

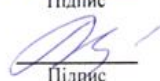
Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей
електродвигуна автомобіля
Назва теми

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність	174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма	«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Шифр КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ

Виконав здобувач 3 курсу, група	<u>АКІТРс-23-1</u>	 Підпис	<u>Дмитро ВОЛЧАНСЬКИЙ</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник	<u>канд. техн. наук, доц.</u> Науковий ступінь, учене звання	 Підпис	<u>Галина РАДЕЛЬЧУК</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Нормоконтролер	<u>канд. техн. наук, доц.</u> Науковий ступінь, учене звання	 Підпис	<u>Галина РАДЕЛЬЧУК</u> Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих технологій та
робототехніки


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

13. 06. 2026 р.
Дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Інформаційних технологій

Кафедра Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Людмила КОРЕЦЬКА

07 лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Волчанському Дмитру Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

Керівник роботи Радельчук Галина Іванівна, канд. техн. наук, доцент

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. №7.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 01.06.26 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики

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

Вступ. Огляд об'єкту автоматизації. Аналіз існуючих рішень. Проектування програмно-технічного комплексу для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. Алгоритмічне та програмне проектування програмно-технічного комплексу. Висновки.

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

Презентаційні матеріали

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М. В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Радельчук Г. І., доцент кафедри АКІТтаР		

7. Дата видачі завдання «07» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Ознайомлення з тематикою кваліфікаційної роботи (КвР), визначення та узгодження індивідуальних тем КвР	01.12 – 31.12.2025	
2 Збір матеріалу за темою КвР; дослідження предметної області, визначення задач та вимог до ПТК.	02.01 – 31.01.2026	
3 Проектування ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля	01.02 – 28.02.2026	
4 Розробка програмного забезпечення для ПТК	01.03 – 30.04.2026	
5 Написання вступу, загальних висновків, оформлення переліку джерел посилання та додатків. Оформлення пояснювальної записки КвР згідно вимог	01.05 – 25.05.2025	
6 Попередній захист КвР	травень 2026 (згідно графіка)	
7 Перевірка КвР на плагіат, нормоконтроль, отримання відгуків, рецензій та інших супровідних документів. Брошування (зшиття) пояснювальної записки.	26.05 – 30.05.2026	
8 Здача КвР на кафедру; підготовка КвР для розміщення у репозиторії ХНУ; підготовка до захисту та захист КвР	з 01.06.2026	

Студент


 Підпис

 Дмитро ВОЛЧАНСЬКИЙ
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник роботи


 Підпис

 Галина РАДЕЛЬЧУК
 Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля».

Автор роботи: Волчанський Дмитро Олександрович.

Керівник роботи: Радельчук Галина Іванівна.

Пояснювальна записка: 65 с., 18 рис., 5 табл., 2 дод., 39 джерел.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДАТЧИКИ, ЕЛЕКТРОДВИГУН, МІКРОКОНТРОЛЕР,
ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС, ТЕРМОРЕЗИСТОР.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмно-технічного комплексу (ПТК) для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. В ході виконання кваліфікаційної роботи було охарактеризовано об'єкт автоматизації, розроблено структурну схему ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. Також було проаналізовано та обрано потрібні пристрої для реалізації ПТК із подальшою розробкою алгоритмічного та програмного забезпечення програмно-технічного комплексу.


Підпис студента

02.08.2020
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ	8
1.1 Огляд та аналіз об'єкта автоматизації.....	8
1.2 Опис технологічного процесу автоматизації	12
1.3 Застосування та класифікація програмно-технічних комплексів для діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. Перспективи та напрямки розвитку	18
1.4 Висновки до першого розділу. Постановка задачі	22
2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ.....	23
2.1 Принцип роботи та функції програмно-технічного комплексу для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля	23
2.2 Розробка структурної схеми роботи програмно-технічного комплексу автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля.....	25
2.3 Обґрунтування вибору компонентів ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля.....	31
2.3.1 Датчики на основі ефекту Холла з відкритою петлею	33
2.3.2 Платинові терморезистори типу РТ1000	35
2.3.3 Мікроконтролер ARM Cortex-M7 серії STM32H7.....	36
2.3.4 П'єзоелектричний акселерометр ІЕРЕ.....	38
2.3.5 Мережевий вузол CAN-FD Transceiver.....	40

					КвРАКІТР.2023/45.01.08.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Програмно-технічний комплекс для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Виконав		Волчанський Д.О.		02.06.2024			4	65
Керівник		Радельчук Г.І.		02.06.2024				
Н. контр.		Радельчук Г.І.		13.06.2024				
Зав. каф.		Корецька Л.О.		19.06.2024				
						ХНУ, АКІТРс-23-1		

2.4 Висновки до другого розділу	42
3 АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ	43
3.1 Розробка алгоритму роботи програмно-технічного комплексу	43
3.2 Розробка програмного забезпечення контролера	46
3.3 Розробка панелі користувача	48
3.4 Висновки до третього розділу	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62
ДОДАТОК А. Лістинг коду	66

ВСТУП

У сучасному автомобілебудуванні перехід до електромобільності кардинально змінює парадигму технічного обслуговування, оскільки тяговий електродвигун є не просто силовим агрегатом, а складною кіберфізичною системою, де механічні процеси нерозривно пов'язані з алгоритмами керування та передачею даних.

Актуальність програмно-технічних комплексів (ПТК) зумовлена насамперед високою щільністю потужності сучасних двигунів переважно PMSM та індукційних машин. На відміну від двигунів внутрішнього згоряння, де багато несправностей можна виявити органолептично, дефекти електродвигуна такі як, наприклад, міжвиткові замикання, деградація ізоляції або ексцентриситет ротора – часто залишаються невидимими до моменту катастрофічного виходу з ладу. Використання інтегрованих інтелектуальних систем дозволяє перейти від регламентного обслуговування до концепції прогностичного обслуговування, що базується на реальному технічному стані агрегату.

Сучасний ПТК базується на принципах комп'ютерно-інтегрованих технологій, де сенсорний шар, а саме датчики струму, вібрації, температури та положення ротора об'єднується з обчислювальними потужностями бортового комп'ютера. Особливої ваги набуває аналіз спектра споживаного струму. Цей метод дозволяє без розбирання двигуна ідентифікувати аномалії в магнітному полі та механічні пошкодження підшипників шляхом виявлення специфічних частотних складових у гармонійному складі струму статора. Для реалізації таких алгоритмів у реальному часі використовуються методи швидкого перетворення Фур'є або вейвлет-перетворення, що потребує високої швидкодії контролерів та оптимізованого програмного забезпечення.

Роль цифрових двійників та інтелектуального аналізу має велику актуальність, оскільки програмно-технічний комплекс створює математичну модель конкретного екземпляра двигуна, яка функціонує паралельно з реальним об'єктом. Будь-яке відхилення реальних параметрів, наприклад, перегрів при

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		6

номінальному навантаженні або зміна вектору магнітного потоку від моделі свідчить про зародження несправності. Це дозволяє системі не лише констатувати факт поломки, а й прогнозувати залишковий ресурс обладнання, що є критичним для безпеки руху та функціонування систем автопілотування.

Системна безпека та функціональна надійність полягає у тому, що автоматизована діагностика є ключовим елементом стандарту функціональної безпеки. Оскільки електродвигун в автомобілі безпосередньо впливає на динаміку та гальмування (рекуперацію), ПТК має забезпечувати миттєву реакцію на критичні збої. Комп'ютерно-інтегрований підхід дозволяє об'єднати діагностичні дані з протоколами обміну CAN або Automotive Ethernet, забезпечуючи передачу інформації в хмарні сервіси для глобального аналізу парку автомобілів. Таким чином, розробка та впровадження таких комплексів є фундаментом для створення надійного, енергоефективного та безпечного інтелектуального транспорту майбутнього.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмно-технічного комплексу для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. В ході виконання кваліфікаційної роботи передбачено виконання таких завдань:

- охарактеризувати об'єкт автоматизації;
- розробити структурну схему ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля;
- проаналізувати та обрати потрібні пристрої для реалізації ПТК;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення програмно-технічного комплексу;
- підсумувати кожен розділ та всю роботу загалом.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		7

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ

1.1 Огляд та аналіз об'єкта автоматизації

Програмно-технічний комплекс (ПТК) для діагностики електродвигуна автомобіля – це багаторівнева ієрархічна система, що об'єднує фізичне обладнання та інтелектуальні алгоритми у єдиний контур керування станом об'єкта.

Структурна декомпозиція ПТК розглядається як система, де кожен компонент виконує специфічну функцію в ланцюжку перетворення інформації від первинного аналогового сигналу до прийняття управлінського рішення.

Рівень технічного забезпечення включає прецизійні засоби вимірювальної техніки, інтегровані безпосередньо в конструкцію електропривода або інвертора. Ключовими елементами є датчики струму (на основі ефекту Холла або шунтів), MEMS-акселерометри для аналізу віброакустичних сигналів та високошвидкісні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). Важливою частиною є обчислювальний вузол – зазвичай це мікроконтролер реального часу, наприклад, архітектури ARM Cortex-R або FPGA), здатний обробляти потоки даних із частотою дискретизації в десятки кілогерц [12].

Програмна складова реалізує складні математичні операції, де пріоритет надається методам ідентифікації параметрів у реальному часі [19]. Програмне ядро зазвичай виконує:

- цифрову фільтрацію та усунення шумів від роботи ШІМ-інвертора;
- векторні перетворення (перетворення Кларка та Парка) для переходу від трифазних струмів до обертової системи координат. Це дозволяє розділити струм, що створює момент, від струму збудження, полегшуючи пошук аномалій у магнітному полі;
- алгоритми спектрального аналізу (FFT) для виявлення специфічних частот, що відповідають дефектам підшипників або короткозамкненим виткам;
- функціональна аналітика та методи діагностики.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		8

Актуальність ПТК полягає в здатності автоматизовано виконувати сигнатурний аналіз. Кожна несправність має свій «цифровий відбиток». Наприклад, при пошкодженні постійних магнітів ротора в спектрі фазного струму з'являються гармоніки певного порядку, які програмний комплекс має автоматично розпізнати та класифікувати.

Таблиця 1.1 – Комп'ютерна інтеграція та самодіагностика

Компонент ПТК	Технологічна роль	Результат для системи
Сенсорний шар	Збір первинних даних (I, U, T, вібрація)	Оцифрований стан агрегату
Комунікаційний шар	Передача даних через CAN FD або Automotive Ethernet	Синхронізація з бортовими системами
Аналітичне ядро	Порівняння з еталонною моделлю (Digital Twin)	Визначення відхилень (Residuals)
Інтерфейс (HMI)	Візуалізація та формування звітів	Повідомлення водію або сервісу

У контексті комп'ютерно-інтегрованих технологій такий комплекс інтегрується в загальну стратегію керування енергоспоживанням автомобіля (VMS – Vehicle Management System). ПТК не просто констатує поломку, він динамічно коригує обмеження потужності двигуна, щоб запобігти аварійному руйнуванню.

Математично це описується через спостерігачі стану, наприклад, розширений фільтр Калмана, які оцінюють змінні, що не піддаються прямому вимірюванню, наприклад, температуру всередині обмоток ротора, що дозволяє системі автоматизації підтримувати максимальну продуктивність при забезпеченні гарантованої безпеки.

ПТК для діагностики електродвигуна – це інтелектуальна надбудова, яка перетворює «залізо» на адаптивну систему, здатну до самодіагностики та прогнозування власного ресурсу.

Типовою ситуацією є рух швидкісною трасою на сучасному електромобілі зі швидкістю 120 км/год. Тяговий електродвигун працює у стабільному режимі, видаючи номінальну потужність. З позиції водія та пасажирів поїздка проходить ідеально. Але на мікрорівні, всередині заднього підшипника ротора, через втому металу починає утворюватися мікротріщина – піттинг. Для звичайного автомобіля без інтелектуальної діагностики це початок незворотного процесу, який за лічені хвилини може призвести до критичного перегріву, руйнування сепаратора та раптового механічного заклинювання коліс на величезній швидкості. Проте тут у справу вступає програмно-технічний комплекс, що включає такі моменти:

- етап прихованої загрози та первинного аналізу сигналів;
- роботу цифрового двійника та верифікацію;
- автоматичну реконфігурація та режим виживання;
- взаємодію з водієм та безпечну зупинку;
- фіксацію інциденту та телематику.

На такій швидкості мікротріщина створює механічні удари з частотою в кілька тисяч герц. Водій абсолютно не відчуває цієї висхідної вібрації, оскільки вона поглинається масою автомобіля, підвіскою та шумоізоляцією. Однак, ПТК безперервно аналізує фазні струми двигуна через високошвидкісні аналого-цифрові перетворювачі. Алгоритм сигнатурного аналізу миттєво виявляє аномальну високочастотну гармоніку в споживаному струмі, яка раніше була відсутня. Ця гармоніка є електромагнітним відлунням мікроскопічного удару кульки підшипника об дефектну ділянку [15].

Система автоматизації не здійсмає паніку відразу, адже короточасний стрибок струму міг бути викликаний звичайним наїздом на жорсткий стик асфальту. Бортовий обчислювальний модуль передає первинні дані до програмного ядра, де функціонує цифровий двійник двигуна. Математична модель синхронно зіставляє кутову швидкість ротора, поточне навантаження та виявлену гармоніку. Протягом кількох сотень мілісекунд ПТК виконує жорсткий

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		10

статистичний аналіз і підтверджує: аномалія має чіткий періодичний характер, а її амплітуда експоненціально зростає. Діагноз встановлено безпомилково: прогресуюче руйнування підшипника.

Розуміючи, що подальше обертання ротора на максимальних обертах неминуче призведе до сильного теплового розширення металу та заклинювання, що рівноцінно раптовому повному гальмуванню на трасі, ПТК бере керування силовою установкою на себе. Комплекс миттєво переписує робочі ліміти в контурі векторного керування інвертора. Спеціальний алгоритм м'якої деградації плавно знижує максимальний крутний момент та обмежує фазні струми, щоб зменшити механічне навантаження на пошкоджений вузол.

Одночасно з апаратним обмеженням потужності, ПТК надсилає пріоритетний аварійний сигнал через цифрову шину до центрального комп'ютера автомобіля. На панелі приладів водія миттєво з'являється яскраве попередження про критичну механічну несправність та вказівка негайно перелаштуватися в правий ряд для зупинки. Автомобіль перестає реагувати на педаль акселератора вище встановленого електронікою безпечного ліміту швидкості. Що ще важливіше, комплекс примусово відключає систему агресивної рекуперації енергії, щоб уникнути різкого гальмівного моменту, який міг би остаточно розірвати ослаблений підшипник під час сповільнення.

Поки водій плавно та контрольовано зупиняє електромобіль на узбіччі, комплекс автоматично формує детальний діагностичний пакет даних. Внутрішня «чорна скринька» записує високоточні осцилограми струмів та вібрацій за останні хвилини до інциденту і через стільникову мережу відправляє їх у хмару виробника та на найближчу сервісну станцію. Коли за автомобілем приїде евакуатор, інженери на сервісі вже точно знатимуть характер пошкодження, а головне - життя людей та цілісність автомобіля були збережені завдяки блискавичній предиктивній реакції автоматики [24].

У цьому сценарії комп'ютерно-інтегрована система виступила як надійний запобіжник між апаратною поломкою та катастрофою.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		11

1.2 Опис технологічного процесу автоматизації

Сучасний програмно-технічний комплекс для діагностики тягового двигуна автомобіля – це високошвидкісна система реального часу, що поєднує методи інтелектуального аналізу сигналів та детерміновані математичні моделі. Такі системи базуються на концепції «Edge Computing», де первинна обробка даних відбувається безпосередньо в інверторі або окремому діагностичному модулі.

Методи спектрального та часово-частотного аналізу. Основним методом безрозбірної діагностики залишається MCSA – аналіз сигнатур фазних струмів. Оскільки будь-яка механічна чи електрична несправність змінює магнітний потік у зазорі, це модулює форму споживаного струму.

Програмна частина ПТК використовує швидке перетворення Фур'є для отримання частотного спектра. Проте для електродвигуна автомобіля, який постійно змінює швидкість обертів, класичного FFT недостатньо через ефект «розмиття» спектра. Тут застосовуються технології вейвлет-перетворення або перетворення Вігнера-Вілля, які дозволяють аналізувати нестационарні сигнали у часово-частотній області. Це дає змогу виявити дефект підшипника або ексцентриситет ротора навіть під час розгону автомобіля.

Технологія «цифрових двійників» та спостерігачів стану. Сучасна автоматизація відходить від простого порівняння параметрів із пороговими значеннями. ПТК реалізує математичну модель електродвигуна у просторі станів. Використовуються спостерігачі стану (State Observers), такі як розширений фільтр Калмана.

Система в реальному часі розв'язує систему диференціальних рівнянь. Якщо розбіжність між вимірюваними параметрами та розрахованими моделлю перевищує певний ліміт, ПТК автоматично класифікує це як аномалію. Це дозволяє виявляти міжвиткові замикання на стадії, коли вони ще не призвели до короткого замикання, але вже змінили індуктивність обмотки.

Апаратні технології та інтелектуальні периферійні пристрої. Технічне забезпечення ПТК інтегрується в архітектуру Automotive Ethernet (1000Base-T1),

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		12

що забезпечує необхідну пропускну здатність для передачі сирих даних діагностики.

На сенсорному рівні використовуються високочастотні датчики струму на основі ефекту Холла з полосою пропускання до 100 кГц та інтелектуальні MEMS-акселерометри, що мають вбудовані блоки для розрахунку середньоквадратичного відхилення (RMS) вібрації.

Обчислювальне ядро полягає у тому, що для реалізації складних алгоритмів у реальному часі використовуються FPGA або спеціалізовані нейропроцесори (NPU), які дозволяють виконувати паралельні обчислення, що критично для систем активної безпеки.

Інтелектуальна класифікація визначає, що на верхньому рівні ПТК працює навчена нейромережа (часто архітектури CNN), яка ідентифікує тип несправності за «картинкою» спектра, виключаючи помилкові спрацьовування, спричинені нерівностями дорожнього покриття.

Автоматизована інтеграція в життєвий цикл. Технологічна перевага такого ПТК полягає в автоматичній генерації «паспорта здоров'я» двигуна. Дані через телематичний модуль передаються у хмару виробника, де алгоритми великих даних порівнюють знос конкретного агрегату з тисячами аналогічних машин. Це дозволяє реалізувати стратегію CBM (Condition Based Maintenance) - обслуговування не за пробігом, а за фактичним станом ізоляції та механічних вузлів.

1. Боротьба з високочастотними завадами (Signal Conditioning)

Тягові двигуни працюють під управлінням інверторів на базі SiC (карбіду кремнію) або GaN (нітриду галію), які використовують дуже високі частоти ШІМ (широтно-імпульсної модуляції). Для фахівця з автоматизації це створює проблему «білого шуму», який маскує корисний діагностичний сигнал.

Технологія використання адаптивних решітчастих фільтрів та методів декомпозиції на емпіричні моди (EMD – Empirical Mode Decomposition) заключається в тому, що ПТК автоматично розкладає складний сигнал на простіші

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		13

компоненти, що дозволяє відокремити корисну інформацію про стан підшипника від перешкод інвертора.

2. Математичне моделювання, що полягає у параметричній ідентифікації

В основі сучасного ПТК лежить не просто порівняння з «нормою», а постійне уточнення параметрів об'єкта. Наприклад, для визначення перегріву ротора без датчика температури (що є стандартом для багатьох EV), система автоматизації обчислює активний опір обмотки та індуктивності у реальному часі.

Використання рекурсивного методу найменших квадратів (RLS) або спостерігачів на основі ковзних режимів (Sliding Mode Observers). Будь-яка невідповідність між розрахованою індуктивністю та еталонною свідчить про міжвиткове замикання або деградацію магнітів.

3. Глибоке навчання та нейромережева діагностика

На сучасному етапі актуальність ПТК неможлива без Edge AI, де замість передачі гігабайтів сирих даних у хмару, комплекс аналізує їх «на борту»:

Згорткові нейромережі (CNN) перетворюють часовий сигнал вібрації у спектрограму (візуальне представлення звуку) і класифікують її як «картинку». Це дозволяє з точністю понад 98% відрізнити знос сепаратора підшипника від викривлення валу.

RNN/LSTM аналізують послідовності даних у часі, що дозволяє системі «розуміти» контекст: чи є підвищена вібрація ознакою поломки, чи це просто їзда по бруківці.

4. Стандартизація та протоколи обміну (ISO 26262).

З точки зору комп'ютерно-інтегрованих технологій, ПТК повинен відповідати рівню цілісності безпеки ASIL D [33].

UDS (Unified Diagnostic Services) відіграють важливу роль, оскільки ПТК інтегрується через протокол ISO 14229, що дозволяє сервісному обладнанню зчитувати розширені коди помилок (DTC), які містять не лише факт збою, а й «стоп-кадр» (freeze frame) усіх параметрів двигуна в момент виникнення аномалії.

Важливою функцією ПТК є можливість дистанційного оновлення діагностичних моделей (Over-the-Air (OTA) Updates). Якщо виробник виявив новий тип

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		14

дефекту в серії, ПТК на тисячах автомобілів отримує оновлений алгоритм виявлення без візиту на СТО. У таблиці 1.2 показано характеристики архітектурних рішень.

Таблиця 1.2 – Архітектурні рішення

Рівень	Технологічне рішення	Значення для діагностики
Нижній	Швидкісні АЦП, а також ізольовані датчики струму	Точне захоплення перехідних процесів
Середній	FPGA або Real-time MCU	Обробка алгоритмів та фільтрація за мікросекунди
Верхній	Digital Twin із використанням Cloud Analytics	Прогнозування ресурсу на роки вперед

Аналіз вектора Парка є одним із найбільш елегантних та ефективних методів у арсеналі фахівця з автоматизації, оскільки він дозволяє перетворити складні трифазні часові сигнали у двовимірну геометричну фігуру, аналіз якої легко піддається алгоритмізації. У системі координат, що обертається синхронно з магнітним полем ротора, трифазні струми статора трансформуються у два постійні вектори у сталому режимі. Математично це реалізується через матрицю перетворення, яка враховує кутове положення ротора, тобто будь-яке відхилення від цієї геометрії є діагностичною ознакою. ПТК розрізняє типи несправностей за характером деформації цієї фігури. Електричні несправності, такі як міжвиткове замикання або асиметрія напруги живлення, порушують баланс фаз. Це призводить до того, що круговий годограф вироджується в еліпс. Програмний комплекс обчислює ексцентриситет цього еліпса та орієнтацію його головної осі, що дозволяє не лише констатувати факт замикання, а й точно визначити пошкоджену фазу без фізичного втручання.

Механічні несправності мають іншу сигнатуру, оскільки вібрації, знос підшипників або нерівномірність повітряного зазору ексцентриситет ротора

спричиняють коливання моменту опору, це миттєво відображається на компоненті струму, яка відповідає за формування електромагнітного моменту. На відміну від електричних збоїв, механічні проблеми не перетворюють коло на еліпс, а створюють високочастотні пульсації радіуса вектора або викликають специфічні коливання вектора навколо середнього значення. ПТК використовує методи статистичного аналізу, щоб відокремити ці «тремтіння» вектора від основної гармоніки.

Використання цього підходу дозволяє реалізувати функцію Self-Commissioning. Програмно-технічний комплекс може в процесі руху автомобіля «відкалібрувати» модель двигуна, враховуючи природне старіння магнітів. Якщо ж зміщення вектора Парка стає різким або виходить за межі розрахованого адаптивного коридору, система ідентифікує це як критичний дефект. Такий метод є надзвичайно швидким для обчислення на сучасних мікроконтролерах, оскільки не потребує ресурсомісткого перетворення Фур'є для кожного циклу вимірювань, що робить його ідеальним для систем реального часу.

Алгоритм переходу в аварійний режим – це вища форма прояву інтелектуальності ПТК, де діагностичні дані перетворюються на стратегію виживання системи. В межах спеціальності АКІТ цей процес розглядається як динамічна реконфігурація системи керування в умовах невизначеності та часткової втрати працездатності.

Структура прийняття рішення та генератор нев'язок полягає у тому, що основою алгоритму є блок порівняння реального стану вектора Парка з його математичним еталоном. Програмний комплекс постійно обчислює різницю між прогнозованим та виміряним значенням струму. Якщо різниця перевищує адаптивний поріг протягом певного часу, активується багаторівневий протокол безпеки. На цьому етапі ПТК класифікує несправність: електрична асиметрія вимагає обмеження напруги, тоді як механічні вібрації – обмеження максимальних обертів для уникнення резонансу.

Стратегія динамічного обмеження потужності полягає у тому, що замість повного відключення двигуна, що є небезпечним під час руху, ПТК реалізує

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		16

алгоритм м'якої деградації. Якщо за допомогою аналізу вектора Парка виявлено міжвиткове замикання, система автоматично перераховує обмеження за моментом. Програмне забезпечення змінює параметри регуляторів струму в контурі Field Oriented Control, знижуючи амплітуду струму статора до рівня, при якому тепловиділення в місці замикання не призведе до займання ізоляції. При цьому ПТК використовує температурний спостерігач, щоб у реальному часі балансувати між можливістю автомобіля «доїхати до узбіччя» та ризиком повного руйнування інвертора.

Реконфігурація системи керування та комунікація полягає у тому, що у випадку критичних збоїв в одному з фазних датчиків, ПТК може переключити алгоритм керування на роботу за двома фазами, використовуючи закон Кірхгофа для розрахунку третьої фази або перейти в бездатчиковий режим. Одночасно з цим через шину CAN FD або Automotive Ethernet надсилається команда до центрального контролера автомобіля. Це ініціює зміну стратегії рекуперації: ПТК може заборонити гальмування двигуном, щоб уникнути неконтрольованих кидків напруги, які за пошкодженої обмотки можуть вивести з ладу високовольтну батарею.

Паралельно з виконанням аварійних протоколів, ПТК здійснює запис високочастотних даних у незалежну пам'ять, тобто здійснює фіксацію стану за допомогою так званої чорної скриньки, що дозволяє фахівцям під час подальшого аналізу відтворити «траєкторію аварії» у віртуальному середовищі. Комплекс зберігає не просто код помилки, а повний вектор станів у форматі за 500 мілісекунд до моменту спрацювання захисту, що забезпечує можливість глибокого пост-аналізу для постійного вдосконалення алгоритмів самодіагностики через механізм ОТА-оновлень [33].

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.3 Застосування та класифікація програмно-технічних комплексів для діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. Перспективи та напрямки розвитку

Застосування програмно-технічного комплексу трансформує автомобільний електродвигун із пасивного виконавчого механізму в активний об'єкт моніторингу. Основна мета застосування ПТК перехід від констатації поломки до керування технічним станом у реальному часі.

Інтеграція ПТК у систему керування рухом полягає у тому, що застосування ПТК починається на рівні нижнього контуру автоматизації – інвертора. Програмний комплекс інтегрується безпосередньо в алгоритми векторного керування. Це дозволяє використовувати штатні датчики струму не лише для регулювання моменту, а й для діагностичних цілей.

Моніторинг енергоефективності: ПТК аналізує відношення споживаної потужності до вихідного моменту. Якщо ККД падає нижче розрахункового згідно з математичною моделлю, система ідентифікує це як ознаку деградації, наприклад, розмагнічування ротора через перегрів).

Віртуальне сенсорування полягає у тому, що замість встановлення дорогих датчиків вібрації на кожен вузол, ПТК застосовує програмні спостерігачі. Вони вираховують механічні коливання через пульсації електромагнітного моменту, що значно здешевлює конструкцію при збереженні високої точності.

Застосування комплексу охоплює весь життєвий цикл експлуатації автомобіля:

- активна безпека під час руху;
- предиктивне сервісне обслуговування;
- хмарна аналітика та Fleet Management;
- автоматизація розслідування інцидентів.

При виявленні критичного дефекту, наприклад, замикання на корпус, ПТК миттєво змінює топологію керування, тобто здійснюється відмовостійке керування

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		18

(Fault-Tolerant Control). Система може перевести двигун у режим активного короткого замикання (ASC) для безпечної зупинки, запобігаючи неконтрольованому генеруванню енергії назад у батарею.

Замість стандартних ТО через кожні 15-20 тисяч кілометрів, ПТК формує запит на сервіс на основі «індексу зносу». Це дозволяє замінити підшипник, коли спектральний аналіз вібрацій виявив перші ознаки мікротріщин, що запобігає заклинюванню двигуна на швидкісній трасі.

Для комерційного транспорту ПТК передає агреговані дані в централізовану систему керування автопарком. Це дозволяє порівнювати знос двигунів у різних умовах експлуатації (клімат, стиль водіння) та оптимізувати програмне забезпечення для конкретних регіонів.

Важливим аспектом є застосування ПТК як «цифрового експерта». У разі аварії комплекс надає повний часовий ряд параметрів у високій роздільній здатності. Це відбувається із використанням технології використання циклічних буферів пам'яті (Black Box mode). В результаті буде отримано автоматизований звіт, що чітко розмежовує зовнішні чинники, наприклад, удар, перевантаження користувачем від внутрішніх заводських дефектів, наприклад, дефект ізоляції (таблиця 1.3).

Таблиця 1.3 - Аналіз ефективності впровадження

Параметр	Без ПТК	З впровадженням ПТК
Ймовірність раптової відмови	Висока	Мінімальна (прогнозується за 50-100 годин)
Вартість експлуатації	Фіксована (регламентна)	Оптимізована (за станом)
Рівень безпеки (ASIL)	Базовий	Високий (самодіагностика 24/7)
Енерговитрати	Можуть зростати при дефектах	Завжди мінімальні завдяки корекції ККД

Розвиток ПТК для діагностики електромобілів перебуває на стику силової електроніки та великих даних. З позиції фахівця з автоматизації, цей процес супроводжується низкою критичних викликів, подолання яких відкриває принципово нові перспективи для інтелектуального транспорту.

До основних викликів можна віднести такі:

- електромагнітну сумісність та відношення «сигнал/шум»;
- обмеженість обчислювальних ресурсів «на борту»;
- нестационарність режимів роботи.

Сучасні інвертори на основі карбіду кремнію працюють на частотах комутації понад 50-100 кГц, що в свою чергу створює колосальний рівень електромагнітних завад.

Важливим завданням є виокремити слабкі діагностичні ознаки, наприклад, гармоніку зносу підшипника амплітудою в міліампери на фоні потужних імпульсних завад від ШІМ. Технологічний бар'єр полягає у необхідності використання прецизійних ізольованих АЦП із гігантською швидкістю вибірки та складних адаптивних цифрових фільтрів, що працюють у реальному часі.

Незважаючи на потужність сучасних контролерів, запуск складних нейромереж паралельно з основним контуром керування двигуном створює дефіцит тактів процесора. Викликом є мініатюризація моделей машинного навчання без втрати точності розпізнавання дефектів. Ризиком при цьому є затримка в обробці діагностичного сигналу може призвести до того, що система не встигне активувати захист при раптовому міжвитковому замиканні.

На відміну від промислових двигунів, що працюють зі сталою швидкістю, двигун авто постійно змінює оберти та навантаження. Викликом також є те, що класичні методи спектрального аналізу стають неточними. Потрібна постійна синхронізація діагностичних вікон із кутовим положенням ротора, що вимагає складної програмної інтеграції з датчиками положення.

Перспективи розвитку полягають у переході до самонавчальних цифрових двійників, використанні технології Federated Learning, а також інтеграції так

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		20

званих розумних сенсорів. Перспектива полягає у створенні ПТК, який не просто має жорстку модель двигуна, а адаптує її під конкретний екземпляр у процесі експлуатації. Тобто система зможе відрізнити «індивідуальні особливості» нового двигуна від реального зносу, що на 30-40% знижує кількість хибних спрацювань системи безпеки, що дозволяє навчати діагностичні алгоритми на даних тисяч автомобілів без передачі персональної інформації про поїздки в хмару.

Кожен ПТК стає частиною глобальної нейромережі. Якщо один автомобіль у США зафіксував рідкісний тип поломки, оновлені вагони нейромережі через ОТА-оновлення навчать ПТК автомобілів в Україні розпізнавати цей дефект ще до його появи. Майбутнє за датчиками, які мають вбудовані мікропроцесори для первинної обробки. Струмовий датчик сам виконує швидке перетворення Фур'є і передає в ПТК не сирий сигнал, а вже готовий «вектор ознак». Це знімає навантаження з центрального процесора та підвищує відмовостійкість системи за принципом децентралізації (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4 – Аналітичний прогноз розвитку

Напрямок	Сучасний стан	Перспектива (2030+)
Діагностика	Виявлення явних дефектів	Прогнозування ресурсу з точністю до 1 тижня
Зв'язок	CAN FD або Automotive Ethernet	Пряма інтеграція з V2X (Vehicle-to-Everything)
Математика	Статистичний аналіз та використання CNN	Пояснюваний ІІІ (Explainable AI – XAI)
Обслуговування	Повідомлення про помилку	Автоматичний запис на сервіс та замовлення деталі

Головним вектором розвитку ПТК є перехід від реактивного спостереження до когнітивної автоматизації, де комплекс самостійно інтерпретує фізичні процеси всередині двигуна.

1.4 Висновки до першого розділу. Постановка задачі.

Перший розділ містить опис актуальності даної тематики, а саме необхідність автоматизації діагностики несправностей електродвигунів автомобілів, оскільки даний вид транспорту особливо популярний в сучасних технологічних умовах.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмно-технічного комплексу для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. В ході виконання кваліфікаційної роботи передбачено виконання таких завдань:

- охарактеризувати об'єкт автоматизації;
- розробити структурну схему ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля;
- проаналізувати та обрати потрібні пристрої для реалізації ПТК;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення програмно-технічного комплексу;
- підсумувати кожен розділ та всю роботу загалом.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		22

2 ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ

2.1 Принцип роботи та функції програмно-технічного комплексу для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

Діагностика електродвигуна сучасного електроавтомобіля – це складна багаторівнева ієрархія збору, обробки та аналізу даних у реальному часі, в основі якого лежить концептуальний принцип роботи від сигналу до прийняття рішення.

В основі діагностичної системи лежить принцип неперервного моніторингу параметрів стану через мережу інтегрованих сенсорів. З позиції автоматизації – це замкнена система керування, де діагностика є критично важливою петлею зворотного зв'язку.

Процес починається на фізичному рівні, де датчики Холла, термістори та трансформатори струму перетворюють аналогові величини (магнітний потік, температуру обмоток, фазні струми) у цифрові сигнали. Далі включається контролер керування двигуном (MCU), який не тільки зчитує дані, а виконує цифрову обробку сигналів (DSP), відсікаючи шуми та виділяючи гармоніки, які можуть свідчити про зародження дефекту, наприклад, міжвиткове замикання або знос підшипника [34].

Центральна роль відведена цифровому двійнику, а саме математичній моделі ідеального стану двигуна, що зашита в пам'ять системи. Порівнюючи реальні показники з еталонними, алгоритми розраховують вектор помилки. Якщо відхилення перевищує заданий поріг, система ініціює протокол захисту. Це реалізується через інтеграцію з шиною CAN або Automotive Ethernet, що дозволяє миттєво скоригувати стратегію керування інвертором або повністю зняти напругу з силової установки.

Функціональна інтеграція системи полягає у тому, що завдяки алгоритмам машинного навчання система здатна ідентифікувати деградацію ізоляції задовго

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		23

до того, як станеться пробій. Вона аналізує тренди зміни температури відносно навантаження, що дозволяє оптимізувати життєвий цикл агрегату.

По-друге, реалізується функція динамічної конфігурації параметрів. У разі виявлення незначного перегріву однієї з фаз, система інтелектуально обмежує максимальний крутний момент, дозволяючи водієві дістатися до сервісу без критичного пошкодження заліза. Це і є прояв «розумної» автоматизації, де безпека поєднується з експлуатаційною гнучкістю.

Нарешті, важливою є функція логування та хмарної синхронізації. Усі діагностичні коди (DTC) та «знімки» параметрів у момент збою передаються в центральну базу даних виробника. Це дозволяє інженерам вдосконалювати програмне забезпечення (OTA-updates) для цілих лінійок автомобілів, базуючись на реальному досвіді експлуатації.

Загалом апаратна частина включає специфікації наступних вузлів:

- сенсори вібрації (акселерометри), які використовуються для спектрального аналізу стану підшипників (рисунок 2.1);
- сенсори струму на ефекті Холла, що забезпечують безконтактне вимірювання високих струмів (рисунок 2.2);
- інвертор з вбудованим діагностичним модулем, що центральною частиною системи та містить силові ключі IGBT або SiC та мікроконтролери (рисунок 2.3).

Тобто для автоматизації всього процесу діагности необхідна спільна робота теорії автоматичного керування, мікропроцесорної техніки та інформаційних мереж.

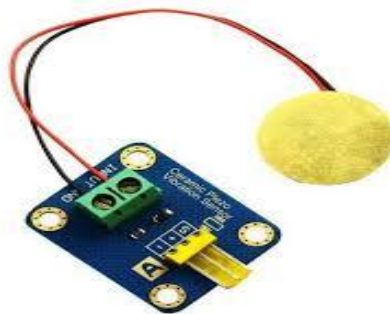


Рисунок 2.1 – Сенсор вібрації

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		24

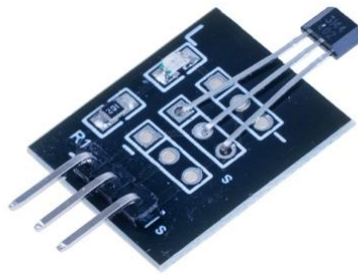


Рисунок 2.2 – Сенсори струму на ефекті Холла

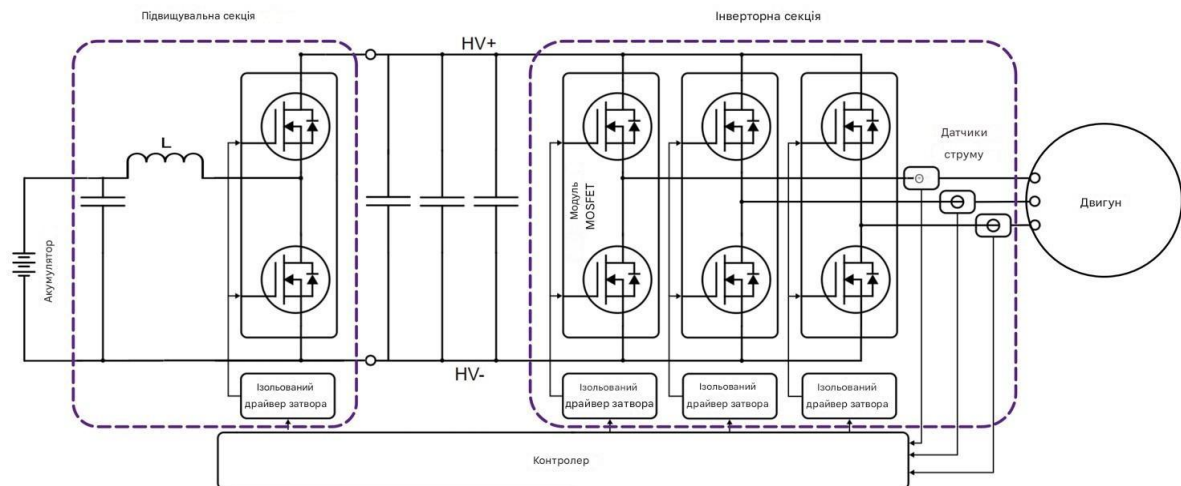


Рисунок 2.3 – Інвертор з вбудованим діагностичним модулем

2.2 Розробка структурної схеми роботи програмно-технічного комплексу автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

Апаратна частина системи діагностики – це не просто набір деталей, а багаторівневий вимірювальний комплекс, інтегрований у високовольтну архітектуру, що складається із таких рівнів:

- перцептивний рівень, що містить прецизійні сенсори;
- рівень обчислювального ядра, який містить контролери промислового класу;
- комунікаційний та захисний бар'єр.

Все починається з перетворення фізичних величин у стандартизовані електричні сигнали. Для діагностики стану обмоток та магнітної системи найважливішими є датчики струму на ефекті Холла або магніторезистивні

сенсори, які дозволяють безконтактно вимірювати фазні струми з високою частотою дискретизації, що критично для виявлення перехідних процесів або короткочасних сплесків, які вказують на деградацію ізоляції.

Паралельно працює резольвер, тобто датчик положення ротора. Це електромагнітний пристрій, який передає дані про кутову позицію з точністю до часток градуса. Будь-яка невідповідність між командами інвертора та реальною відповіддю резольвера миттєво ідентифікується апаратною логікою як механічне підклинювання або збій у системі керування полем.

Центральним вузлом є спеціалізований мікроконтролер, наприклад, серії Infineon AURIX або ST Stellar, який відповідає стандартам функціональної безпеки ASIL-D. Його архітектура зазвичай включає кілька ядер, що працюють у режимі паралельного виконання однакових обчислень для перевірки на помилки.

На апаратному рівні реалізовано модулі АЦП (аналого-цифрових перетворювачів) з високою розрядністю, які працюють синхронно з ШІМ-генераторами інвертора. Це дозволяє системі розрізняти стан силових ключів IGBT або SiC-модулів у мікросекундних інтервалах. Якщо на затворі транзистора фіксується аномальний опір або витік струму, драйвер верхнього рівня блокує живлення ще до того, як виникне фізичне руйнування.

Оскільки робота відбувається із високою напругою до 800В у сучасних системах, критично важливим апаратним компонентом є вузли гальванічної розв'язки. Оптичні або ємнісні ізолятори відокремлюють чутливу низьковольтну електроніку діагностичного модуля від силових шин.

Дані про несправності передаються через диференційні шини CAN-FD або Automotive Ethernet. Вибір цих інтерфейсів зумовлений їхньою високою завадостійкістю – в умовах потужних електромагнітних полів від двигуна звичайні цифрові лінії просто б зникли. Таким чином, діагностичне обладнання стає частиною цілісної комп'ютерно-інтегрованої мережі автомобіля.

При проектуванні таких систем особлива увага приділяється тепловому менеджменту самих плат діагностики, оскільки перегрів компонентів моніторингу може призвести до хибнопозитивних спрацювань системи безпеки.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		26

Спрощена схема програмно технічного комплексу для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля показана на рисунку 2.4.

Загальна структурна схема роботи програмно-технічного комплексу автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля подана на рисунку 2.5.

Архітектура вузлів містить такі компоненти:

- модуль силових транзисторів IGBT/SiC, що є основним джерелом діагностичних даних про навантаження (рисунок 2.6).
- високоточний шунт або датчик струму, який є основою для аналізу споживання енергії (рисунок 2.7);
- плата керування (Control Board) інвертора, на якій зосереджені мікроконтролери та обв'язка діагностики (рисунок 2.8).

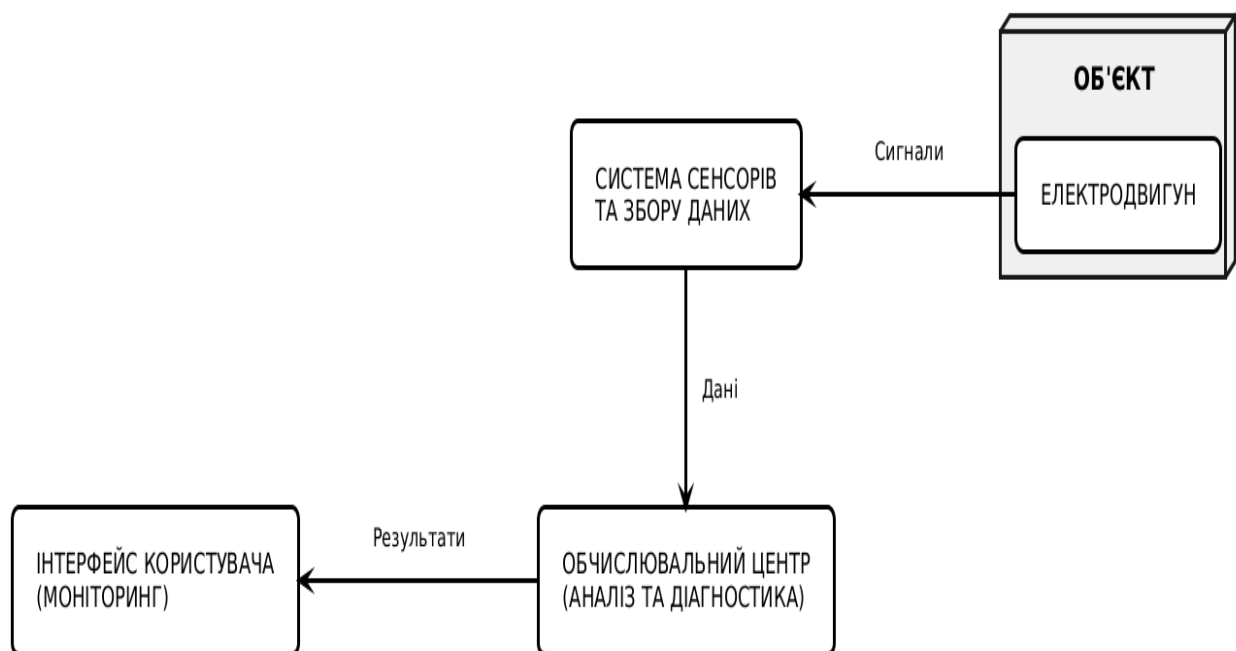


Рисунок 2.4 – Спрощена схема програмно технічного комплексу для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

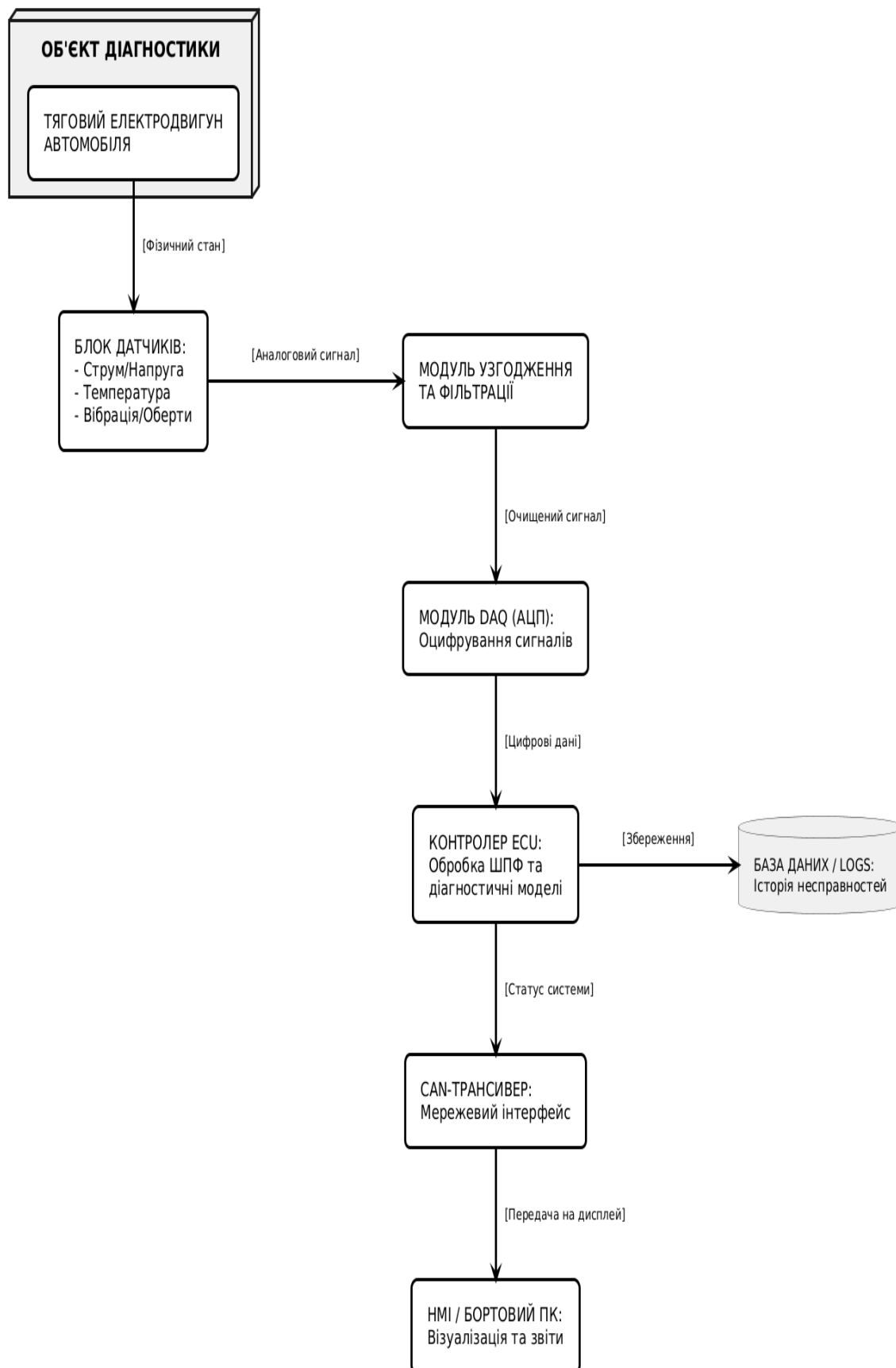


Рисунок 2.5 – Структурна схема роботи програмно-технічного комплексу автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата

КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ

Арк.

28



Рисунок 2.6 – Модуль силових транзисторів IGBT/SiC



Рисунок 2.7 – Високоточний датчик струму



Рисунок 2.8 – Плата керування інвертора

Підхід до розробки структурної схеми програмно-технічного комплексу базується на класичній ієрархічній моделі автоматизованих систем управління та моніторингу. Основною метою такого комплексу є безперервний збір фізичних параметрів об'єкта тягового електродвигуна, їх перетворення, цифрова обробка та автоматизоване прийняття рішень щодо технічного стану агрегату.

Нижній рівень структурної схеми формує блок первинних перетворювачів. Цей апаратний сегмент безпосередньо взаємодіє з електродвигуном. До його

складу входять датчики струму і напруги фаз (наприклад, на базі ефекту Холла) для аналізу електричної симетрії та виявлення міжвиткових замикань. Також сюди інтегруються температурні сенсори, розміщені в обмотках статора та на підшипникових вузлах, для запобігання тепловому пробою ізоляції. Важливим компонентом нижнього рівня є датчики вібрації (акселерометри) та енкодери або резольвери, що фіксують кутову швидкість і положення ротора. Аналогові сигнали з цих датчиків надходять до блоку узгодження сигналів, де відбувається їх фільтрація від високочастотних завад (робота інвертора створює значний електромагнітний шум) та гальванічна розв'язка для захисту низьковольтної електроніки.

Наступним функціональним блоком є модуль збору та перетворення даних (DAQ). Тут аналогові сигнали проходять через високошвидкісні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП). У контексті автомобільної автоматизації цей блок найчастіше реалізується на базі спеціалізованого мікроконтролера, який упаковує оцифровані дані у кадри промислового мережевого протоколу. Основним стандартом для передачі даних в автомобілі є шина CAN (Controller Area Network), тому структурна схема обов'язково повинна містити CAN-трансивер, що забезпечує інтеграцію діагностичного комплексу із загальною інформаційною системою електромобіля.

Центральним ядром комплексу є обчислювальний модуль середнього рівня, який може бути реалізований як окремий електронний блок управління (ECU) або інтегрований у головний контролер автомобіля. Саме тут реалізується математична складова спеціальності автоматизації. Програмне забезпечення цього блоку виконує алгоритми цифрової обробки сигналів. Наприклад, для вібродіагностики та аналізу струмів статора застосовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ), що дозволяє виділити гармоніки, характерні для специфічних механічних або електричних пошкоджень, а саме дефекти підшипників, ексцентриситет ротора. Алгоритми безперервно порівнюють отримані спектри та поточні значення з еталонними математичними моделями двигуна або заданими пороговими значеннями.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		30

Верхній рівень структурної схеми представлений людино-машинним інтерфейсом (НМІ) та експертною системою. Інформація про виявлені відхилення передається на бортовий комп'ютер для інформування водія, а також зберігається у незалежній пам'яті для подальшого зчитування на станції технічного обслуговування. Програмна частина верхнього рівня на сервісному обладнанні виконує глибоку аналітику: будує тренди деградації ізоляції, прогнозує залишковий ресурс механічних вузлів (predictive maintenance) та формує автоматизовані звіти з конкретними рекомендаціями щодо ремонту.

Таким чином, структурна схема ПТК являє собою замкнений інформаційний ланцюг: від фізичного процесу в електродвигуні, через апаратне перетворення і мережеву передачу даних, до складної програмної аналітики і видачі керуючих чи інформаційних впливів, що повністю відповідає парадигмі комп'ютерно-інтегрованих систем.

2.3 Обґрунтування вибору компонентів для програмно-технічного комплексу для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля

Другий етап побудови програмно-технічного комплексу полягає в обґрунтуванні вибору компонентів для такої системи. Для забезпечення високої точності автоматизованої діагностики обрано компоненти з параметрами, що вказані у таблиці 2.1.

Ефективність автоматизованої діагностики електродвигунів автомобілів Tesla, що працюють на високих обертах до 18-20 тисяч об/хв, критично залежить від швидкодії та завадостійкості компонентів. Для вимірювання струмів фаз доцільно обрати датчики на основі ефекту Холла з відкритою петлею, оскільки вони мають низьку інерційність та здатні реєструвати швидкі перехідні процеси без розриву силового ланцюга. Це необхідно для реалізації методу MCSA, де найменші спотворення форми хвилі струму вказують на дефекти ротора. Вибір температурних сенсорів зупинено на платинових терморезисторах типу PT1000

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		31

через їх високу стабільність та лінійність у широкому діапазоні температур, що критично для моніторингу обмоток статора в умовах інтенсивних теплових циклів.

Таблиця 2.1 – Опис компонентів та їх технічні характеристики

Компонент	Тип / Модель	Основні характеристики	Призначення
Датчик струму	LEM HASS 50-S (Ефект Холла)	Струм: до 150 А; Смуга частот: 0-50 кГц; Точність: $\pm 1\%$	Аналіз MCSA, виявлення міжвиткових замикань
Сенсор температури	PT1000 (Платиновий)	Діапазон: -50...+250°C; Опір: 1000 Ом при 0°C	Моніторинг теплового стану обмоток статора
Акселерометр	IEPE (П'єзоелектричний)	Чутливість: 100 мВ/г; Частотний діапазон: 0.5-15000 Гц	Вібродіагностика підшипників та балансування
Контролер	ARM Cortex-M7 (STM32H7)	Частота: 480 МГц; Наявність DSP та FPU блоків	Цифрова обробка сигналів, ШПФ в реальному часі
Мережевий вузол	CAN-FD Transceiver	Швидкість: до 8 Мбіт/с; Обсяг даних: 64 байт/кадр	Передача діагностичних звітів на бортову мережу

Обґрунтування вибору вібродатчиків базується на необхідності реєстрації високочастотних складових. Для Tesla доцільно використовувати п'єзоелектричні акселерометри з інтегрованою електронікою (ІЕРЕ), які мають високу чутливість до вібрацій підшипникових вузлів та здатні працювати в умовах сильних електромагнітних полів, що створюються інвертором. Для передачі даних обрано мікроконтролер архітектури ARM Cortex-M7, оскільки він має вбудовані блоки апаратного прискорення обчислень з плаваючою комою (FPU) та цифрову обробку сигналів (DSP), що дозволяє виконувати швидке перетворення Фур'є в реальному часі без затримок у контурі управління.

Мережевий рівень базується на протоколі CAN-FD (Flexible Data-rate), що є еволюційним розвитком стандартної шини CAN. Вибір CAN-FD обґрунтований необхідністю передачі значно більших обсягів діагностичних даних до 64 байт у кадрі на вищій швидкості до 5-8 Мбіт/с, що важливо для передачі детальних спектральних характеристик двигуна на бортовий комп'ютер. Такий вибір компонентів забезпечує високу точність виявлення несправностей на ранніх етапах, мінімізує вплив шумів та дозволяє інтегрувати діагностичну систему в складну цифрову екосистему сучасного електромобіля.

2.3.1 Датчики на основі ефекту Холла з відкритою петлею

Вимірювання сили струму є важливим процесом для оцінки, керування та діагностики електричних систем. Зазвичай вимірювання сили струму використовується для керування та захисту електричних ланцюгів. Завдяки технологічному прогресу вимірювання сили струму застосовується також для оптимізації продуктивності та моніторингу. Таким чином, датчики сили струму використовуються в багатьох сферах застосування, зокрема й під час виявлення несправностей електродвигунів автомобілів.

Одним із поширених методів є резистивне вимірювання струму за допомогою шунтового резистора. Цей метод використовує падіння напруги на шунтовому резисторі для обчислення струму, що протікає через резистор.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		33

Однак резистивний метод вимірювання струму має кілька недоліків. По-перше, відсутня електрична ізоляція між ланцюгом, що працює з високою потужністю, та вимірювальним ланцюгом. Оскільки вимірюється падіння напруги на клеммах резистора, прилад для вимірювання струму доводиться вбудовувати безпосередньо в ланцюг, що контролюється. Отже, з міркувань безпеки резистивне вимірювання струму можна використовувати у високовольтних системах лише в тому випадку, якщо можна гарантувати ізоляцію між ланцюгом, що працює з потужністю, та вимірювальним ланцюгом за допомогою додаткової електроніки. Крім того, падіння напруги на шунтовому резисторі призводить до втрат енергії. Щоб мінімізувати ці втрати, номінал резистора повинен бути якомога меншим.

Через ці проблеми широко використовуються також датчики струму на ефекті Холла (рисунок 2.10). Вони є надійним рішенням для безконтактних вимірювань струму з високою точністю. Гальванічна ізоляція між датчиком і струмом гарантує високий рівень безпеки. Крім того, датчики струму на ефекті Холла мають просту конструкцію та низькі втрати енергії (рисунок 2.11).

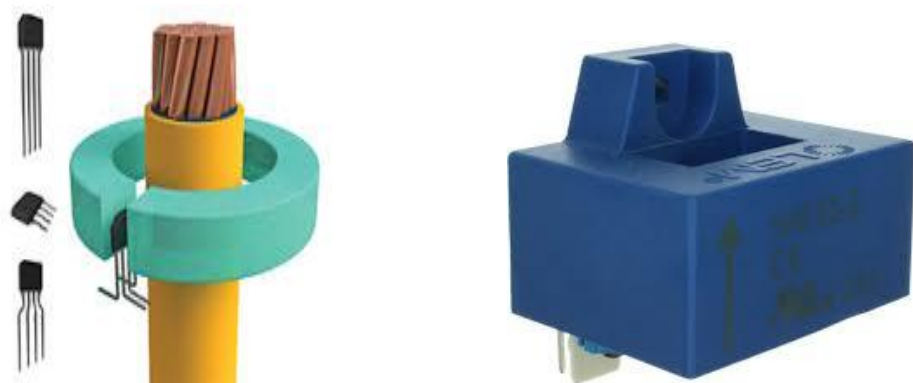


Рисунок 2.10 – Вигляд датчиків на основі ефекту Холла з відкритою петлею

Рисунок 2.11 показує будову датчика з розімкнутим контуром, що складається з таких компонентів: елемент Холла, тороїдальний (або прямокутний) сердечник з високою проникністю, електронні схеми для обробки сигналу.

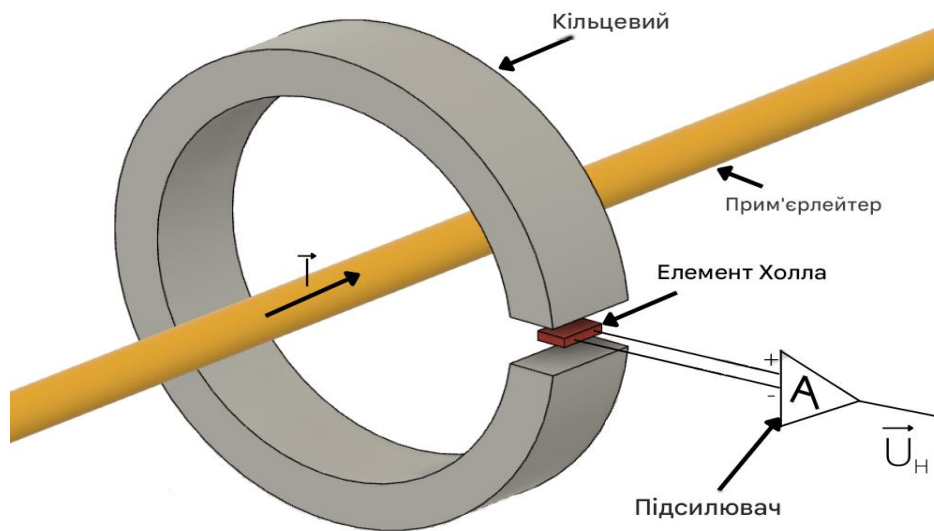


Рисунок 2.11 – Будова датчика Холла

Основний провід проходить через вікно датчика і створює магнітне поле під час протікання струму. Завдяки високій проникності μ тороїдальний сердечник значно підсилює магнітне поле. Елемент Холла розміщений у повітряному зазорі тороїдального сердечника і генерує напругу Холла, яка потім підсилюється та обробляється схемою обробки сигналу. Схема може бути дуже простою і лише підсилювати сигнал. Або можна використовувати складну схему компенсації, яка виправляє помилки в зміщенні сигналу або дрейфі ефекту Холла. Часто використовують диференційний підсилювач з високим коефіцієнтом підсилення, вхідним імпедансом та корекцією зміщення.

Датчики з розімкнутим контуром мають чудове співвідношення ціни та якості й ідеально підходять для застосувань, де потрібно мінімізувати енергоспоживання, розміри та вагу. Вони легкі, недорогі та не зазнають значних пошкоджень від надмірного перевантаження по струму.

2.3.2 Платинові терморезистори типу РТ1000

Платинові датчики температури належать до категорії датчиків температури, виготовлених за технологією тонкої плівки. Принцип вимірювання

базується на залежності опору від температури, крива та допустимий допуск якої визначені в міжнародному стандарті.

Датчики температури в основному використовуються в промисловому електричному вимірюванні температури в терморезистивних датчиках температури. Завдяки великому діапазону вимірювання, високій точності вимірювання та міцній конструкції датчики підходять для багатьох додаткових застосувань.

Платинові датчики температури доступні в різних версіях (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Вигляд платинового терморезистора

2.3.3 Мікроконтролер ARM Cortex-M7 серії STM32H7

Мікроконтролер серії STM32H7 на базі ядра ARM Cortex-M7 є найбільш потужним рішенням у своєму класі, що ідеально підходить для комп'ютерно-інтегрованих систем діагностики. Його архітектура побудована за принципом суперскалярного конвеєра, що дозволяє виконувати дві інструкції за один такт. Основною перевагою для ПТК діагностики є наявність розширеного набору інструкцій цифрової обробки сигналів (DSP) та вбудованого математичного прискорювача для операцій з плаваючою комою подвійної точності (FPU). Це критично важливо для виконання складних математичних операцій, таких як алгоритми швидкого перетворення Фур'є (FFT) та вейвлет-аналіз, безпосередньо в реальному часі.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		36

Контролер володіє високорівневою периферією, включаючи три швидкісні 16-бітні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), які можуть працювати синхронно. Це дозволяє реєструвати миттєві значення струмів у всіх трьох фазах двигуна Tesla одночасно, уникаючи фазового зсуву при аналізі вектора Парка. Наявність великого об'єму вбудованої оперативної пам'яті (до 1 МБ RAM) з архітектурою TCM (Tightly Coupled Memory) забезпечує детермінований час доступу до критично важливих даних, що гарантує стабільну роботу діагностичних алгоритмів навіть при максимальних обертах двигуна (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Вигляд контролера ARM Cortex-M7 (STM32H7)

Ця серія базується на 32-бітній ядрі Arm Cortex-M7, що працює на частоті до 600 МГц. Вона доступна в одно- та двоядерних версіях і демонструє найвищі в галузі результати тестів продуктивності серед мікроконтролерів на базі Cortex-M – до 3347 балів за шкалою CoreMark. Вона також підтримує виконання з внутрішньої та зовнішньої пам'яті з дешифруванням/шифруванням на льоту.

Серія STM32H7 пропонує вбудовану флеш-пам'ять об'ємом від 64 Кбайт до 2 Мбайт. Ця пам'ять базується на технології енергонезалежної пам'яті (NVM) компанії ST і виготовляється за 40-нм технологічним процесом.

Серія пропонує широкий вибір варіантів корпусів з кількістю виводів від 64 до 240. Ці варіанти включають корпуси QFN, WLCSP, LQFP та BGA, які представлені у 12 лінійках продуктів та доступні під понад 130 різними номерами деталей.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		37

Вона підтримує температуру навколишнього середовища від -40 °С до 125 °С, що робить її ідеальною для промислових та суворих умов експлуатації.

Одноядерні та економічні лінійки STM32H7 є сумісними за роз'ємами з серіями STM32F7 та STM32F4 для найпоширеніших корпусів.

Вони мають високу масштабованість та гнучкість пам'яті з вбудованою SRAM від 564 Кбайт до 1,4 Мбайт та дуже швидкими інтерфейсами зовнішньої пам'яті до 200 МГц.

2.3.4 П'єзоелектричний акселерометр ІЕРЕ

Вихідним сигналом датчика ІЕРЕ є напруга з низьким імпедансом, тоді як п'єзоелектричні датчики без вбудованої електроніки можуть генерувати лише зарядний сигнал. Підсилювач, що застосовується в датчику ІЕРЕ, може бути підсилювачем напруги або підсилювачем заряду (рисунок 2.14). Базова схема датчика ІЕРЕ, що працює в режимі напруги зображено на рисунку 2.15.



Рисунок 2.14 – Вигляд п'єзоелектричного акселерометра ІЕРЕ

Вихідним сигналом датчика ІЕРЕ є напруга з низьким імпедансом, тоді як п'єзоелектричні датчики без вбудованої електроніки можуть генерувати лише зарядний сигнал. Підсилювач, що застосовується в датчику ІЕРЕ, може бути підсилювачем напруги або підсилювачем заряду. Базова схема датчика ІЕРЕ, що працює в режимі напруги зображено на рисунку 2.15.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		38

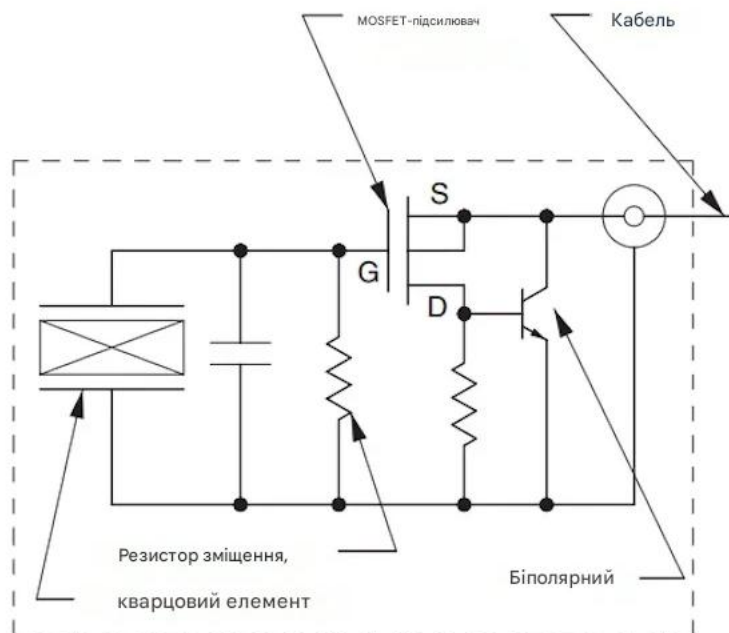


Рисунок 2.15 – Принцип роботи п'єзоелектричного акселерометра ІЕРЕ

Хоча в ІЕРЕ-датчиках напругового режиму можна використовувати як кварцові, так і п'єзокерамічні кристали, кварцові чутливі елементи, природно, краще підходять для обробки сигналів напругового режиму, оскільки мають меншу ємність і генерують більшу напругу при заданому заряді. Кварц є природним кристалом, тоді як кераміка – штучним матеріалом. Кераміка буває як з високою чутливістю до напруги, так і з високою чутливістю до заряду. П'єзокераміка з високою чутливістю до напруги також може використовуватися в датчиках ІЕРЕ в режимі напруги.

Як показано на рисунку 2.15, у першому каскаді підсилювача використовується польовий транзистор (FET) для забезпечення максимального входного опору підсилювача та запобігання утворенню шляху витоку заряду, що генерується датчиком. У вихідному каскаді підсилювача використовується біполярний транзистор для підвищення здатності керувати лінією передачі. На наведеному вище малюнку підсилювач має конфігурацію повторювача джерела з коефіцієнтом підсилення, рівним одиниці. Вивід джерела транзистора, а також вивід заземлення схеми виведені з корпусу датчика для підключення до блоку живлення за допомогою коаксіального кабелю.

2.3.5 Мережевий вузол CAN-FD Transceiver

Вузол мережі CAN-FD є складним пристроєм, де ключову роль відіграє взаємодія між мікроконтролером та фізичним трансивером. Мікроконтролер бере на себе логічну частину роботи, керуючи протоколом та обробляючи дані, тоді як трансивер виступає посередником, що перетворює ці цифрові сигнали на диференціальну напругу для передачі через фізичні дроти шини. Головною особливістю такої системи є підтримка технології Flexible Data Rate, яка дозволяє значно прискорювати передачу інформації безпосередньо у фазі даних, зберігаючи при цьому стабільну низьку швидкість під час арбітражу для надійної синхронізації всіх учасників мережі.

Завдяки розширенню обсягу одного кадру з восьми до шістдесяти чотирьох байтів, такі вузли значно ефективніше використовують пропускну здатність каналу зв'язку. Це особливо важливо в сучасній автомобільній електроніці та складній промисловій автоматичності, де обсяги системних даних постійно зростають. Сучасні трансивери також забезпечують високий рівень захисту від електромагнітних завад та коротких замикань, що гарантує цілісність сигналу навіть у складних умовах експлуатації. При цьому архітектура CAN-FD залишається зворотно сумісною з класичним протоколом CAN, що дозволяє поступово модернізувати існуючі системи без повної заміни всієї інфраструктури мережі (рисунок 2.16).

Головною перевагою CAN-FD є суттєве збільшення пропускну здатності мережі завдяки можливості передавати до 64 байтів даних в одному кадрі замість стандартних восьми. Це дозволяє значно знизити затримки в системі та ефективно передавати великі масиви інформації без необхідності розбивати їх на багато дрібних повідомлень. Динамічне перемикання швидкості під час передачі тіла повідомлення дозволяє прискорити обмін даними до десяти разів порівняно з класичним протоколом, зберігаючи при цьому надійність арбітражу. Крім того, CAN-FD зберігає високу стійкість до електромагнітних завад і підтримує зворотну сумісність із застарілим обладнанням у межах однієї змішаної мережі.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		40



Рисунок 2.16 – Вигляд мережевого вузла CAN-FD Transceiver

Водночас використання цієї технології має певні недоліки, серед яких найважливішим є підвищена чутливість до якості фізичної лінії зв'язку. Через високі швидкості передачі у фазі даних виникають жорсткі вимоги до топології мережі, довжини відгалужень та параметрів термінальних резисторів, щоб уникнути відбиттів сигналу. Впровадження CAN-FD також потребує дорожчої компонентної бази, оскільки стандартні контролери попереднього покоління фізично не здатні обробляти кадри нового формату. Також розробникам доводиться приділяти більше уваги програмній частині, адже збільшення довжини кадру та зміна алгоритмів обчислення контрольної суми CRC роблять налаштування стеків протоколів складнішим.

Для забезпечення стабільної роботи CAN-FD на високих швидкостях топологія мережі повинна бути максимально наближена до чистої «лінії» або «шини» з мінімальною кількістю відгалужень. Основна магістраль має закінчуватися термінальними резисторами номіналом 120 Ом з обох боків, що запобігає відбиттю сигналу, яке на швидкостях понад 2 Мбіт/с стає критичним і може повністю блокувати зв'язок. Будь-які відгалуження від основної лінії, так повинні бути максимально короткими, найкраще менш ніж 30 сантиметрів, оскільки довгі відводи створюють ємнісне навантаження та резонанси, що спотворюють форму сигналу.

Важливу роль відіграє вибір самого кабелю, де перевага надається екранованій витій парі з контрольованим хвильовим опором, що дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх завад. При переході на великі швидкості також необхідно враховувати затримку поширення сигналу в кабелі, тому загальна довжина шини при швидкості 5-8 Мбіт/с зазвичай обмежується 40 метрами. Також рекомендується використовувати метод розділеної термінації, де замість одного резистора на 120 Ом ставлять два по 60 Ом із конденсатором між ними, що допомагає ефективно фільтрувати високочастотні шуми безпосередньо в лінії.

2.4 Висновки до другого розділу

Таким чином, другий розділ кваліфікаційної роботи містить проектування програмно-технічного комплексу для автоматизації діагностики несправностей автомобіля, а саме:

- розроблено та показано характеристику роботи автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля;
- розроблено структурну схему програмно-технічного комплексу для автоматизації діагностування несправностей електродвигуна автомобіля;
- проведено вибір та обґрунтування потрібних елементів для ПТК для діагностування несправностей електродвигуна автомобіля на прикладі автомобіля Тесла.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		42

3 АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ

3.1 Розробка алгоритму роботи програмно-технічного комплексу

В основі роботи програмно-технічного комплексу лежить перехід від часових сигналів до частотних характеристик та порівняння їх із математичними еталонами. Процес обробки поділяється на кілька ключових етапів:

- попередня обробка та фільтрація;
- спектральний аналіз;
- векторний аналіз;
- статистичний аналіз та прийняття рішень;
- інтелектуальна класифікація.

Процес інтелектуального аналізу стану електродвигуна в межах програмно-технічного комплексу починається з етапу первинної цифрової фільтрації та кондиціонування сигналів. Оскільки силова електроніка сучасного автомобіля генерує значний рівень електромагнітних завад через роботу широтно-імпульсної модуляції інвертора, алгоритми попередньої обробки використовують цифрові фільтри низьких частот, як-от апроксимація за Баттервортом. Це дозволяє забезпечити максимально плоску амплітудно-частотну характеристику в робочій смузі частот і повністю відсікти паразитні гармоніки. Після фільтрації застосовується процедура програмної нормалізації, яка приводить амплітуди сигналів струму та вібрації до відносних одиниць, що дозволяє алгоритму коректно функціонувати незалежно від того, працює двигун на холостому ході чи під повним навантаженням.

Ключовим аналітичним інструментом системи є спектральний аналіз, реалізований через швидке перетворення Фур'є. Цей алгоритм переводить отримані в реальному часі масиви даних з часової області у частотну, формуючи унікальний спектральний відбиток агрегату. В частині діагностики електричного

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		43

кола застосовується метод MCSA (Motor Current Signature Analysis), де програмне забезпечення шукає специфічні бокові смуги навколо основної частоти живлення. Поява гармонік на частотах, що розраховуються як функція від ковзання ротора та кількості пазів, однозначно свідчить про наявність дефектів, таких як обрив стрижнів білячої клітки або міжвиткове замикання статора. Паралельно з цим алгоритми вібродіагностики аналізують високочастотні складові, де зростання амплітуд на характерних частотах перекошування тіл кочення дозволяє виявити мікротріщини в підшипниках на ранніх стадіях деградації.

Для оцінки загальної енергетичної симетрії та якості ізоляції комплекс використовує векторний аналіз на основі перетворення Парка. Алгоритм проектує миттєві значення трьох фазних струмів на обертову систему координат, формуючи векторну діаграму у вигляді кола. Будь-яка асиметрія в магнітній системі двигуна або пошкодження ізоляції призводить до деформації цієї фігури в еліпс. Програмний модуль безперервно розраховує ексцентриситет отриманого еліпса та зміщення його центру відносно початку координат, що є прямим діагностичним показником несиметрії обмоток. Такий підхід дозволяє автоматизації виявляти дефекти ще до моменту спрацювання релейного захисту за струмом, запобігаючи аварійному виходу двигуна з ладу.

Завершальний етап обробки базується на статистичних методах та алгоритмах прогнозування стану. Логічний блок системи виконує порівняння виділених діагностичних ознак із граничними значеннями, встановленими міжнародними стандартами вібраційної безпеки. Замість миттєвого реагування на випадкові сплески, алгоритм використовує методику ковзного середнього та трендовий аналіз для відстеження динаміки змін у часі. Якщо швидкість зростання середньоквадратичного значення вібрації або швидкості нагріву обмоток перевищує заданий градієнт, експертна система розраховує ймовірний час до досягнення критичного стану. Таким чином реалізується концепція предиктивного обслуговування, де програмне забезпечення не просто констатує поломку, а на основі накопичених логів формує прогноз залишкового ресурсу кожного вузла електродвигуна (рисунок 3.1).

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		44



Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи ПТК

3.2 Розробка програмного забезпечення контролера

Розробка програмного забезпечення (ПЗ) для контролера у складі програмно-технічного комплексу (ПТК) діагностики електродвигуна – це надзвичайно актуальне завдання. Контролер у такій системі виконує роль "першої лінії оборони": він збирає сирі дані з датчиків у реальному часі, проводить первинну фільтрацію і часто виконує базові алгоритми "fast diagnostics" (швидкої діагностики), щоб запобігти аварії ще до того, як дані дійдуть до верхнього рівня (ПК або хмари).

Нижче наведено структурований підхід до архітектури та етапів розробки такого ПЗ, зокрема:

- архітектура ПЗ контролера, тобто стек рівнів;
- основні функції, які має виконувати софт;
- процес розробки та інструменти.

Для забезпечення надійності та швидкодії ПЗ зазвичай будують за шаровою архітектурою, наприклад, за принципами AUTOSAR, якщо це автомобільний стандарт).

Драйвери та HAL (Hardware Abstraction Layer) є нижнім рівнем, який безпосередньо керує периферією мікроконтролера (наприклад, STM32G4, TI C2000 чи Infineon Aurix). Сюди входять драйвери АЦП (ADC), таймерів, CAN-інтерфейсу, SPI/I2C для датчиків.

Рівень ОС / Планувальника (RTOS) для автомобільних задач критично використовувати операційну систему реального часу, наприклад, FreeRTOS або Zephyr RTOS. Вона розбиває роботу на потоки (задачі) з різним пріоритетом (наприклад, зняття показників струму – кожні 100 мкс, вимірювання температури – кожні 10 мс, відправка CAN-повідомлення – кожні 50 ммс).

Рівень обробки сигналів (DSP), тобто фільтри (BIX/KIX), цифрове згладжування, обчислення діючих значень (RMS) струму та напруги.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		46

Прикладний рівень (Application Layer) безпосередньо алгоритми діагностики (виявлення міжвиткових замикань, ексцентриситету ротора тощо) та логіка зв'язку.

АЦП та збір даних (Data Acquisition), тобто контролер повинен зчитувати високі частоти, тому що діагностика за методами MCSA (Motor Current Signature Analysis) вимагає аналізу гармонік.

Струми фаз (I_A, I_B, I_C) зчитуються через датчики Холла або шунти.

Напруги фаз (U_A, U_B, U_C) для контролю балансу фаз.

Температура, тобто датчики NTC/PT100 у обмотках та підшипникових вузлах.

Оберти та положення ротора: Дані з енкодера або резолвера.

Вібрація: Зчитування даних з акселерометрів (часто через SPI/I2C інтерфейси).

Обробка сигналів та діагностичні алгоритми

Оскільки ресурси контролера обмежені (порівняно з ПК), на нього покладають базову математику:

Перетворення Кларк і Парк (Clarke/Park Transformations), тобто переведення трифазних струмів у обертову систему координат ($d - q$), що дозволяє оцінити якість керування двигуном та виявити асиметрію.

Швидке перетворення Фур'є (FFT), якщо контролер має DSP-ядро (або FPU), можна локально аналізувати спектр вібрації чи струму для пошуку дефектів підшипників або поломок стержнів ротора.

Контроль виходу за межі (Threshold monitoring), тобто миттєва реакція на перевищення струму (Overcurrent) чи перегрів.

Комунікація (Нервова система).

Контролер не працює в ізоляції. Він має передавати діагностичні звіти:

CAN-шина / CAN FD: Стандарт для авто. Використовуються протоколи типу UDS (ISO 14229) для передачі діагностичних кодів помилок (DTC).

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		47

Ethernet / Wi-Fi (опціонально для стендових ПТК), тобто якщо комплекс використовується в цеху для сервісної діагностики, дані можуть передаватися на ПК великими пакетами.

Методологія розробки такого програмного забезпечення зазвичай базується на V-моделі (проектування – кодування – тестування) (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Методологія розробки

Етап	Інструменти / Технології	Що створюється
Моделювання	MATLAB / Simulink	Створення математичної моделі двигуна та алгоритму діагностики, перевірка ідеї (MiL - Model-in-the-Loop).
Генерація коду / Написання	Embedded C / C++, STM32CubeIDE, Keil, Code Composer Studio	Написання чистого оптимізованого коду (часто з дотриманням стандарту MISRA C для автопрому).
Тестування на залізі	HIL (Hardware-in-the-Loop) стенди	Контролер підключається до симулятора двигуна, який імітує поломки (наприклад, обрив фази), і перевіряється реакція софту.

Для створення програмного забезпечення необхідно здійснити такі етапи:

- визначення архітектури заліза, тобто який мікроконтролер обрано та чи є у нього блоки апаратного обчислення тригонометрії (як CORDIC в STM32G4) чи DSP-інструкції;
- складання матриці помилок (Fault Matrix), тобто які саме дефекти двигуна софт контролера повинен ловити "на льоту", наприклад, коротке замикання – реакція < 1 мс, а які можна передати на верхній рівень для аналізу, наприклад, поступове зношення підшипника протягом місяця;
- налаштування таймінгів АЦП та ШІМ, бо для точної діагностики струму вимірювання мають бути синхронізовані з тактами роботи інвертора автомобіля, щоб уникнути комутаційних завад.

Під час розробки програмного забезпечення для контролера доцільним є використання MicroPython як основного інструменту для STM32H7. Також бібліотеку ulab, яка є ключовою для виконання FFT (швидкого перетворення Фур'є) на Python. Це дозволяє значно прискорити розробку складних математичних алгоритмів (FFT, MCSA), зберігаючи доступ до низькорівневої периферії через спеціалізовані модулі.

- переваги MicroPython для діагностичних систем:
- висока тактова частота STM32H7 (480 МГц) нівелює накладні витрати на інтерпретацію коду Python, дозволяючи реалізовувати;
- швидке прототипування фільтрів та методів аналізу сигналів.
- легка інтеграція з мережевими протоколами;
- динамічне оновлення алгоритмів без повної перепрошивки пристрою.

Реалізація ключових вузлів алгоритму включає робота з АЦП та збір даних, цифрову обробку сигналів (DSP), роботу з шиною CAN-FD, взаємодію з експертною системою, взаємодію з експертною системою.

Для аналізу фазних струмів використовується модуль machine.ADC. Завдяки високій розрядності АЦП STM32H7 (16 біт), MicroPython дозволяє отримувати прецизійні дані для подальшого спектрального аналізу.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		49

Оскільки стандартний Python повільний для великих масивів даних, у MicroPython для STM32H7 використовується бібліотека ulab (аналог NumPy). Вона дозволяє виконувати швидке перетворення Фур'є (FFT), використовуючи апаратні можливості ядра Cortex-M7.

```
import machine
import time
from ulab import numpy as np

# Ініціалізація АЦП для датчика струму та вібрації
adc_current = machine.ADC(machine.Pin('PC0')) # Фаза А
adc_vibro = machine.ADC(machine.Pin('PC1'))    # Акселерометр

def perform_diagnostic():
    # 1. Збір вибірки даних (Sampling)
    samples = np.array([adc_current.read_u16() for _ in
range(1024)])

    # 2. Обчислення FFT для виявлення дефектів ротора
    fft_result = np.fft.fft(samples)
    magnitude = np.abs(fft_result)

    # 3. Пошук аномальних гармонік
    if np.max(magnitude[50:100]) > THRESHOLD:
        send_alert("Критична вібрація або перекіс фаз!")

# Основний цикл
while True:
    perform_diagnostic()
    time.sleep_ms(100)
```

Для передачі даних у систему керування автомобілем використовується клас `pyb.CAN`. Контролер STM32H7 підтримує режим CAN-FD, що дозволяє передавати розширені діагностичні кадри зі швидкістю до 8 Мбіт/с.

Програмна реалізація на Python полегшує створення логічних умов для експертної системи. Використання словників (dict) та структур даних Python дозволяє зручно зберігати еталонні профілі двигуна та порівнювати їх із поточними значеннями в режимі реального часу.

Для критичних ділянок коду, наприклад, перетворення Парка-Кларка, де швидкість Python може бути недостатньою, MicroPython дозволяє

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		50

використовувати декоратор `@micropython.native` або вставки на мові C, що забезпечує виконання коду на швидкості, близькій до компільованого машинного коду.

Для критичних ділянок коду, де швидкість Python може бути недостатньою, MicroPython підтримує кілька рівнів оптимізації, зокрема використання нативної компіляції в Python. Декоратор `@micropython.native` змушує компілятор генерувати машинний код замість байт-коду:

```
@micropython.native
def clarke_transform(ia, ib, ic):
    # Швидке обчислення на рівні машинного коду
    alpha = ia
    beta = (ia + 2 * ib) * 0.57735026919 # 1/sqrt(3)
    return alpha, beta
```

Вставки на мові C (External C Modules)

Для максимальної продуктивності (наприклад, при обробці сигналів у перериваннях) створюються модулі на C. Нижче наведено приклад коду на C для перетворення Кларка, який можна скомпілювати як модуль для MicroPython:

```
#include "py/runtime.h"

// Функція реалізації перетворення Кларка на C
STATIC mp_obj_t motor_clarke(mp_obj_t ia_obj, mp_obj_t ib_obj) {
    float ia = mp_obj_get_float(ia_obj);
    float ib = mp_obj_get_float(ib_obj);

    float alpha = ia;
    float beta = (ia + 2.0f * ib) * 0.57735026919f;

    mp_obj_t tuple[2] = {
        mp_obj_new_float(alpha),
        mp_obj_new_float(beta)
    };
    return mp_obj_new_tuple(2, tuple);
}
MP_DEFINE_CONST_FUN_OBJ_2(motor_clarke_obj, motor_clarke);
```

Такий підхід дозволяє використовувати потужність ядра Cortex-M7 на 100%, забезпечуючи мінімальні затримки в контурах керування та діагностики.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		51

3.3 Розробка панелі користувача

Розробка панелі користувача для автомобільних діагностичних систем має свою специфіку: тут важливо не просто вивести цифри, а забезпечити інтерпретацію складних фізичних процесів, наприклад, спектрів вібрації чи гармонік струму) у зрозумілі підказки для інженера чи автомеханіка.

Нижче наведено структурований підхід до проектування та розробки такої панелі, який включає:

- визначення типу та платформи панелі;
- вибір технологічного стеку;
- архітектуру та UX/UI дизайн панелі;
- організація зв'язку, тобто як панель комунікує із програмно-технічним комплексом.

Залежно від того, де саме буде використовуватися ПТК, підхід до розробки інтерфейсу суттєво відрізняється:

- стендовий або цеховий варіант, тобто доцільним є використання стаціонарного персонального комп'ютера або ноутбука. Даний варіант найкраще підходить для глибокої діагностики під час сервісного обслуговування та дозволяє малювати складні 2D/3D графіки, наприклад, FFT-спектри;
- мобільний застосунок, який може використовуватись на планшеті та смартфоні, що є достатньо зручним для швидкої експрес-діагностики прямо біля автомобіля через Bluetooth/Wi-Fi;
- вбудована апаратна панель промисловий НМІ-екран) використовується, якщо комплекс оформлений як окремий закритий прилад (стенд);
- для діагностики електродвигунів критично важливою є швидкість оновлення даних (Real-time Rendering). Екран не повинен "зависати", коли контролер передає масив даних струму на частоті 10 кГц.

У таблиці 3.2 продемонстровано стек можливих технологій, що доцільно використовувати при розробці панелі користувача.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 3.2 Стек технологій

Напрямок розробки	Популярні інструменти	Плюси	Мінуси
Десктоп (Native)	C++ (Qt / QML)	Максимальна швидкодія, чудова робота з графіками, кросплатформеність.	Вища вартість та складність розробки.
Десктоп / Швидкий старт	Python (PyQt / PySide / DearPyGui)	Ідеально для інженерних задач, швидка інтеграція з математичними бібліотеками (NumPy, SciPy).	Трохи поступається native-коду у швидкодії на слабкому залізі.
Веб-орієнтований (Web-HMI)	React.js / Vue.js + WebSockets	Працює в будь-якому браузері, легко масштабується, гарний сучасний UI.	Потребує підняття веб-сервера на контролері (або проміжному ПК).

Загалом інтерфейс має будуватися за принципом від загального до детального, тобто користувач не повинен тонути в гігабайтах сирих даних АЦП.

Екран 1 або головний дашборд, що містить експрес-оцінку та його бачать першим і його метою є за 2 секунди дати відповідь на питання чи все добре із двигуном. Даний екран наповнений:

- візуальними індикаторами у вигляді світлофора, де зелений є нормою, жовтий (увага/граничний стан), червоний (аварійний стан);
- ключовими метриками (Gauges), що містять віртуальні круглі або лінійні шкали для відображення:
 - поточних обертів (RPM);
 - температури обмоток та підшипників;
 - загального рівня вібрації (СКВ віброшвидкості);
 - коефіцієнта корисної дії (КДД) або балансу фаз.

Екран 2 глибока аналітика (для інженерів).

Сюди переходять, якщо головний екран сигналізує про проблему.

- вікно FFT (швидкого перетворення Фур'є), тобто графік спектра струму або вібрації. Дефекти підшипників чи ексцентриситет ротора проявляються як специфічні «піки» на певних частотах;
- осцилограф, що містить відображення трифазної синусоїди струму в реальному часі для пошуку асиметрії обмоток;
- векторна діаграма, яка здійснює візуалізацію векторів струму та напруги (результат перетворення Кларк/Парк), що показує якість магнітного поля всередині двигуна.

Екран 3 із журналом помилок та звітами, що містить та забезпечує:

- автомобільні коди DTC, тобто виведення стандартних автомобільних кодів помилок, наприклад, по протоколу UDS ISO 14229, щоб діагност розумів, який саме вузол вийшов з ладу, наприклад: P0A78 – Drive Motor «А» Inverter Performance;
- генерація PDF-звітів через автоматичне формування «паспорта здоров'я» двигуна для клієнта.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		54

- панель користувача є Master-пристроєм, який запитує дані, а контролер – Slave-пристроєм, який їх віддає;
- протокол обміну, якщо це промислове виконання, використовують Modbus TCP або OPC UA. Якщо це суто автомобільний підхід (через CAN-bus адаптер), то верхній рівень розбирає CAN-кадри за допомогою файлів конфігурації бази даних (DBC файли).
- буферизація, тобто контролер має збирати високочастотні дані у буфер і відправляти їх "пакетами" (наприклад, по 512 або 1024 точки для FFT), інакше інтерфейс панелі просто захлинеється від надмірної кількості запитів.

Разом з тим доцільно зауважити про те, ще не потрібно виводити на екран значення, які змінюються занадто швидко для людського ока, наприклад, цифри струму, що змінюються безліч разів на секунду. Потрібно виводити усереднені (RMS) значення цифрою, а динаміку показуйте плавним графіком.

Для того, щоб результати складної діагностики (FFT, аналіз гармонік) були зрозумілі майстру-користувачу, необхідно візуалізувати дані через графічний інтерфейс. У MicroPython це реалізується за допомогою бібліотек для роботи з LCD-дисплеями (наприклад, `lvgl` або `st7789`).

Основні елементи візуалізації:

- світлофор стану, що передбачає використання зеленого (норма), жовтого (увага/знос), червоного (критична несправність);
- графіки спектра (FFT), де здійснюється візуальне відображення критичних точок, що вказують на конкретний підшипник або фазу;
- текстові підказки, тобто замість кодів помилок виводяться конкретні назви дефектів, наприклад, дисбаланс ротора або перегрів обмотки.

Приклад створення простої приладової панелі:

```
import lvgl as lv
# Приклад логіки відображення для майстра
if diagnostic_score > 90:
    status_label.set_text("СТАН: В НОРМІ")
    status_style.set_bg_color(lv.palette_main(lv.PALETTE.GREEN))
```

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		55

```
elif diagnostic_score > 60:
    status_label.set_text("УВАГА: ЗНОС ПІДШИПНИКА")
    status_style.set_bg_color(lv.palette_main(lv.PALETTE.YELLOW))
else:
    status_label.set_text("КРИТИЧНО: НЕГАЙНА ЗАМІНА")
    status_style.set_bg_color(lv.palette_main(lv.PALETTE.RED))
```

Такий підхід перетворює сирі дані з контролера у дієвий інструмент для технічного персоналу, дозволяючи проводити предиктивне обслуговування без глибоких знань у цифровій обробці сигналів.

Для візуалізації інтерфейсу майстра-автомеханіка (HMI - Human-Machine Interface) створено інтерактивний прототип.

Розроблюваний інтерфейс відображатиме:

- дашборд загального стану, що містить інтуїтивні колірні індикатори кольору світлофора;
- спектральний аналіз (FFT) тобто графічне представлення частот для візуалізації гармонік;
- векторну діаграму Парка, що дозволяє здійснювати візуалізацію симетрії фазних струмів.
- панель сповіщень, де розміщуються конкретні діагнози зрозумілою мовою замість кодів помилок (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Дашборд

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		56

Ключові особливості розробленого інтерфейсу:

- містить візуальну аналітику, тобто майстер бачить не просто цифри, а стан двигуна у відсотках та графік спектра (FFT), що дозволяє миттєво зрозуміти, чи є аномальні піки вібрації;
- спрощення діагнозу, де замість складних термінів блок Вердикт експерта дає прямі вказівки: перевірити мастило, норма, негайна заміна;
- містить векторну діаграму (коло Парка), де на вкладці аналізу відображається симетрія струмів. Якщо коло деформується в еліпс, то майстер візуально бачить несправність ізоляції або фаз;
- передбачає колірну індикацію, тобто використано систему світлофора (зелений, жовтий, червоний кольори), що є стандартом для промислової автоматизації (рисунок 3.3).

Цей прототип побудований на React з використанням Tailwind CSS для стилізації та Recharts для побудови графіків (рисунок 3.4).

У додатку А наведено лістинг коду для здійснення реалізації інтерфейсу.

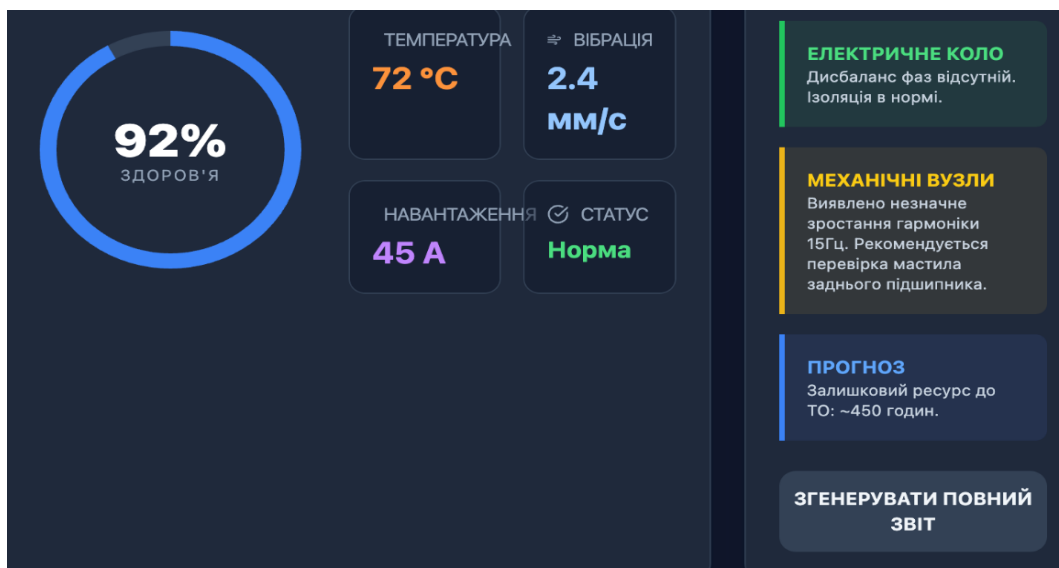


Рисунок 3.3 – Екран візуальної аналітики несправностей

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		57

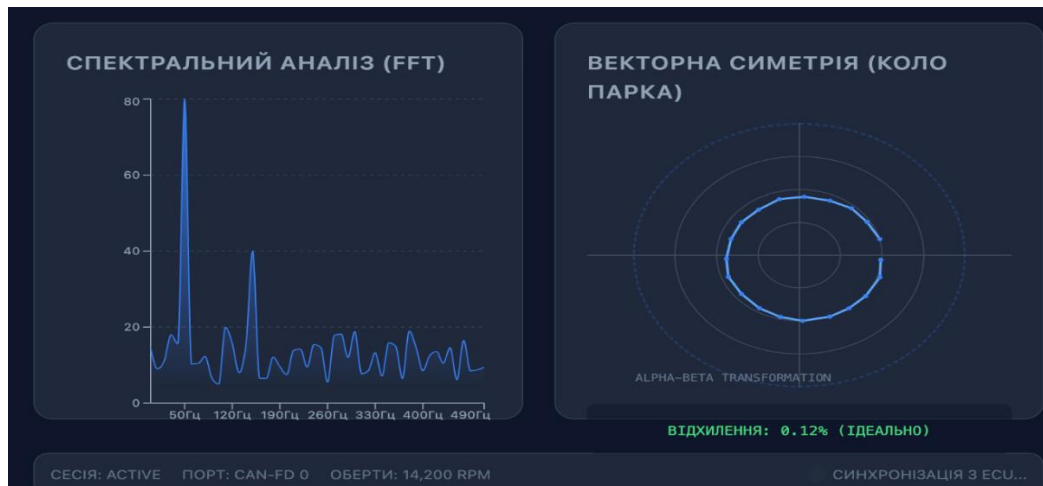


Рисунок 3.4 – Візуалізація графіків несправностей

3.4 Висновки до третього розділу

Отже, у результаті виконання даного розділу було спроектовано логічну структуру та візуальну оболонку програмно-технічного комплексу (ПТК) для діагностики електродвигунів. На основі проведеної роботи можна зробити такі висновки.

Ефективність алгоритмічних рішень полягає у тому, що був розроблений алгоритм роботи на базі мікроконтролера STM32H7 забезпечує високу швидкість обробки даних завдяки паралельному виконанню потоків (збір даних, FFT-аналіз та температурний моніторинг). Використання методів MCSA (аналіз спектра струмів) та перетворення Парка дозволяє виявляти несправності на стадіях, коли вони ще не проявляються фізично (наприклад, початкове руйнування ізоляції або мікротріщини в підшипниках).

Поєднання гнучкості MicroPython для логіки верхнього рівня та вставок на мові C для критичних обчислень дозволило досягти балансу між швидкістю розробки та продуктивністю системи в реальному часі. Це підтверджує можливість реалізації складних діагностичних систем на доступній елементній базі.

Розроблений інтерфейс користувача вирішує ключову проблему сучасної діагностики - надмірність даних. Завдяки візуалізації стану двигуна у відсотках та використанню системи індикаторів світлофор, майстер отримує не просто

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		58

графіки, а готовий вердикт. Це значно скорочує час на прийняття рішення та мінімізує ризик людської помилки.

Інтеграція експертної системи в інтерфейс дозволяє перейти від реактивного ремонту, тобто на тому етапі коли щось уже зламалося до предиктивного обслуговування. Система не лише фіксує поточний стан, а й прогнозує залишковий ресурс вузлів, що є критично важливим для високонавантажених двигунів, таких як у Tesla.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було спроектовано та науково обґрунтовано програмно-технічний комплекс (ПТК) для автоматизованої діагностики електродвигунів сучасних електромобілів (на прикладі Tesla). На основі отриманих результатів можна зробити такі підсумкові висновки:

Стрімкий розвиток електротранспорту та висока вартість обслуговування тягових агрегатів створюють гостру потребу в інтелектуальних системах моніторингу. Традиційні методи діагностики часто виявляють проблему лише після факту поломки. Розроблений у роботі підхід базується на принципах Industry 4.0 та предиктивного обслуговування, що дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати та підвищити безпеку використання електромобілів.

Визначено, що для діагностики високовиткових двигунів (до 20,000 об/хв) критичним є вибір швидкодіючої елементної бази. Використання мікроконтролера STM32H7 (Cortex-M7) з частотою 480 МГц та апаратними блоками DSP дозволяє обробляти складні сигнали в реальному часі. Вибір датчиків (LEM для струму, IEPЕ для вібрації та PT1000 для температури) забезпечує необхідну точність та завадостійкість в умовах сильних електромагнітних полів інвертора.

Доведено ефективність комбінованого підходу до аналізу:

- метод MCSA та перетворення Фур'є (FFT) дозволяють «бачити» стан ротора та обмоток через гармоніки струму;
- векторний аналіз (перетворення Кларка-Парка) надає миттєву інформацію про електричну симетрію системи.

Реалізація на MicroPython з використанням нативних вставок на мові C продемонструвала, що можна поєднати швидкість розробки високорівневого ПЗ із максимальною продуктивністю заліза.

Розроблений інтерфейс (HMI) перетворює складні математичні дані у зрозумілий для технічного персоналу формат. Впровадження системи «Здоров'я вузла» та автоматизованих вердиктів експертної системи дозволяє залучати до

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		60

діагностики майстрів без спеціальної підготовки в галузі цифрової обробки сигналів. Візуалізація через «Коло Парка» та спектрограми робить процес пошуку несправностей наочним та достовірним.

Спроектований ПТК є завершеним технічним рішенням, що відповідає сучасним вимогам автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Система готова до інтеграції в існуючу інфраструктуру сервісних центрів або безпосередньо в бортову мережу електромобіля через протокол CAN-FD, що відкриває шлях до створення «цифрових двійників» тягових електродвигунів.

					<i>КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		61

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. STM32H743xx Reference Manual. RM0433. Rev 9. Geneva : STMicroelectronics, 2024. 3154 p.
2. ISO 11898-1:2024. Road vehicles - Controller area network (CAN) - Part 1: Data link layer and physical signalling. Geneva : ISO, 2024. 82 p.
3. MicroPython Documentation. Library Reference v1.22. / MicroPython Team. 2024. URL: <https://docs.micropython.org/> (дата звернення: 11.05.2026).
4. STM32H7 Series Hardware Development Guide. AN4838. Rev 6. Geneva : STMicroelectronics, 2023. 64 p.
5. Ulab Documentation. High-performance numerical computing for MicroPython v6.0. 2024. URL: <https://micropython-ulab.readthedocs.io/> (дата звернення: 11.05.2026).
6. ISO 17359:2018 (reconfirmed 2023). Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines. Geneva : ISO, 2023. 36 p.
7. LVGL Library Documentation v9.1. Light and Versatile Graphics Library. 2024. URL: <https://docs.lvgl.io/> (дата звернення: 11.05.2026).
8. Cortex-M7 Devices Generic User Guide. Cambridge : ARM Ltd., 2023. 140 p.
9. SAE J2907_202302. Performance Curve of Electric Propulsion Units. Warrendale : SAE International, 2023. 30 p.
10. Munro L. Tesla Model Y Drive Unit Tear-down Analysis. Auburn Hills : Munro & Associates, 2021. 180 p.
11. ISO 20958:2023. Condition monitoring and diagnostics of machine systems – Electrical signature analysis of three-phase induction motors. Geneva : ISO, 2023. 40 p.
12. ISO 11898-1:2015. Road vehicles – Controller area network (CAN) – Part 1: Data link layer and physical signalling. Geneva : ISO, 2015. 74 p.
13. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Geneva : ISO, 2018. 32 p.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		62

14. ISO 20958:2013. Condition monitoring and diagnostics of machine systems – Electrical signature analysis of three-phase induction motors. Geneva : ISO, 2013. 28 p.
15. IEEE Std 1415-2001. IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis. New York : IEEE, 2002. 68 p.
16. CAN-FD Protocol Specification and Implementation Guide. / Vector Informatik GmbH. Stuttgart, 2023. 95 p.
17. RM0433 Reference Manual. STM32H743x1/I3/5x1/I7/x3/x5/x7 advanced Arm®-based 32-bit MCUs. STMicroelectronics, 2021. 3200 p. (Офіційне керівництво до вашого мікроконтролера).
18. AN4838 Application note. Managing STM32H7 Series hardware development. STMicroelectronics, 2023. 68 p.
19. Теоретичні основи електротехніки. Електричні коли: навч. посібник/В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. - 312 с.
20. Автоматизований електропривод типових промислових механізмів. Практикум і тестові завдання : навч. посіб. / Т. В. Коренькова, В. Г. Ковальчук, А. П. Калінов; Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Навчально-науковий інститут електричної інженерії та інформаційних технологій. - 2-ге вид., перероб. і допов. - Кременчук : Кременчуц. нац. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2023. - 189 с.
21. Benbouzid M. E. H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. Vol. 47, No. 5. P. 984–993.
22. Gao Z., Cecati C., Ding S. X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant control to electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62, No. 6. P. 3758–3768.
23. Мельников В. О. Дослідження методу відмовостійкого керування електротехнічними системами на базі частотно-керованого електропривода при пошкодженнях обмоток статора асинхронного двигуна методами математичного

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		63

модельовання / В. О. Мельников, А. П. Калінов // Електромех. і енергозберігаючі системи. - 2022. - № 1. - С. 8-15.

24. Choudhary, A., Fatima, S., & Panigrahi, B. K. (2022). State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2324-2347.

25. LI, Heng, et al. Fault Detection of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 2025, 17.14: 6322.

26. Zhang, Jiawei, et al. Energy storage management in electric vehicles. *Nature Reviews Clean Technology*, 2025, 1.2: 161-175.

27. Sundaram, K. Mohana, et al. Deep learning for fault diagnostics in bearings, insulators, PV panels, power lines, and electric vehicle applications—the state-of-the-art approaches. *IEEE Access*, 2021, 9: 41246-41260.

28. Mاتيолли, Guilherme, et al. Diagnosis and Prognosis of Faults in Electric Vehicle Batteries Based on Real Data and Industry 4.0 Technologies: A Systematic Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2026.

29. Huang, Bin, et al. Artificial-intelligence-based energy management strategies for hybrid electric vehicles: A comprehensive review. *Energies*, 2025, 18.14: 3600.

30. Ren, Yue, et al. A comprehensive review of key technologies for enhancing the reliability of lithium-ion power batteries. *Energies*, 2023, 16.17: 6144.

31. Wang, Qingbin, et al. Review of Fault Detection Approaches for Large-Scale Lithium-Ion Battery Systems: A Spatio-Temporal Perspective. *Batteries*, 2025, 11.11: 414.

32. Cao, Yunyu, et al. Fault diagnosis techniques for electrical distribution network based on artificial intelligence and signal processing: A review. *Processes*, 2024, 13.1: 48.

33. Wu, Liu, et al. The Usage of Big Data in Electric Vehicle Charging: A Comprehensive Review. *Energies*, 2025, 18.19: 5066.

34. Omakor, Joseph; MIAH, Md Suruz; CHAOUI, Hicham. Battery reliability assessment in electric vehicles: A state-of-the-art. *IEEE access*, 2024, 12: 77903-77931.

					КвРАКИТР.2023145.01.08.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		64

35. Eljarray, Oumayma, et al. Ensuring battery safety in electric vehicles: Challenges, developments, and future perspectives. *Small*, 2026, 22.12: 2503406.

36. Zhong, Dawei, et al. Artificial intelligence algorithms for hybrid electric powertrain system control: A review. *Energies*, 2025, 18.8: 2018.

37. Han, Pengyu, et al. Multi-condition fault diagnosis of dynamic systems: A survey, insights, and prospects. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025.

38. De la cruz, Jorge, et al. Fault location for distribution smart grids: Literature overview, challenges, solutions, and future trends. *Energies*, 2023, 16.5: 2280.

39. Slouma, Safa; Ben-Said Romdhane, Marwa; Skander-Mustapha, Sondes. Current State, Challenges, Recommendations and Prospects of Machine Learning Application in Fuel Cell Based Hybrid Electric Cars: A Comprehensive Overview. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2026, 14.1: 1-36.

					КвРАКІТР.2023145.01.08.ІІЗ	Арк.
Зм.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		65

ДОДАТОК А

Лістинг коду

```
import React, { useState, useEffect } from 'react';
import {
  Activity,
  AlertTriangle,
  CheckCircle,
  Thermometer,
  Gauge,
  Wind,
  Settings,
  History,
  Zap
} from 'lucide-react';
import {
  LineChart,
  Line,
  XAxis,
  YAxis,
  CartesianGrid,
  Tooltip,
  ResponsiveContainer,
  AreaChart,
  Area
} from 'recharts';

const App = () => {
  const [activeTab, setActiveTab] = useState('dashboard');
  const [motorData, setMotorData] = useState({
    temp: 72,
    vibro: 2.4,
    current: 45,
    health: 92,
    status: 'Норма'
  });

  // Генерація mock-даних для FFT (спектру)
  const fftData = Array.from({ length: 50 }, (_, i) => ({
    freq: i * 10,
    val: i === 5 ? 80 : (i === 15 ? 40 : Math.random() * 15 + 5)
  }));

  // Дані для векторної діаграми (коло Парка)
  const parkData = Array.from({ length: 20 }, (_, i) => {
    const angle = (i / 20) * Math.PI * 2;
    return {
      x: Math.cos(angle) * 10 + (Math.random() * 0.5),
      y: Math.sin(angle) * 10 + (Math.random() * 0.5)
    };
  });
};
```

```

    return (
      <div className="min-h-screen bg-slate-900 text-slate-100 font-
sans p-4 md:p-8">
        {/* Header */}
        <header className="flex flex-col md:flex-row justify-between
items-center mb-8 gap-4 border-b border-slate-700 pb-4">
          <div className="flex items-center gap-3">
            <div className="p-2 bg-blue-600 rounded-lg">
              <Zap size={32} className="text-white" />
            </div>
            <div>
              <h1 className="text-2xl font-bold tracking-tight">Tesla
Diagnostics Pro</h1>
              <p className="text-slate-400 text-sm">ПТК діагностики
електродвигунів v2.5</p>
            </div>
          </div>

          <div className="flex bg-slate-800 p-1 rounded-xl">
            <button
              onClick={() => setActiveTab('dashboard')}
              className={`px-4 py-2 rounded-lg transition ${activeTab
=== 'dashboard' ? 'bg-blue-600 text-white shadow-lg' : 'hover:bg-
slate-700 text-slate-400'}`}
            >
              Дашборд
            </button>
            <button
              onClick={() => setActiveTab('analysis')}
              className={`px-4 py-2 rounded-lg transition ${activeTab
=== 'analysis' ? 'bg-blue-600 text-white shadow-lg' : 'hover:bg-
slate-700 text-slate-400'}`}
            >
              Аналіз сигналів
            </button>
          </div>
        </header>

        {activeTab === 'dashboard' ? (
          <div className="grid grid-cols-1 md:grid-cols-3 gap-6">
            {/* Main Status Card */}
            <div className="md:col-span-2 bg-slate-800 rounded-2xl p-
6 border border-slate-700 shadow-xl">
              <div className="flex justify-between items-start mb-6">
                <h2 className="text-xl font-semibold flex items-
center gap-2">
                  <Activity className="text-blue-400" /> Стан
агрегату
                </h2>
                <span className="px-3 py-1 bg-green-500/20 text-
green-400 rounded-full text-xs font-bold border border-green-
500/30">
                  ОНЛАЙН

```

```

        </span>
      </div>

      <div className="flex flex-col md:flex-row items-center
gap-8 py-4">
        <div className="relative w-48 h-48 flex items-center
justify-center">
          <svg className="w-full h-full transform -rotate-
90">
            <circle cx="96" cy="96" r="88"
stroke="currentColor" strokeWidth="12" fill="transparent"
className="text-slate-700" />
            <circle cx="96" cy="96" r="88"
stroke="currentColor" strokeWidth="12" fill="transparent"
strokeDasharray={552.9} strokeDashoffset={552.9
* (1 - motorData.health / 100)}
className="text-blue-500 transition-all
duration-1000 ease-out"
/>
          </svg>
          <div className="absolute inset-0 flex flex-col
items-center justify-center text-center">
            <span className="text-4xl font-black text-
white">{motorData.health}%</span>
            <span className="text-xs text-slate-400 uppercase
tracking-widest">Здоров'я</span>
          </div>
        </div>

        <div className="flex-1 grid grid-cols-2 gap-4 w-
full">
          <div className="bg-slate-900/50 p-4 rounded-xl
border border-slate-700">
            <div className="flex items-center gap-2 text-
slate-400 text-sm mb-1 uppercase tracking-tighter">
              <Thermometer size={16} /> Температура
            </div>
            <div className="text-2xl font-bold text-orange-
400">{motorData.temp} °C</div>
          </div>
          <div className="bg-slate-900/50 p-4 rounded-xl
border border-slate-700">
            <div className="flex items-center gap-2 text-
slate-400 text-sm mb-1 uppercase tracking-tighter">
              <Wind size={16} /> Вібрація
            </div>
            <div className="text-2xl font-bold text-blue-
300">{motorData.vibro} мм/с</div>
          </div>
          <div className="bg-slate-900/50 p-4 rounded-xl
border border-slate-700">
            <div className="flex items-center gap-2 text-
slate-400 text-sm mb-1 uppercase tracking-tighter">

```

```

        <Gauge size={16} /> Навантаження
    </div>
    <div className="text-2xl font-bold text-purple-400">{motorData.current} A</div>
    </div>
    <div className="bg-slate-900/50 p-4 rounded-xl border border-slate-700">
        <div className="flex items-center gap-2 text-slate-400 text-sm mb-1 uppercase tracking-tighter">
            <CheckCircle size={16} /> Статус
        </div>
        <div className="text-lg font-bold text-green-400">{motorData.status}</div>
    </div>
</div>
</div>
</div>

{ /* Expert System Panel */ }
<div className="bg-slate-800 rounded-2xl p-6 border border-slate-700 shadow-xl flex flex-col">
    <h2 className="text-xl font-semibold mb-6 flex items-center gap-2">
        <AlertTriangle className="text-yellow-400" /> Вердикт експерта
    </h2>
    <div className="space-y-4 flex-1">
        <div className="p-4 bg-green-500/10 border-l-4 border-green-500 rounded-r-lg">
            <h4 className="font-bold text-green-400 text-sm">ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО</h4>
            <p className="text-xs text-slate-300">Дисбаланс фаз відсутній. Ізоляція в нормі.</p>
        </div>
        <div className="p-4 bg-yellow-500/10 border-l-4 border-yellow-500 rounded-r-lg">
            <h4 className="font-bold text-yellow-400 text-sm">МЕХАНІЧНІ ВУЗЛИ</h4>
            <p className="text-xs text-slate-300">Виявлено незначне зростання гармоніки 15Гц. Рекомендується перевірка мастила заднього підшипника.</p>
        </div>
        <div className="p-4 bg-blue-500/10 border-l-4 border-blue-500 rounded-r-lg">
            <h4 className="font-bold text-blue-400 text-sm">ПРОГНОЗ</h4>
            <p className="text-xs text-slate-300">Залишковий ресурс до ТО: ~450 годин.</p>
        </div>
    </div>
</div>

```

```

        <button className="w-full mt-6 py-3 bg-slate-700
hover:bg-slate-600 rounded-xl font-bold text-sm transition">
            ЗГЕHEПУВАТИ ПОВНИЙ ЗБИТ
        </button>
    </div>
</div>
) : (
    <div className="grid grid-cols-1 md:grid-cols-2 gap-6">
        { /* FFT Spectrum Chart */ }
        <div className="bg-slate-800 rounded-2xl p-6 border
border-slate-700 h-96">
            <h2 className="text-lg font-semibold mb-4 uppercase
text-slate-400 tracking-wider">Спектральний аналіз (FFT)</h2>
            <ResponsiveContainer width="100%" height="100%">
                <AreaChart data={fftData}>
                    <defs>
                        <linearGradient id="colorVal" x1="0" y1="0"
x2="0" y2="1">
                            <stop offset="5%" stopColor="#3b82f6"
stopOpacity={0.8}/>
                            <stop offset="95%" stopColor="#3b82f6"
stopOpacity={0}/>
                        </linearGradient>
                    </defs>
                    <CartesianGrid strokeDasharray="3 3"
stroke="#334155" vertical={false} />
                    <XAxis dataKey="freq" stroke="#94a3b8"
fontSize={10} unit="Гц" />
                    <YAxis stroke="#94a3b8" fontSize={10} />
                    <Tooltip
                        contentStyle={{ backgroundColor: '#1e293b',
border: '1px solid #334155', borderRadius: '8px' }}
                        itemStyle={{ color: '#3b82f6' }}
                    />
                    <Area type="monotone" dataKey="val"
stroke="#3b82f6" fillOpacity={1} fill="url(#colorVal)" />

```

```

        </AreaChart>
    </ResponsiveContainer>
</div>

    {/* Park's Circle (Vector Symmetry) */}
    <div className="bg-slate-800 rounded-2xl p-6 border
border-slate-700 h-96 flex flex-col">
        <h2 className="text-lg font-semibold mb-4 uppercase
text-slate-400 tracking-wider">Векторна симетрія (Коло Парка)</h2>
        <div className="flex-1 flex items-center justify-center
relative">
            {/* Polar Grid UI */}
            <div className="absolute inset-0 flex items-center
justify-center opacity-20 pointer-events-none">
                <div className="w-48 h-48 border border-slate-300
rounded-full" />
                <div className="absolute w-32 h-32 border border-
slate-300 rounded-full" />
                <div className="absolute w-16 h-16 border border-
slate-300 rounded-full" />
                <div className="absolute w-full h-px bg-slate-300"
/>
                <div className="absolute h-full w-px bg-slate-300"
/>
            </div>

            {/* The Data Visualization */}
            <div className="relative w-64 h-64 border-2 border-
dashed border-blue-500/20 rounded-full flex items-center justify-
center">
                <svg className="w-full h-full overflow-visible">
                    <polyline
                        fill="none"
                        stroke="#60a5fa"
                        strokeWidth="2"
                        points={parkData.map(d => `${d.x * 6 +
128},${d.y * 6 + 128}`).join(' ')}

```

```

        className="animate-pulse"
      />
      {parkData.map((d, i) => (
        <circle key={i} cx={d.x * 6 + 128} cy={d.y * 6
+ 128} r="2" fill="#3b82f6" />
      ))}
    </svg>
    <div className="absolute bottom-0 left-0 text-
[10px] text-slate-500 font-mono">
      ALPHA-BETA TRANSFORMATION
    </div>
  </div>
</div>
<div className="mt-4 p-3 bg-slate-900/50 rounded-lg
text-center">
  <span className="text-xs text-green-400 font-
mono">ВІДХИЛЕННЯ: 0.12% (ІДЕАЛЬНО)</span>
</div>
</div>
</div>
)}
<footer className="mt-8 bg-slate-800 rounded-xl p-3 border
border-slate-700 flex items-center justify-between text-xs text-
slate-500">
  <div className="flex gap-4">
    <span>CECІЯ: ACTIVE</span>
    <span>ПОПТ: CAN-FD 0</span>
    <span>ОБЕРТИ: 14,200 RPM</span>
  </div>
  <div className="flex items-center gap-2">
    <div className="w-2 h-2 bg-green-500 rounded-full
animate-ping" />
    СИНХРОНІЗАЦІЯ З ECU...
  </div>
</div>

```

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Волчанський Дмитро Олександрович

Тема: Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля.

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

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 65

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка програмно-технічного комплексу (ПТК) для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. В ході виконання кваліфікаційної роботи було охарактеризовано об'єкт автоматизації, розроблено структурну схему ПТК для автоматизації діагностики несправностей електродвигуна автомобіля. Також було проаналізовано та обрано потрібні пристрої для реалізації ПТК із подальшою розробкою алгоритмічного та програмного забезпечення програмно-технічного комплексу.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: Спроектований ПТК є завершеним технічним рішенням, що відповідає сучасним вимогам автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Система готова до інтеграції в існуючу інфраструктуру сервісних центрів або безпосередньо в бортову мережу електромобіля через протокол CAN-FD, що відкриває шлях до створення «цифрових двійників» тягових електродвигунів.
4. Позитивні сторони роботи: робота відзначається актуальністю тематики, обґрунтованим вибором апаратної платформи, комплексним підходом до розробки, а також практичною спрямованістю отриманих результатів.

5. Негативні сторони роботи: недостатньо детальний розгляд питань розширення функціональних можливостей системи.

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

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

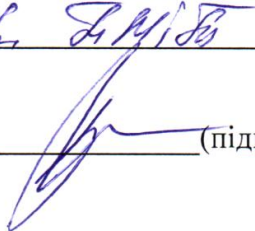
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (D166)

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

Бойко Юрій Михайлович, професор кафедри ІТМІБ

“13” 06 2026 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Людмилі КОРЕЦЬКІЙ
здобувача вищої освіти
Волчанського Дмитра Олександровича
факультет ІТ, курс ІІІ, група АКІТРс-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений. Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

02.06.2026/

дата

підпис

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Дмитро ВОЛЧАНСЬКИЙ

Співавтор:

Назва: КвР_Волчанський_плагіат_1 (2)

Експерт: Галина РАДЕЛЬЧУК

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 0.13%

Коефіцієнт подібності 2: 0%

Мікропробіли: 8

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-06-13 04:44:25.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☒ Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

☐ Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

☐ Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-06-13

Доцент Микола Федула

Дата

експерт

Anti-Plagiarism v-15.258 (global version)

The maximum coincidence with one document 1.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 9%

ID: 275031 Title: БКР Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля Added in a DB: 2026-06-12 Authors: Дмитро ВОЛЧАНСЬКИЙ Heads: Галина РАДЕЛЬЧУК Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	72982	568	1273 (2%)	18 (3%)

Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

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

Назва кваліфікаційної роботи: «Програмно-технічний комплекс для автоматизованої діагностики несправностей електродвигуна автомобіля»

Автор: Волчанський Дмитро Олександрович

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

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

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

Науковий керівник: Радельчук Галина Іванівна, кандидат технічних наук, доцент

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т. ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є академічним плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

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

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

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

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

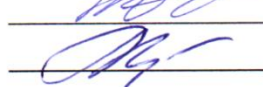
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає за K1 0,13 %, та за K2 0 %, що з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 13.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Людмила КОРЕЦЬКА

Юрій ФОРКУН

Галина РАДЕЛЬЧУК