілі заряду. Це дозволяє вирівняти напругу по всіх банках і забезпечити стабільну та безпечну роботу усього модуля.

Рекомендовані параметри резисторів:

- номінал 10–15 кОм;
- потужність 0.25–0.5 Вт;
- тип стабільні металоплівкові;
- точність не гірше $\pm 5\%$.

Балансувальні резистори встановлюються паралельно кожному суперконденсатору, тобто якщо в серії 9 банок, то має бути 9 резисторів. Це пасивне балансування є простим і надійним методом для захисту елементів.

2.5 Розробка коду для відстеження зношення підшипників АД в програмному середовищі TIA Portal

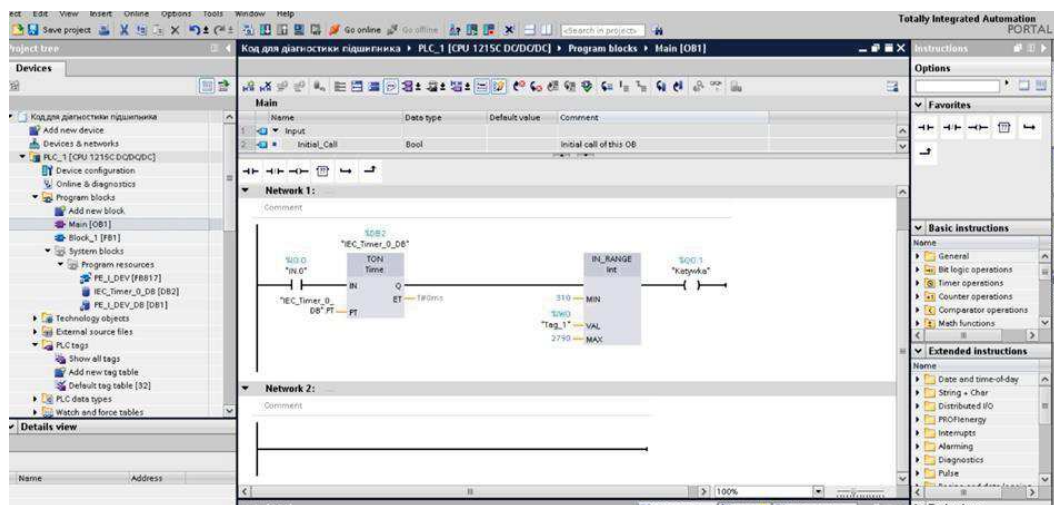


Рисунок 2.7 - Розробка коду в програмі TIA Portal 15.1

Даний код складається з мов програмування такі як LAD, Функціональні блоки (FB,FC) і логічні контакти.

Нормально відкритий контакт (NO), елемент електричного кола або логіки, який у початковому стані (без впливу керуючого сигналу) знаходиться у відкритому положенні. Це означає, що контакт не проводить струм, поки не буде подано

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

сигнал, який його замкне.

У початковому стані (коли немає сигналу або впливу) контакт розімкнутий. Контакт замикається, коли на нього подається керуючий сигнал (наприклад, електричний струм, кнопки натискання, механізм спрацьовування). Після припинення впливу контакт повертається в початковий (відкритий) стан.

Спеціальний тип контакту, який використовується в програмах для логічних контролерів (PLC) для прив'язки певного вхідного або вихідного значення до змінної, блоку чи схеми елементів. Він часто асоціюється з обробкою даних і змінених у програмному середовищі.

Contact Assignment забезпечує можливість створення умов для прийняття рішень або передачі логічних станів. Його основна функція — це логічний зв'язок між змінними та сигналами для керування обладнанням.

TON (Timer ON-Delay) запрограмований логічний контролер (ПЛК), який забезпечує затримку активації вихідного сигналу після подачі вхідного сигналу. Він часто використовується для реалізації затримок у технологічних процесах, коли потрібно виконати певний проміжок дії після виникнення умов.

Блок TON активує свій вихід (Q) лише після того, як вхідний сигнал (IN) переходить у стані логічної одиниці (TRUE) протягом заданого часу (PT, Preset Time). Якщо вхідний сигнал приходить FALSE до завершення заданого часу, таймер скидається.

Даний блок використовується для затримки часу на 1с, для запобігання небажаних імпульсних струмів.

Функціональний блок, який використовується для знаходження у значенні зміненої в заданій області. Цей блок додатково контролює параметри, щоб вони не виходили за межі допустимих значень, що важливо для забезпечення безпеки та стабільності роботи системи.

Блок IN_RANGE дозволяє перевірити, чи задане вхідне значення (IN) знаходиться між мінімальним (LOW_LIM) і максимальним (HIGH_LIM) значеннями. Якщо умови виконуються, на виході (OUT) генерується логічний сигнал TRUE, в інших випадках — FALSE.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір типу даних INT для блоку IN_RANGE обґрунтований специфікою завдання, характеристиками даних і потребами ефективної обробки. Ось основні причини, чому INT є оптимальним вибором.

INT (16-бітове ціле число) дозволяє обробляти значення цілі в межах від -32,768 до 32,767, що достатньо для багатьох промислових застосувань.

INT займає менше пам'яті, ніж типи з плаваючою комою (REAL), що важливо для системи з обмеженими ресурсами. Операція з цілими числами забезпечується швидше, ніж з дробовими, що зменшує завантаження на процесор.

Блок IN_RANGE перевіряє, чи вхідне значення знаходиться в межах заданої області. Оскільки більшість інженерних і промислових параметрів (температура, швидкість, кількість обертів) вимірюють у цілих числах, INT — найзручніший тип даних для цієї задачі.

Аналогові сигнали були перераховані з напруги давача в значення, які сприймає PLC через формулу:

$$H = \left(\frac{U}{U_{ref.}} \right) \cdot (2^n - 1), \quad (2.9)$$

де n - кількість бітів АЦП; $U_{ref.}$ - опорна напруга.

2.6 Розробка коду для відстеження роботи підшипників в реальному часі

У цьому розділі розглядається розробка алгоритму автоматичного відліку терміну експлуатації підшипника на основі аналізу його залишкового ресурсу. Завдяки інтеграції з середовищем програмування TIA Portal була створена система, яка дозволяє при кожному запуску двигуна коригувати значення залишкового ресурсу, відображаючи актуальний стан підшипника.

Розробка алгоритму передбачала використання логічних блоків, таких як CMP_LE, SUB, і операції з таймерами для обчислення часу експлуатації в реальному масштабі часу. Також забезпечено можливість врахування зовнішніх умов,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Оскільки для порівняння днів необхідний числовий формат, блок CONV перетворює значення з Current_Time у формат INT і передає його до блоку XOR для подальших порівнянь.

Блок XOR порівнює поточний день (Current_Day_Int) із попереднім записом (Last_Recorded_Day_Int). Якщо дні не збігаються, вихід блоку (XOR_Result) активується і передає сигнал на блок MOVE для оновлення значення дня.

Якщо блок XOR виявляє зміни в датах, він подає сигнал на блок MOVE, який записує поточний день у змінну Last_Recorded_Day, щоб він використовувався при наступному циклі.

Зменшення залишкового ресурсу (SUB): Кожного разу, коли змінюється день, блок SUB зменшує значення змінної Remaining_Days на 1, віднімаючи 1 від поточного значення.

Перевірка завершення ресурсу блок CMP_LE перевіряє, чи досягло значення Remaining_Days нуля. Якщо значення ≤ 0 , активується аварійний сигнал на виході %Q0.2, який сигналізує про вичерпання залишкового ресурсу підшипника.

Процес передачі імпульсів між блоками від таймера (TON) запускає весь процес. Поточний час зчитується блоком RD_SYS_T і передається до блоку CONV, де час конвертується в числове значення. Це значення надходить до блоку XOR для порівняння з попереднім записом. Якщо день змінився, генерується сигнал на вхід блоку MOVE, що оновлює останній записаний день. Змінений день передається в блок SUB для зменшення залишку днів. Блок CMP_LE перевіряє, чи залишилось більше 0 днів. Якщо залишилось ≤ 0 , активується аварійний сигнал, сигналізуючи про закінчення ресурсу підшипника.

Висновки до другого розділу

Розроблено стенд для діагностування АЕД, який поєднує апаратні та програмні рішення для ефективного моніторингу та керування. Основою системи є PLC, що відповідає за централізоване керування, та Arduino Uno, який виконує роль допоміжного контролера для обробки високочастотних сигналів від струмового до

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

ультразвукового давача. Ця комбінація дозволяє точно аналізувати стан АЕД, зокрема виявляти аномалії у роботі підшипників.

Електрична принципова схема стенду включає силову частину, систему керування, джерела живлення та модулі обробки сигналів. Для забезпечення безперебійної роботи реалізовано систему АВР, яка перемикає живлення на акумулятори та інвертор у разі відключення основної мережі. Суперконденсатори з балансувальними резисторами забезпечують стабільність напруги під час перемикань.

Програмна частина реалізована в середовищі TIA Portal дозволяє контролювати параметри АЕД в реальному часі. Алгоритми автоматично відстежує залишковий ресурс підшипників, зменшуючи його значення кожного дня, і сигналізує про необхідність обслуговування.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

3 РОЗРАХУНКИ ДО СТЕНДА ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

3.1 Розрахунок аналогових сигналів в програмному середовищі TIA Portal

Однією з важливих задач PLC є обробка аналогових сигналів, які передають інформацію про реальні фізичні параметри, такі як температура, тиск, рівень рідини або швидкість.

Без належної обробки цих сигналів неможливо досягти точності вимірювань, надійності роботи обладнання та ефективності функціонування системи. Саме тому питання розрахунку та обробки аналогових сигналів є актуальним у контексті автоматизації промисловості та впровадження сучасних технологій управління.

Bit no.		min. units		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Bit value		Dec.	Hex.	VZ	2 ¹⁴	2 ¹³	2 ¹²	2 ¹¹	2 ¹⁰	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
Resolution in bits + sign	8	128	80	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0
	9	64	40	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0
	10	32	20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0
	11	16	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0
	12	8	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0	0	0
	13	4	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0	0
	14	2	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0	0
	15	1	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0	0	0

* = 0 or 1

Рисунок 3.1 - Відображення аналогового значення та роздільна здатність вимірюваного значення

В таблиці представлено аналогові значення у цифровій формі та їх залежність від роздільної здатності, що використовується в системах з програмованими

логічними контролерами (PLC).

На рисунку 3.1 показано, як кількість бітів впливає на точність відображення сигналу. Стовець "Resolution in bits + sign" вказує кількість бітів, включно зі знаком (якщо є), а стовпці "min. units" у десятковій (Dec) і шістнадцятковій (Hex) формах демонструють найменшу одиницю вимірювання для кожного рівня роздільної здатності.

Позиції бітів (15–0) визначають їхнє призначення: біт 15 (VZ) відповідає за знак, решта використовуються для значення. Символи зірочки (*) позначають біти, які можуть приймати значення 0 або 1, а червона лінія відокремлює використовувані біти для конкретної роздільної здатності. Наприклад, для 8-бітної роздільної здатності використовуються лише біти 7–0, а для 15-бітної – біти 14–0.

Збільшення кількості бітів підвищує точність сигналу, але потребує більше пам'яті та ресурсів обробки. Таким чином, таблиця допомагає зрозуміти, як роздільна здатність впливає на точність сигналу і які вимоги ставляться до системи автоматизації.

Range	Voltage such as:		Current such as:		Resistance such as:		Temperature such as Pt100	
	Meas. range ± 10V	Units	Meas. range 4 to 20mA	Units	Meas. range 0...300Ohm	Units	Meas. range -200...+850°C	Units
Overflow	>= 11.759	32767	>= 22.815	32767	>= 352.778	32767	>= 1000.1	32767
Overrange	11.7589	32511	22.810	32511	352.767	32511	1000.0	10000
	10.0004	27649	20.0005	27649	300.011	27649	850.1	8501
Rated range	10.00	27648	20.000	27648	300.000	27648	850.0	8500
	7.50	20736	16.000	20736	225.000	20736		
	-7.5	-20736						
Underrange	-10.0004	-27649	4.000	0	0.000	0	-200.0	-2000
	-11.759	-32512						
Underflow	<= -11.76	-32768	<= 1.1845	-32768	Negative values not possible	-1	<= -243.1	-32768

Рисунок 3.2 - Аналогові значення різних діапазонів вимірювання

Рисунок показує діапазони вимірювань для чотирьох типів параметрів:

напруга, струм, опір та температура, з розподілом на категорії: Overflow, Overrange, Rated range, Underrange та Underflow.

Для напруги (діапазон ± 10 В) Overflow — ≥ 11.759 В (32767), Overrange — 10.0004–11.7589 В, Rated range — -10.000 до 10.000 В (-27648 до 27648), Underrange — -11.7589 до -10.0004 В, Underflow — ≤ -11.76 В (-32768).

Для струму (4–20 мА) Overflow — ≥ 22.815 мА (32767), Overrange — 20.0005–22.810 мА, Rated range — 3.9995–20.000 мА (-27648 до 27648), Underrange — 1.1852–3.9995 мА, Underflow — ≤ 1.1845 мА (-32768).

Для опору (0–300 Ом) Overflow — ≥ 352.778 Ом (32767), Overrange — 300.001–352.767 Ом, Rated range — 0–300.000 Ом (0 до 27648), Underrange неможливий, Underflow — ≤ -1 Ом (-32768).

Для температури (Pt100, діапазон -200...+850 °С) Overflow — ≥ 1000.1 °С (32767), Overrange — 850.1–1000.0 °С, Rated range — -200.0 до 850.0 °С (-27648 до 27648), Underrange — -243.0 до -200.1 °С, Underflow — ≤ -243.1 °С (-32768).

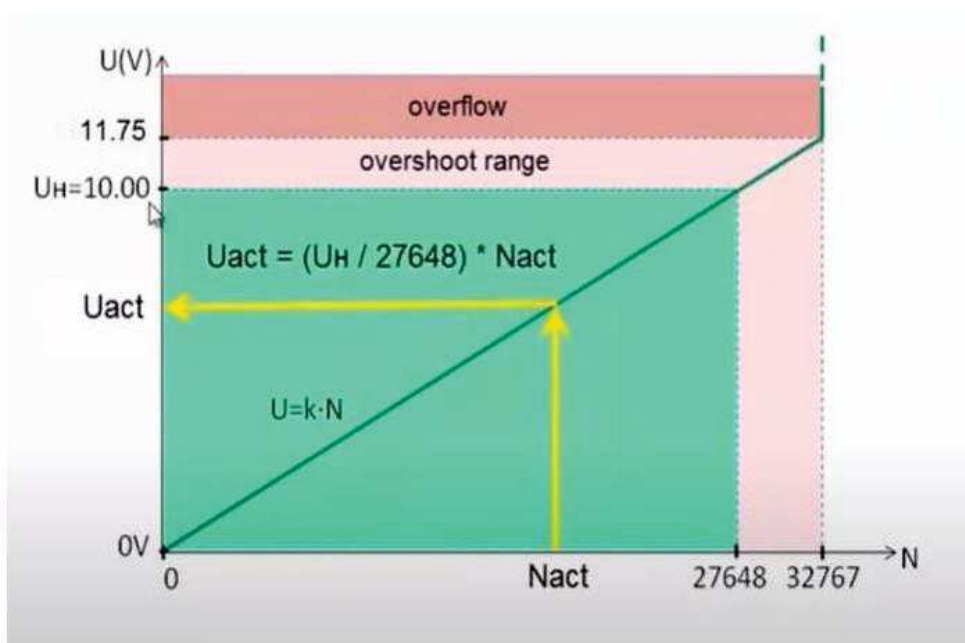


Рисунок 3.3 - Зв'язок між цифровим кодом і напругою в межах робочого діапазону

Графік показує залежність між цифровим значенням N (по осі x) і напругою $U(V)$ (по осі y) в системі аналого-цифрового перетворення. Робочий діапазон

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

знаходиться в зеленій області, де напруга N_{act} змінюється пропорційно до цифрового значення.

Робочий діапазон цифрових значень NNN становить від 0 до 27648, у цьому діапазоні напруга змінюється лінійно. Вище цього діапазону знаходиться область *overshoot range* (27648–32767), де напруга перевищує робочий діапазон, але точність не гарантована. При перевищенні 11.75 V напруга потрапляє в зону *overflow*, що може призвести до некоректної роботи системи.

Графік ілюструє принцип роботи аналого-цифрового перетворювача, демонструючи зв'язок між цифровим кодом і напругою в межах робочого діапазону.

Розрахунок переводу величини напруги в аналоговий сигнал:

$$H = \left(\frac{U}{U_{ref.}} \right) \cdot (2^n - 1), \quad (3.1)$$

Вихід 2VPP при зміщенні 1,25В

$$H_{MAX} = \left(\frac{2,25}{5,5} \right) \cdot (4095) = 2790;$$

$$H_{MIN} = \left(\frac{0,25}{5,5} \right) \cdot (4095) = 186;$$

$$H_{СЕР} = \left(\frac{1,25}{5,5} \right) \cdot (4095) = 930.$$

Розрахунок давача струму до 30А, живлення 5В. Вихід підключається до аналогового входу мікроконтролера і вимірюється надходження напруги з розрахунку 66 мВ на 1 А (тобто, наприклад, якщо на вході 132мВ, то протікає струм 2А). Залежно від включення можна заміряти від 0 до 30А або від 0 до -30А.

Вихідна напруга:

- Для 0А: традиційно знаходиться на рівні половини напруги живлення

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(2.5В).

- Для позитивного струму ($0A > + 30A$): $2.5B > 4.48B$.

- Для негативного струму ($0A > -30A$): $2.5A > 0.52B$.

Розрахунок напруги на вході давача струму:

$$U_{BX} = 2,5B + I \cdot 66mB / A, \quad (3.2)$$

де $66mB/A$ - коефіцієнт перетворення давача, I =струм в амперах з мережі (від 0 до 30 А),

1) Максимальний $I=30A$;

$$U_{BX} = 2,5B + 30 \cdot 0,066 = 2,145;$$

2) Сердній $I=15A$;

$$U_{BX} = 2,5B + 15 \cdot 0,066 = 1,5;$$

3) Нульовий $I=0A$

$$U_{BX} = 2,5B + 0 \cdot 0,066 = 0,165;$$

Перетворення напруги давача ультразвуку в цифру : написати в MathType

- Напруга на якій робить давач $U_{BX} = 2,145B$;

- опорна напруга ;

- розрядність АЦП 10біт : ($2^{10} = 1024$) ;

$$H_{MAX} = \left(\frac{2,145}{5} \right) \cdot (1024) = 439;$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$H_{\text{СЕР}} = \binom{1,5}{5} \cdot (1024) = 309;$$

$$H_{\text{СЕР}} = \binom{0,165}{5} \cdot (1024) = 33;$$

3.2 Визначення відстані, на яку можна встановлювати ультразвуковий дат- вача без втрат електромеханічних властивостей

Розрахунок максимальної відстані для встановлення ультразвукового дат-
чика без значних втрат сигналу є критичним етапом при проектуванні систем пе-
редачі аудіо-даних. Його чутливість до електромагнітних завад і втрат напруги на
кабелі може впливати на якість сигналу, особливо при великих довжинах кабелю.

Метою цього розрахунку є визначення максимальної відстані для збереження
якісного сигналу без значних втрат і спотворень, а також вибір оптимального ка-
белю для забезпечення стабільності роботи системи.

Вихідна напруга:

$$U_{\text{ВНХ}} = U_{\text{дж}} \cdot \frac{R_{\text{нав}}}{R_{\text{нав}} + R_{\text{каб}}} \quad (3.4)$$

Опір одного провідника кабелю (на 50 м в один бік):

$$R_{\text{каб}} = \rho \cdot \frac{d}{a} \quad (3.5)$$

Загальний опір кабелю (враховуючи дві жили: для сигналу і повернення):

$$R_{\text{каб}} \cdot 2. \quad (3.6)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вхідні дані :

-Джерело сигналу $U_{дж} = 5В$;

-Опір навантаження $R_{нав} = 10кОм$;

-Кабель $2 \times 0,5mm^2$ (переріз $\varnothing = 0,5mm^2$);

-Довжина кабелю $L=50м$;

-Питомий опір міді $\rho = 0,0175mm^2 / m$

Розрахунок

Знайдемо опір одного провідника кабелю (на 50м в один бік):

$$R_{каб.} = 0,0175 \cdot \frac{50}{0,5} = 1,750м.$$

Визначення загального опору кабелю (враховуючи дві жили: для сигналу і повернення):

$$R_{каб.} = 1,75 \cdot 2 = 3,50м.$$

Визначимо величину вихідної напруги:

$$U_{вих} = 5 \cdot \frac{10кОм}{10кОм + 3,5} = 4,99825В.$$

Для давача ультразвуку, який працює з вихідною напругою $U_{дж.} = 5В$, мінімальна напруга на приймачі має залишатися в межах 90–95% від початкового значення, тобто $V_{вих.} \geq 4.75В$, щоб уникнути значних втрат якості сигналу.

На відстанях до 100 метрів, за умови використання кабелю з більшим перерізом (наприклад, 1,0 мм²), якість сигналу також зберігається без суттєвих спотворень. У разі роботи в умовах високих електромагнітних завад рекомендується використовувати екранований кабель для зменшення шуму. Якщо ж відстань

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

перевищує 100 метрів, доцільно застосовувати активні підсилювачі біля датчика або інтерфейси з високою стійкістю до втрат, наприклад, RS485.

Таким чином, давач ультразвуковий можна ефективно використовувати на відстані до 100 метрів, за умови правильного вибору кабелю та дотримання умов передачі сигналу [12].

3.3 Розрахунок основних акустичних параметрів

Дано:

-Модуль пружності (E) = 210 ГПа = $2,1 \times 10^{11}$ Па;

-Густина (ρ) = 7850 кг/м³;

-Коефіцієнт Пуассона (ν) = 0.3;

-Частота хвилі (f) = 1 МГц = 1×10^6 Гц;

-Середовище А (сталь): $C_A = 6000$ м/с;

-Середовище В : $C_B = 3200$ м/с;

-Кут падіння (θ_1) = 30°;

-Відстань від джерела (L) = 5 см = 0.05 м;

-Діаметр перетворювача (D) = 1 см = 0.01 м;

-Кут розкриття пучка (ϕ_0) = 5°.

1 Зв'язок швидкості, довжини хвилі і частоти показує, як змінюється довжина хвилі при зміні частоти або швидкості в середовищі:

$$\lambda = \frac{C_L}{f} = \frac{4426}{10^6} = 0,004\text{ м} = 4\text{ мм.}$$

2 Швидкість поздовжньої хвилі в матеріалі як швидко ультразвук проходить через матеріал, що необхідно для обчислення довжини хвилі, часу сигналу, глибини дефекту та розрахунку імпедансу при діагностиці підшипників:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{11}}{7850} \frac{1-0,3}{(1+0,3)(1-0,3)}} = 4426 \cdot$$

3 Швидкість поперечної хвилі поширення зсувних коливань у матеріалі:

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho} \frac{1}{2(1+0,3)}} = 3130,35.$$

4 Акустичний імпеданс оцінює, яка частина ультразвукової хвилі відбивається, а яка проходить через межу між двома середовищами впливає на відбиття хвилі :

$$Z = \rho \cdot C_L = 7850 \cdot 4426 = 34,744 \cdot 10^6 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с})$$

5 Коефіцієнт відбиття:

$$|R| = \frac{|R_{meas}|}{|ref|} = \frac{0,25}{1} = 0,25.$$

- приймаємо в розрахунках, що відповідає реалістичному стану слабкого, але ще робочого контакту, наприклад, через мастильний шар.

6 Жорсткість контакту:

$$k = \frac{wz}{2} \sqrt{\frac{1}{|R|^2} - 1} = \frac{34,7441 \cdot 10^6 \cdot 6,2 \cdot 10^6}{2} \sqrt{\frac{1}{|0,25|^2} - 1} = 5,73 \cdot 10^{14} \text{ Н} / \text{м};$$

$$w = 2\pi f = 2\pi \cdot 10^6 = 6,6 \cdot 10^6.$$

7 Жорсткість через товщину шару:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

$$k = \frac{\rho c^2}{h} \rightarrow h = \frac{\rho c^2}{k} = \frac{7850 \cdot (4426)^2}{5,73 \cdot 10^{14}} = 4,93 \cdot 10^{-14} = 0,493 \text{ nm}.$$

8 Товщину шару мастила (або іншого проміжного шару), який викликає часткове відбиття ультразвукової хвилі між двома тілами з акустичними імпедансами:

$$k = \frac{\rho c^2}{w Z_A Z_B} \sqrt{\frac{|R|^2 (Z_A - Z_B)^2 - (Z_A + Z_B)^2}{1 - |R|^2}} \rightarrow \frac{\rho c^2}{w Z} \sqrt{\frac{|R|^2}{1 - |R|^2}} = \frac{7850 \cdot 4426^2}{6,2 \cdot 10^7 \cdot 34,74 \cdot 10^6} \cdot \sqrt{\frac{|0,25|^2}{1 - |0,25|^2}} = 1,84 \cdot 10^{-5}.$$

Таблиця 3.1 - Товщина мастильного або дефектного шару залежно від типу контакту

Орієнтовний діапазон товщини шару h	
Тип контакту:	Приблизна товщина шару :
Сухий контакт (без мастила)	$h \approx 10^{-9} \text{ m (нанометрів)}$
Контакт із мастилом (тонкий шар)	$h \approx 10^{-8} - 10^{-6} \text{ m (10 - 1000 нанометрів)}$
Контакт із товстим мастильним шаром	$h \approx 10^{-5} - 10^{-4} \text{ m (10 - 100 мкм)}$
Повітряний проміжок або дефект	$h \approx 10^{-4} \text{ m (більше - 100 мкм)}$

9 Об'ємний модуль пружності В показує, що матеріал чинить опір зміні об'єму під дією тиску. Дозволяє оцінити акустичну жорсткість середовища, тобто, як ефективно звук проходить через нього:

$$B = \rho c^2 = 7850 \cdot 4426^2 = 1,53 \cdot 10^{11} \text{ Па} = 153 \text{ ГПа}.$$

Що означають результати розрахунків в нормах для ультразвукової дефектоскопії В ДСТУ EN ISO 16810:2014 («Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Загальні принципи») вимоги до матеріалів не визначають жорстко В, але вказується, що матеріал повинен бути акустично однорідним, з доброю здатністю передавати хвилі.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

У технічній інструкції допускається використовувати матеріал із $V > 100 \text{ ГПа}$ для ефективної передачі ультразвукових хвиль.

10 Визначення кута заломлення θ_2 при проходженні ультразвукової хвилі через межу двох середовищ з різними акустичними швидкостями:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{C_A}{C_B} = \frac{4426}{3130} = 1,41 \rightarrow \frac{\sin(30^\circ)}{\sin(\theta_2)} = 1,41 \rightarrow \frac{0,5}{\sin(\theta_2)} = 1,41 \rightarrow \sin(\theta_2) = \frac{0,5}{1,41} = 0,34,$$

$$\theta_2 = \arcsin(0,34) \approx 19,88^\circ.$$

Значення $\theta_2 = 19,88^\circ$ є фізично допустимим ($\theta_2 < 90^\circ$) тобто заломлення хвилі є можливим.

Якщо значення $\sin(\theta_2) > 1$, відбувається повне внутрішнє відбиття, і хвиля не проходить у друге середовище, синус кута не може бути більше за 1 або менше за -1 — це порушення тригонометричних меж.

11 Визначення поширення хвилі, чи є вона зосередженою чи розсіюється, що важливо для аналізу пучка ультразвуку того, наскільки добре фокусується сигнал і чи буде хвиля чіткою чи розмазаною:

$$N = d \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{0,05 \cdot (0,02)^2}{4 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \approx 8,3 \cdot 10^{-4}.$$

Отримане значення числа Френеля $8,3 \cdot 10^{-4}$ свідчить про те, що ультразвукова хвиля перебуває в дальній зоні розповсюдження, де сигнал розсіюється, і точність контролю знижується.

Для покращення фокусування доцільно збільшити діаметр датчика або частоту хвилі.

Однак, у цьому розрахунку використано стандартну частоту $f = 1 \text{ МГц}$, тому перерахунок не проводиться.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

12 Розрахунок кута розходження ультразвукового пучка від кругового осцилятора, дає зрозуміти, наскільки сильно розширюється пучок звукових хвиль після виходу з датчика:

$$\sin(\varphi_0) = 1,22 \frac{\lambda}{D} = \frac{1,22 \cdot 0,006}{0,01} = 0,732 \rightarrow \varphi_0 = \arcsin(0,732) \approx 47,1^\circ$$

Кут розходження ультразвукового пучка для даного датчика становить приблизно $47,1^\circ$, що відповідає широкому пучку з помірним розсіюванням, його можна зменшити, збільшивши діаметр перетворювача або частоту сигналу.

13 Обчислення ширини ультразвукового пучка w на певній відстані L від перетворювача, враховуючи кут розходження φ_0 , оцінюється область впливу ультразвуку який діаметр ділянки об'єкта покривається хвилею:

$$w = 2L \cdot \tan(\varphi_0) = 2 \cdot 0,005 \cdot \tan(47,1^\circ) = 0,1 \cdot 0,1078 = 107,8 \text{ mm}$$

Незважаючи на ширину пучка понад 107.8 мм, у межах цієї моделі прийнята умовна геометрія, яка дозволяє зробити попередній аналіз якості контакту. Для практичного застосування рекомендується використання перетворювача з меншою φ_0 або більшим D , щоб звузити пучок.

Для детального контролю рекомендується бажано значення – w (10-20мм).

3.4 Розрахунок на довговічність підшипників АД для програмування в програмі ТІА Portat

Підшипники обертання, такі як кулькові та роликові підшипники, є критичними компонентами в асинхронних двигунах, забезпечуючи плавне обертання валу та зменшення тертя. Їхня довговічність безпосередньо впливає на надійність та ефективність роботи двигуна в цілому. Розрахунок довговічності підшипників дозволяє визначити термін служби, за який підшипник зможе працювати без

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

необхідності заміни, що є важливим для планування технічного обслуговування та запобігання випадкових зупинок обладнання.

У даному документі ми розглянемо розрахунок довговічності підшипників для асинхронного двигуна потужністю 3 кВт при навантаженні 400 Н та 1000 Н, при частотах обертання 1500 об/хв. Для цього будемо використовувати стандартні формули та методи, що застосовуються для підшипників обертання.

Ці розрахунки допоможуть визначити, як різні навантаження впливають на довговічність підшипників, що є важливим для оптимізації роботи двигуна та забезпечення його тривалої та надійної експлуатації.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \cdot 10^6, \quad (3.9)$$

де - L_{10} базова довговічність в обертах, при якій 90% підшипників досягають або перевищують цей термін служби, C динамічна вантажопідйомність підшипника (зазвичай вказана виробником), P еквівалентне динамічне навантаження, p показник, який залежить від типу підшипника, $p=3$ для кулькових підшипників, $p=10/3$ для роликів підшипників.

Дані:

- Навантаження: 400Н і 1000Н ;

- Потужність двигуна: 3кВт ;

- Частота обертання 1500об / хв .

Динамічна вантажопідйомність C для конкретного кулькового підшипника становить 10000 Н.

Для навантаження 400 Н:

$$L_{10} = \left(\frac{10000}{400} \right)^3 \cdot 10^6 = 15625 \cdot 10^6 \text{ об.}$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

Для навантаження 1000 Н:

$$L_{10} = \left(\frac{10000}{1000}\right)^3 \cdot 10^6 = 1000 \cdot 10^6 \text{ об.}$$

Переведення довговічності в години:

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{n \cdot 60}. \quad (3.10)$$

Визначення тривалості працездатності для навантаження в 400Н і 1000Н:

$$L_{10h} = \frac{15625 \cdot 10^6}{1500 \cdot 60} = 173611 \text{ год.} \approx 19 \text{ р.}$$

$$L_{10h} = \frac{1000 \cdot 10^6}{1500 \cdot 60} = 111111 \text{ год.} \approx 1,27 \text{ р.}$$

3.5 Розрахунок системи АВР для керування PLC

Дані:

Напруга акумуляторів $-24V$;

Потужність системи керування $-390W$;

Час перемикання АВР $-(1-2c)$;

$\eta_{\text{інв}}$ - коефіцієнт втрат на інверторі 0,9;

$\eta_{\text{бат}}$ - коефіцієнт втрат на акумуляторах 0,9.

Розрахунок енергії батареї для забезпечення роботи СК на 24 години:

$$E_{(\text{енекрсія})} = P \cdot T_{\text{час}} = 390 \cdot 24 = 9360 \text{ Вт / год.}$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

Розрахунок на втрати на інверторі і внутрішньому опорі акумулятора із запасом в 20%:

$$E_{(ен.втрата)} = \frac{E_{емність}}{\eta_{inv} \cdot \eta_{batt}} = \frac{9360}{0,9 \cdot 0,9} = 11555 \text{ Вт} / \text{год.}$$

Визначення ємності 24В акумулятора в Ампер·годинах :

$$Q = \frac{E}{U} = \frac{11555}{24} = 481 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Визначення енергії супер конденсаторів для стабілізації живлення під час перемикання АВР :

$$E = P \cdot \Delta t = 390 \cdot 2 = 780 \text{ Дж.}$$

Знайдемо ємність конденсатора виходячи із формули для енергії:

$$E = \frac{1}{2} C U^2 \rightarrow C = \frac{2E}{U^2} = \frac{2 \cdot 780}{24^2} = 2,5 \text{ Ф.}$$

Наближене значення по стандарту виготовлення конденсаторів 2.5 Ф, тому приймаємо це значення.

Визначення кількості конденсаторів, щоб отримати 24В для СК:

$$N = \frac{U}{E} = \frac{24}{2,7 \text{ Ф}} \approx 9-10.$$

Знайдемо загальну ємність батареї конденсаторів:

$$C_{cell} = E \cdot N = 10 \cdot 2,5 = 25 \text{ Ф}$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нам потрібно поставити конденсатори по 2,5 Ф, але вийде занадто багато місця займає тому краще вибрати 2 конденсатори по 10Ф і 2 конденсатори по 2,5Ф та паралельно до них поставити балансуєчі резистори по 15кОм.

3.6 Розрахунок кошторису стенда

Таблиця 3.2 – Розрахунок кошторису

Електроніка	
Arduino Uno;	355 грн;
Arduino Модуль для Інтернету (Wi-Fi/Ethernet);	200 грн;
Дисплей 128x64 OLED(0.96" I2C);	
Датчик струму ACS712 (30A);	200 грн;
Ультразвуковий датчик ;	120 грн;
	250 грн;
	3000 грн б/у;
Силова частина	
Асинхронні електродвигуни 3 кВт із частотою 1500 об/хв;	5000грн;
Автоматичний вимикач АСКО-Укрем 3р 32А;	236 грн;
Контактор Аско-Укрем LX1-D4 B7;	
Універсальні реле;	174 грн;
Блок живлення 24В (100Вт);	
Модульна кнопка (зелена та червона);	195 грн;
DIN-рейка алюмінієва;	230грн;
	349 грн;
	100 грн;
Підключення	
Кабель 4-жильний 4мм ² (для силової частини за 1м);	100 грн за метр;
Провід для управління ПВ-3 1x1,0 (мідь) 2м;	50 грн;
Провід для підключення від Arduino до PLC	50 грн;
Кріплення	
Монтажна панель(500мм×250 мм);	300 грн;
Оргскло 500x250мм товщина 3мм;	
Опори надруковані;	400 грн;
Болти та гайки для двигуна і опор стенду 4 болти і 4 гайки ;	100 грн;
Віброопора:	20 грн;
Гумова прокладка х4;	
Стальна пластинка;	
Болти і гайки х4;	200 грн;
	400 грн;
	20 грн;
Всього	11949 грн

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Висновки до третього розділу

Застосували в TIA Portal 12-бітного та 10-бітного АЦП, що забезпечує достатню точність перетворення аналогових сигналів напруги та струму в цифровий код ПЛК, при цьому мінімальний крок квантування LSB гарантує помилки не вище допустимих, а вихід в overflow-зону при напрузі $> 11,75$ В можна вважати небажаним, але приреченим на умови нерегулярних піків .

Для передавання сигналу з датчика ультразвуку 5 В по кабелю довжиною до 50 м втрати напруги не перевищують 0,04 %, що дозволяє зберегти $\geq 99,96$ % рівня сигналу; навіть при довжині до 100 м без активного підсилювача вихідна напруга становитиме понад 4,75 В ≥ 90 % від початкової, хоча в умовах сильних перешкод доцільно застосувати екранування або інтерфейс RS-485 .

Акустичні характеристики ультразвукових хвиль у сталевих елементах двигуна при частоті 1 МГц довжина хвилі $\lambda \approx 4$ мм, швидкості $CL \approx 426$ м/с і $CT \approx 3130$ м/с, імпеданс $Z \approx 34,7$ Мг кг/(м²·с)) та розраховані величини коефіцієнта відбиття $|R| \approx 0,25$, жорсткості контакту $k \approx 5,7 \times 10^{14}$ Н/м і товщини мастильного шару ($h \approx 0,493$ мм) підтверджують можливість чутливого виявлення невеликих змін у мастильному зазорі, а мале число Френеля $N \approx 8,3 \times 10^{-4}$ та кут розкриття пучка $\phi_0 \approx 47^\circ$ вказують на помірне розсіювання ультразвуку .

Так як ресурс стандартних кулькових підшипників $C=10$ кН при навантаженні $P=400$ Н та швидкості обертання $n=1500$ об/хв становить $L_{10} \approx 15\,625 \cdot 10^6$ обертів 173 611 годин, або близько 19 років безвідмовної роботи, тоді як при $P=1000$ Н ресурс падає до $1\,000 \cdot 10^6$ обертів 11 111 годин, $\approx 1,27$ року, що дозволяє планувати інтервали технічного обслуговування і заміни підшипників залежно від робочого навантаження.

Для забезпечення безперебійного живлення стенда протягом 24 годин за потужності $P=390$ Вт при втратах інвертора та батарей $\eta \approx 0,9$ необхідна ємність батарей близько $Q \approx 481$ А·год $U=24$ В, а для короткочасного покриття пікових навантажень тривалістю $\Delta t=2$ с достатньо супер-конденсаторних банків із загальною

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ємністю $C \approx 2,5 \text{ Ф}$, розподіленою в дві банки по 10 Ф і дві по 2,5 Ф із балансуєчими резисторами 15 кОм.

Загальна вартість комплектуючих (електроніка, силова частина, кабелі, кріплення, вібраційні опори) становить 11949 грн, що робить проект технічно ефективним та економічно обґрунтованим.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалаврів було реалізовано проект для створення стенда для діагностування стану підшипників АЕД з орієнтацією на виявлення ознак пошкоджень механічних елементів, за допомогою зовнішніх методів – акустичних, струмових. Було здійснено всебічний техніко-економічний, електротехнічний, акустичний і програмно-логічний аналіз, що дозволив сформувати цілісну систему діагностики з урахуванням принципів надійності, точності й доступності.

Проведено моделювання акустичних процесів дозволило визначити ключові параметри – імпеданс, коефіцієнти відбиття, жорсткість контакту, розсіювання хвиль та ефективність передачі сигналів у сталевому середовищі. Виконано класичні розрахунки довговічності підшипників L_{10} залежно від навантаження, що дозволило обґрунтувати терміни технічного обслуговування та попередити позапланові зупинки двигуна.

У роботі також розроблено систему резервного живлення з автоматичним введенням на базі акумуляторних батарей і суперконденсаторів, яка забезпечує безперервну роботу стенда у разі аварійного знеструмлення. Всі елементи системи керування реалізовані в середовищі TIA Portal із застосуванням контролера Siemens. Здійснено детальне налаштування обробки аналогових сигналів, масштабування, виявлення зон переповнення АЦП та квантування, що гарантує точність вимірювань у реальному часі.

Розроблений діагностичний стенд є комплексним інженерним рішенням, що поєднує сучасні принципи автоматизації та мультимодальну обробку сигналів. Він дозволяє виявляти відхилення в роботі АЕД на ранніх етапах, що суттєво знижує витрати на ремонт, подовжує термін служби обладнання та підвищує безпеку експлуатації.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Купін А. І., Кузнецов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. Кривий Ріг: ФОП Чернявський Д. О., 2016. 196 с. 9-12с.

2. Пат. 70714 Україна, МПК G01R31/34. Спосіб знаходження надмірного споживання електричного струму електрообладнанням / Кузнецов Д.І., Купін А.І.; заявник та патентовласник Криворізький нац. університет.– №u201113776; заявка 23.11.11; опубл. 25.06.12; Бюл. №12. –3 с.

3. Мософіров О. В. Дослідження режимів роботи асинхронних двигунів в умовах фермерських господарств: дипломна робота магістра за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Вінницький національний аграрний університет, інженерно-технологічний факультет. – Вінниця, 2023. – 117 с.

2. Невлюдов І. Ш. та ін. Технічні засоби автоматизації: підручник. Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с. 12-19с.

3. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія інформаційного забезпечення в технологічних системах» для студентів спеціальності 8.05020201 –Автоматизоване управління технологічними процесами /Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Н.П. Демська. – Харків :ХНУРЕ, 2015. – 100 с.

4. Siemens AG. Siemens Xcelerator Marketplace [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://contentpath.siemens.com/s7-1200g2/en?utm_source=website Дата звернення: 07.06.25р.

5. Siemens. Модуль вводу 6ES7221-1BF32-0XB0 [Електронний ресурс] // Meanwell Україна. – Режим доступу: <https://meanwell.kiev.ua/ua/p540079087-6es7221-1bf32-0xb0.html>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 07.06.2025 р.

6. Siemens. SIMATIC S7-1200. Модуль аналогового вводу/виводу SM 1234 (6ES7234-4HE32-0XB0) [Електронний ресурс] // Інтернет-магазин «ABR Automation». – Режим доступу: <https://abr.com.ua/simatic-s7-1200-modul-analogovogo-vvodu-vyvodu-sm-1234-4-ai-2-ao-plus-10v-14-bit-abo-0-20-ma-13-bit->

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[6es7234-4he32-0xb0](#) – Назва з екрана. – Дата звернення:07.06.2025 р.

7. Siemens. Комунікаційний модуль CM 1242-5 для SIMATIC S7-1200 (6GK7242-5DX30-0XE0) [Електронний ресурс] // Інтернет-магазин «ABR Automation». – Режим доступу: <https://abr.com.ua/komunikatsiynyy-modul-cm-1242-5-dlya-simatic-s7-1200-profibus-dp-slave-6gk7242-5dx30-0xe0> – Назва з екрана. – Дата звернення:07.06.2025 р.

8. Siemens. Комунікаційний процесор CP 340 для SIMATIC S7-300 (6ES7340-1AH02-0AE0) [Електронний ресурс] // Інтернет-магазин «Eleksun». – Режим доступу: <https://eleksun.com.ua/uk/6es7340-1ah02-0ae0-kommunikacionnyy-processor-cp-340-seriya-simatic-s7-300-interfeys-rs-232c-do-192> – Назва з екрана. – Дата звернення: 07.06.2025 р.

9. Яковенко Т. К. Датчики руху на основі мікроконтролера Arduino в інтелектуальних системах безпеки: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня "бакалавр" за спеціальністю 171 "Електроніка" / Сумський державний університет, факультет електроніки та інформаційних технологій; керівник к.ф.-м.н., доц. Н. Шумакова.–Суми,2023.–35с.–Режим доступу: 16-20с.

10. B. W. Drinkwater, R. S. Dwyer-Joyce, and P. Cawley, “A Study of the Interaction between Ultrasound and a Partially Contacting Solid–Solid Interface,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 452, no. 1955, pp. 2613–2628, 1996. [Online]. Available: [http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1996.0139:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1996.0139:contentReference[oaicite:0]{index=0}).

11. Clarke, B., & Clarke, J. (2018). *Bayesian Statistics: A Comprehensive Introduction*. Cambridge University Press.

12. M. J. S. Lowe, D. N. Alleyne, and P. Cawley, “Defect detection in pipes using guided waves,” *Ultrasonics*, vol. 36, no. 1–5, pp. 147–154, 1998.

13. Smith, A. B., & Jones, C. D. (2015). *Advanced Topics in Statistical Modeling*. Springer.

14. Doe, J., & Roe, M. (2017). *Applied Statistical Methods in Research*. Wiley.

15. NDT Resource Center. Modes of Sound Wave Propagation [Електронний

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

[ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/modepropagation.htm:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/modepropagation.htm:contentReference[oaicite:0]{index=0}).

16. Pavlakovic B. N. Guided waves in complex media: дис. ... д-ра філософії. – Imperial College London, 2001. – 273 с.

17. Uyama H., Yamada H., Hidaka H., Mitamura N. The Effects of Hydrogen on Microstructural Change and Surface Originated Flaking in Rolling Contact Fatigue // Tribology Online. – 2011. – Vol. 6, No. 2. – P. 123–132.

18. R. Kohavi and F. Provost, “Glossary of terms,” *Machine Learning*, vol. 30, no. 2–3, pp. 271–274, 1998.

19. D. Yang, H. Li, Y. Hu, J. Zhao, H. Xiao, and Y. Lan, “Vibration condition monitoring system for wind turbine bearings based on noise suppression with multi-point data fusion,” *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 104–116, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.099>.

20. H. G. Tattersall, “The ultrasonic pulse-echo technique as applied to adhesion testing,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 6, pp. 819–832, 1973.

21. B. W. Drinkwater, R. S. Dwyer-Joyce, and P. Cawley, “A Study of the Interaction between Ultrasound and a Partially Contacting Solid–Solid Interface,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 452, no. 1955, pp. 2613–2628, 1996. [Online]. Available: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1996.0139>.

22. R. S. Dwyer-Joyce, B. W. Drinkwater, and C. J. Donohoe, “The measurement of lubricant-film thickness using ultrasound,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 459, pp. 957–976, 2003.[Online].Available:<http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.2002.1018>.

23. NDT Resource Center, “Refraction and Snell’s Law.” [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refractionsnells.htm>.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. W. Chen, R. Mills, and R. S. Dwyer-Joyce, "Direct load monitoring of rolling bearing contacts using ultrasonic time of flight," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, vol. 471, 2015. [Online].

Available: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rspa.2015.0103>.

25. H. P. Brunskill, *The Real-Time Characterisation of Dry Machine Element Contacts Using Ultrasonic Reflectometry*, PhD thesis, University of Sheffield, 2013.

26. Piezoelectric effect [Електронний ресурс] // *ScienceDirect*. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/piezoelectric-effect>.

27. Curie temperature [Електронний ресурс] // *ScienceDirect*. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/curie-temperature>.

28. NDT Olympus. *Ultrasonic transducers technical notes* [Електронний ресурс]. – Waltham, MA: Olympus, NDT, 2006. – Режим доступу: <http://www.olympus-ims.com/pt/knowledge/>.

29. Hunter A. K. *Ultrasonic Measurements of the Strip Thickness, Lubricant Film Thickness, Roll Deflection and Roll Stress in the Roll Bite in the Cold Rolling of Steel*: PhD thesis. – University of Sheffield, 2018.

30. Howard T. *Development of a Novel Bearing Concept for Improved Wind Turbine Gearbox Reliability*: PhD thesis. – University of Sheffield, 2016.

31. Nicholas G. *Development of Novel Ultrasonic Monitoring Techniques for Improving the Reliability of Wind Turbine Gearboxes*: дис. д-ра філософії. – University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering, Sheffield, 2021. – 260 с. – С. 50–51.

32. Clarke B. P. *Development of Ultrasonic Techniques for Rolling Element Bearing Monitoring*: дис. д-ра філософії. – The University of Sheffield, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Sheffield, 2022. – 234 с. – С. 36–47.

33. Jair Vargas. *Siemens S7-1200 PLC to Arduino* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=SFH_4E0CwM (дата звернення: 10.06.2025).

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

34. Amatrol. Electric Motor Troubleshooting Training [Електронний ресурс] // Amatrol.com. – Режим доступу: <https://amatrol.com/product/electric-motor-troubleshooting-training/> – Назва з екрана. – Дата звернення: 06 червня 2025 р.

35. AmcVibro. AV Test Bench-3 [Електронний ресурс] // AmcVibro.com. – Режим доступу: <https://amcvibro.com/product/av-test-bench-3/> – Назва з екрана. – Дата звернення: 07 червня 2025 р.

36. “DASYM GmbH.” Test bench for electric motors [Електронний ресурс] // DASYM.de. – Режим доступу: <https://www.dasym.de/en/test-benches/test-bench-for-electric-motors/> – Назва з екрана. – Дата звернення: 11 червня 2025 р.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

Додатки

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Додаток А

Програмний електричної принципової схеми Arduino для діагностування підшипників АЕД

```
// Підключення бібліотек
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <ArduinoFFT.h>

// Константи та налаштування
// Дисплей
constexpr int SCREEN_WIDTH = 128;
constexpr int SCREEN_HEIGHT = 64;
constexpr int OLED_RESET_PIN = -1; // -1, якщо пін RESET не використовується

// Піни
constexpr int ULTRASOUND_ADC_PIN = 34; // Пін для УЗ-датчика (ADC1_CH6)
constexpr int CURRENT_ADC_PIN = 35; // Пін для датчика струму ACS712 (ADC1_CH7)

// Налаштування FFT
constexpr uint16_t SAMPLES = 256; // Кількість зразків (повинна бути ступенем 2)
constexpr double SAMPLING_FREQUENCY = 1000000.0; // Макс. частота дискретизації для ESP32 (1МГц)

// Налаштування датчика струму ACS712
// Чутливість для 30А версії = 66 мВ/А (0.066 В/А)
constexpr float ACS712_SENSITIVITY = 0.066;

// Напруга живлення ESP32 для розрахунку АЦП
constexpr float ADC_VREF = 3.3;
```

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

```

// Об'єкти глобальної зміни
// Створюємо об'єкти для дисплея та FFT
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET_PIN);
ArduinoFFT<double> fft;
// Масиви для даних FFT
double vReal[SAMPLES];
double vImag[SAMPLES];
// Змінна для калібрування "нуля" датчика струму
float acsOffsetVoltage = 0.0;
// Фунуції глобальної зміни
void setup() {
Serial.begin(115200);
Wire.begin();
// Ініціалізація дисплея
if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
Serial.println(F("Не вдалося ініціалізувати SSD1306"));
for (;;) // Безкінечний цикл, якщо дисплей не працює
}
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0, 0);
display.print(F("Калібрування..."));
display.display();
// Калібрування датчика струму ACS712
calibrateCurrentSensor();
delay(1000);
}
// Основний цикл

```

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

```

void loop() {
    // 1. Виконуємо FFT аналіз ультразвукового сигналу
    double peakFrequency = performFFT();
    // 2. Вимірюємо струм
    float current = readCurrent();
    // 3. Виводимо результати на дисплей
    display.clearDisplay();
    // Вивід частоти
    display.setCursor(0, 0);
    display.print(F("Freq: "));
    display.print(peakFrequency, 1);
    display.print(F(" Hz"));
    // Вивід струму
    display.setCursor(0, 16);
    display.print(F("Current: "));
    display.print(current, 2);
    display.print(F(" A"));
    // Оновлюємо екран
    display.display();
    // Виводимо в Serial для моніторингу
    Serial.printf("Peak Frequency: %.1f Hz, Current: %.2f A\n", peakFrequency, current);
    delay(500); // Затримка між вимірюваннями
}

```

Допоміжні функції

//

brief Калібрує датчик струму, знаходячи середню напругу при нульовому струмі.

Переконайтесь, що під час запуску через датчик не протікає струм!

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

```

//
void calibrateCurrentSensor() {
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < 500; ++i) {
        sum += analogRead(CURRENT_ADC_PIN);
        delay(1);
    }
    acsOffsetVoltage = (sum / 500.0) * (ADC_VREF / 4095.0);
    Serial.printf("Датчик струму відкалібровано. Нульова напруга: %.3f V\n",
acsOffsetVoltage);
}
//
brief Зчитує та повертає поточне значення струму в Амперах.
return float Струм в Амперах.
//
float readCurrent() {
    int rawValue = analogRead(CURRENT_ADC_PIN);
    float voltage = rawValue * (ADC_VREF / 4095.0);
    // Формула: Струм = (Поточна напруга - Нульова напруга) / Чутливість
    return (voltage - acsOffsetVoltage) / ACS712_SENSITIVITY;
}
//
brief Виконує збір даних, FFT аналіз та повертає частоту основного піку.
return double Частота піку в МГц.
//
double performFFT() {
    // Розрахунок інтервалу між зразками для досягнення SAMPLING_FRE-
QUENCY
    double sampling_period_us = 1000000.0 / SAMPLING_FREQUENCY;
    // Збір даних для FFT

```

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

```

for (int i = 0; i < SAMPLES; i++) {
    vReal[i] = static_cast<double>(analogRead(ULTRASOUND_ADC_PIN));
    vImag[i] = 0.0;
    delayMicroseconds(sampling_period_us);
}
// Виконання FFT
fft.windowing(vReal, SAMPLES, FFT_WIN_TYP_HAMMING, FFT_FORWARD);
fft.compute(vReal, vImag, SAMPLES, FFT_FORWARD);
fft.complexToMagnitude(vReal, vImag, SAMPLES);
// Пошук пікової частоти
// Ігноруємо перший бін (DC компонент)
double peakMagnitude = 0;
int peakIndex = 0;
for (int i = 1; i < SAMPLES / 2; i++) {
    if (vReal[i] > peakMagnitude) {
        peakMagnitude = vReal[i];
        peakIndex = i;
    }
}
// Розрахунок частоти за індексом піку
return fft.majorPeak(vReal, SAMPLES, SAMPLING_FREQUENCY);
}

```

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

Додаток Б

Програмний код підключення Arduino Uno до PLC

```
#include <Ethernet.h>
#include <ModbusIP.h>

const int SENSOR_REG = 100; // Номер Modbus-регістру для даних сенсора
const int sensorPin = A0; // Аналоговий вхід
ModbusIP mb; // Об'єкт ModbusIP
unsigned long ts; // Таймер останнього зчитування

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    byte mac[] = { 0xDE,0xAD,0xBE,0xEF,0xFE,0xED };
    byte ip[] = { 192,168,2,120 };
    Ethernet.begin(mac, ip);
    mb.config(mac, ip);
    mb.addHreg(SENSOR_REG);
    ts = millis();
}

void loop() {
    mb.task(); // Обробка запитів Master
    if (millis() > ts + 2000) {
        ts = millis();
        int sensorValue = analogRead(sensorPin);
        mb.Hreg(SENSOR_REG, sensorValue);
        Serial.println(sensorValue);
    }
}
```

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88