

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Кафедра електричного транспорту

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ
ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Олександр КОСЯК

гр. СТ 2023-1у

Керівник:

Валерій ДОМАНСЬКИЙ

професор, д.т.н.

Харків – 2026


2

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра електричного транспорту
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Автоматизовані електротехнічні комплекси нафтогазової галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ
«17» червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Косяку Олександрю Ростиславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення надійності вентиляного електроприводу гібридного автомобіля

керівник бакалаврської
кваліфікаційної роботи

Валерій Тимофійович Доманський, професор, д.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом університету від «22» травня 2026 р. № 440 - 03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи 25.06.2026

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи матеріали переддипломної практики, технічні характеристики електричних транспортних засобів

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка) Аналіз надійності вентиляного електроприводу гібридного автомобіля.

4.2. Розробка технічного завдання (вибір та обґрунтування параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо)

Розробка технічного завдання на відмовостійкий електропривод.

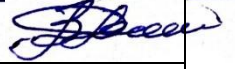
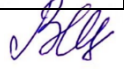
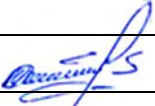
4.3 Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Розрахунки вентиляного електроприводу та оцінка надійності.

4.4. Охорона праці.

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

Класифікація відмов та логіка їх оброблення. Технічне завдання на відмовостійкий електропривод. Тяговий розрахунок і вибір двигуна. Розрахунок батареї, інвертора та аварійного режиму. Оцінка залишкової працездатності та показники надійності.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи


Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Валерій ДОМАНСЬКИЙ, професор		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інженер		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доцент		

7. Дата видачі завдання 15.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	15.05 – 20.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	21.05 – 25.05.2026	
3	Розрахункова частина	26.05 – 05.06.2026	
4	Охорона праці	01.06 – 09.06.2026	
5	Оформлення роботи	10.06 – 15.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	15.06 – 17.06.2026	

Здобувач


(підпис)

Олександр КОСЯК
(прізвище та ініціали)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Валерій ДОМАНСЬКИЙ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячено підвищенню надійності вентиляного електроприводу гібридного автомобіля за рахунок поєднання конструктивного резервування, діагностування відмов, обмеження аварійних режимів та коректного вибору елементів силової частини.

Об'єкт дослідження – вентиляний електропривод тягового призначення у складі гібридного автомобіля. Предмет дослідження – електромеханічні процеси, відмови силового перетворювача, обмоток, датчиків і алгоритми збереження працездатності після відмови однієї фази або елемента керування.

У роботі виконано аналіз розвитку гібридних транспортних засобів, тягових вентиляних електроприводів та методів відмовостійкого керування; сформовано технічне завдання; проведено розрахунок потужності, тягових параметрів, акумуляторної батареї, інвертора, показників надійності; розроблено заходи з охорони праці для робіт із високовольтною тяговою системою.

Ключові слова: гібридний автомобіль, вентиляний електропривод, синхронний двигун з постійними магнітами, BLDC, інвертор, IGBT, відмовостійке керування, обрив фази, надійність, охорона праці.

Сторінок – 45, таблиць – 13, рисунків – 7, формул – 25 ,

Графічна частина складається з 12 аркушів формату А4.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ.....	7
1.1 Стан розвитку гібридних автомобілів та тягових електроприводів	7
1.2 Види відмов вентильного електроприводу	10
1.3 Підходи до підвищення надійності та діагностування.....	12
2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ НА ВІДМОВОСТІЙКИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД	18
2.1 Вихідні дані та вимоги до системи.....	18
2.2 Функціональна структура електроприводу	20
2.3 Алгоритм керування та перевірки працездатності	23
3 РОЗРАХУНКИ ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ	27
3.1 Тяговий розрахунок і вибір двигуна	27
3.2 Розрахунок батареї, інвертора та аварійного режиму	29
3.3 Розрахунок показників надійності	33
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	36
4.1 Небезпечні фактори та організаційні заходи.....	36
4.2 Розрахунки освітлення, вентиляції та електробезпеки	37
ВИСНОВКИ.....	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	43

ВСТУП

Актуальність роботи визначається зростанням частки електрифікованого транспорту та ускладненням тягових електромеханічних систем. Гібридний автомобіль поєднує двигун внутрішнього згоряння, електричний накопичувач, силовий перетворювач та тяговий електродвигун. У такій структурі навіть короткочасна відмова інвертора, датчика струму або обмотки статора може призвести до втрати тяги, зменшення керованості й небезпечної зупинки транспортного засобу. Тому підвищення надійності вентильного електроприводу є не лише енергетичним, а й експлуатаційно-безпековим завданням.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати технічні рішення, що підвищують надійність вентильного електроприводу гібридного автомобіля без надмірного ускладнення конструкції та зі збереженням можливості руху в обмеженому аварійному режимі.

Для досягнення мети виділено чотири завдання, узгоджені зі структурою роботи:

- 1) виконати аналіз гібридного автомобіля, вентильного електроприводу та типових відмов;
- 2) розробити технічне завдання на відмовостійку тягову систему;
- 3) провести розрахунки силової частини, параметрів двигуна, інвертора, батареї та показників надійності;
- 4) сформулювати заходи з охорони праці та виконати необхідні розрахунки безпечних умов роботи.

Результати роботи були представлені у матеріалах XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 300 с. [1]

1 АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ГІБРИДНОГО АВТОМОБІЛЯ

1.1 Стан розвитку гібридних автомобілів та тягових електроприводів

Гібридний автомобіль є проміжною ланкою між традиційним автомобілем із двигуном внутрішнього згоряння та повністю електричним транспортним засобом. Його силова установка може працювати у послідовній, паралельній або комбінованій схемі. У послідовній схемі механічна енергія двигуна внутрішнього згоряння перетворюється генератором в електричну, а тяга створюється електродвигуном. У паралельній схемі обидва джерела моменту можуть бути механічно з'єднані з трансмісією. Комбінована схема дозволяє розподіляти потоки потужності залежно від швидкості, заряду батареї та режиму руху.

Тяговий електропривід у гібридному автомобілі працює в ширшому діапазоні режимів, ніж промисловий привід: пуск із великим моментом, різке прискорення, рекуперативне гальмування, часті зміни напрямку потоку енергії та значні температурні коливання. Саме тому система повинна мати не лише високий коефіцієнт корисної дії, а й гарантовану поведінку в умовах відмови окремих елементів [3], [12].

Найбільш поширеними типами тягових машин є асинхронний двигун, синхронний двигун з постійними магнітами та вентильний реактивний двигун. Для цієї роботи вентильний електропривід розглядається як система «електронний перетворювач – електрична машина – мікроконтролер – датчики», у якій комутація фаз виконується силовими напівпровідниковими ключами.

Вентильний електропривід має переваги для гібридного автомобіля: високий ККД, добру керованість моментом, можливість рекуперації, компактність та зменшені витрати на технічне обслуговування через відсутність колекторно-щіткового вузла. Однак переваги досягаються за рахунок складнішої силової електроніки. Інвертор, драйвери ключів, датчики струму і програмне

забезпечення стають критичними елементами, від яких залежить безперервність руху.

В українських роботах з електромобільності та гібридних силових установок підкреслюється необхідність комплексного аналізу електричної машини, накопичувача та перетворювача енергії. Зокрема, у роботах НТУ «ХПІ» розглядалося забезпечення стійкості вентильного електродвигуна конверсійного гібридного автомобіля, а в дисертаційних дослідженнях КПІ – керування тяговими електромеханічними системами з гібридними джерелами живлення [2], [3].

Європейські дослідження додатково акцентують увагу на багатофазних машинах, модульних електроприводах і відмовостійких інверторних топологіях. Такі рішення важливі для транспортних застосувань, оскільки дозволяють уникнути повної втрати тяги при одиничній відмові та реалізувати режим обмеженої працездатності [7], [11].

Таблиця 1.1 – Порівняння типів тягових електричних машин для гібридного автомобіля

Тип машини	Переваги	Обмеження для надійності
Асинхронний двигун	Відсутність постійних магнітів, стійкість до перевантажень	Вищі втрати у роторі, складніше забезпечити високий ККД на малих швидкостях
СДПМ / BLDC	Висока щільність потужності, високий ККД, точне керування моментом	Чутливість до перегріву магнітів, потреба у надійних датчиках і інверторі
Вентильний реактивний двигун	Проста конструкція ротора, потенційна відмовостійкість	Пульсації моменту, акустичний шум, складні алгоритми керування

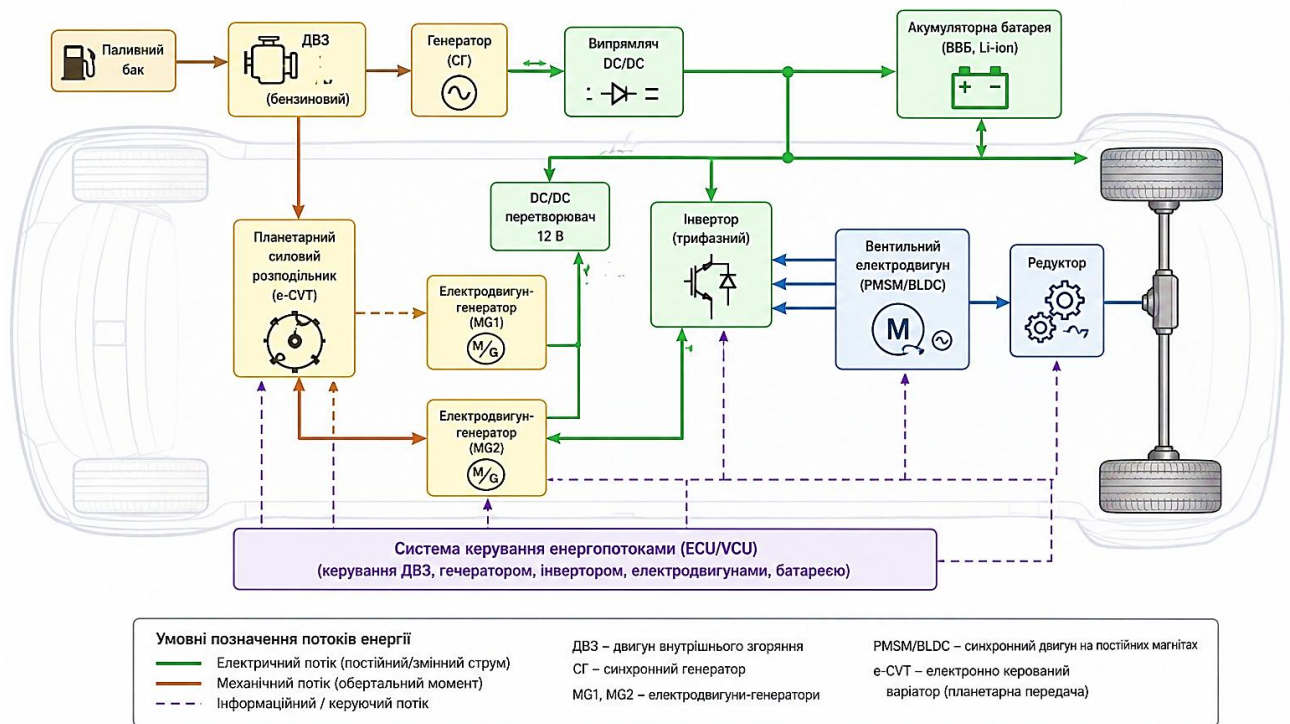


Рисунок 1.1 – Енергетична структура гібридного автомобіля з вентиляним електроприводом

На рисунку 1.1 показано узагальнену енергетичну структуру гібридного автомобіля. Джерело первинної енергії, накопичувач, DC-шина та інвертор формують електричну частину, а вентиляний двигун через трансмісію створює тяговий момент. Відмовостійкість у такій системі залежить не тільки від вибору електродвигуна, а й від якості контролю стану DC-шини, температури ключів, фазних струмів та стану ізоляції.

Для підвищення надійності доцільно розглядати не окремий двигун, а повну електромеханічну систему. Якщо відмова локалізується на рівні одного датчика або однієї фази, система повинна перейти до обмеженого режиму. Якщо відмова є критичною, наприклад коротке замикання силового ключа, потрібне швидке відключення з мінімізацією вторинних пошкоджень.

1.2 Види відмов вентиляного електроприводу

Типові відмови вентиляного електроприводу можна поділити на електричні, електронні, теплові, механічні та програмно-алгоритмічні. До електричних відмов належать обрив фази, міжвиткове коротке замикання, пробій ізоляції, деградація контактних з'єднань. До електронних – відкритий або короткозамкнений стан силового ключа, відмова драйвера, пошкодження датчика струму, напруги чи положення ротора. Теплові відмови пов'язані з перегрівом обмоток, магнітів, IGBT-модуля або конденсаторів DC-шини.

Для гібридного автомобіля особливо небезпечними є відмови, які різко змінюють момент на валу. Втрата однієї фази не завжди зупиняє двигун, проте створює асиметрію струмів, пульсації моменту і додатковий нагрів. Відмова датчика положення ротора може призвести до помилки комутації, а помилка датчика струму – до некоректного обмеження перевантаження.

Таблиця 1.2 – Класифікація відмов вентиляного електроприводу та їх наслідки

Група відмов	Приклад	Наслідок	Рекомендована реакція
Силова електроніка	Обрив IGBT або драйвера	Втрата керування фазою, пульсації моменту	Діагностика, блокування ключа, аварійне керування
Електрична машина	Обрив фази статора	Зниження моменту, нагрів сусідніх фаз	Двофазний режим з обмеженням струму
Датчики	Відмова датчика струму	Помилка оцінки навантаження	Перехід на спостерігач або резервний канал
Теплова система	Порушення охолодження	Перегрів інвертора і обмоток	Зменшення потужності, аварійна зупинка
Програмне забезпечення	Помилка алгоритму ШІМ	Нестабільний момент, перевантаження	Контроль станів, сторожовий таймер

Аналіз таблиці 1.2 показує, що більшість одиничних відмов може бути виявлена за непрямими ознаками: зростанням різниці фазних струмів, зменшенням середньої потужності, появою пульсацій моменту, підвищенням температури або неузгодженістю команд ШІМ із фактичними напругами. Тому система діагностики повинна працювати паралельно з основним контуром керування і не повинна потребувати складних додаткових датчиків.

Для автомобіля основна функція у післяаварійному режимі – забезпечити керований рух із обмеженою потужністю до безпечного місця зупинки або сервісу.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

де $R(t)$ – імовірність безвідмовної роботи за час t ;

λ – інтенсивність відмов елемента або системи.

Для послідовної структури, де відмова будь-якого критичного елемента зупиняє систему, сумарна інтенсивність відмов визначається як сума інтенсивностей окремих елементів.

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n \quad (1.2)$$

Рисунок 1.2 демонструє, що діагностування не повинно завершуватися лише фіксацією факту відмови. Після виявлення відхилення контролер повинен класифікувати відмову, оцінити допустимий залишковий струм, перерахувати завдання фазних струмів і повідомити водія про обмеження режиму. Якщо відмова належить до категорії небезпечних коротких замикань, потрібне відключення головного контактора і розрядження DC-шини.

Для вентильного електроприводу гібридного автомобіля доцільно застосувати багаторівневу реакцію: попередження, обмеження потужності, аварійний двофазний режим і повне відключення. Такий підхід дозволяє не ускладнювати базову конструкцію, але підвищує функціональну безпеку за рахунок програмної реструктуризації керування [8], [10].

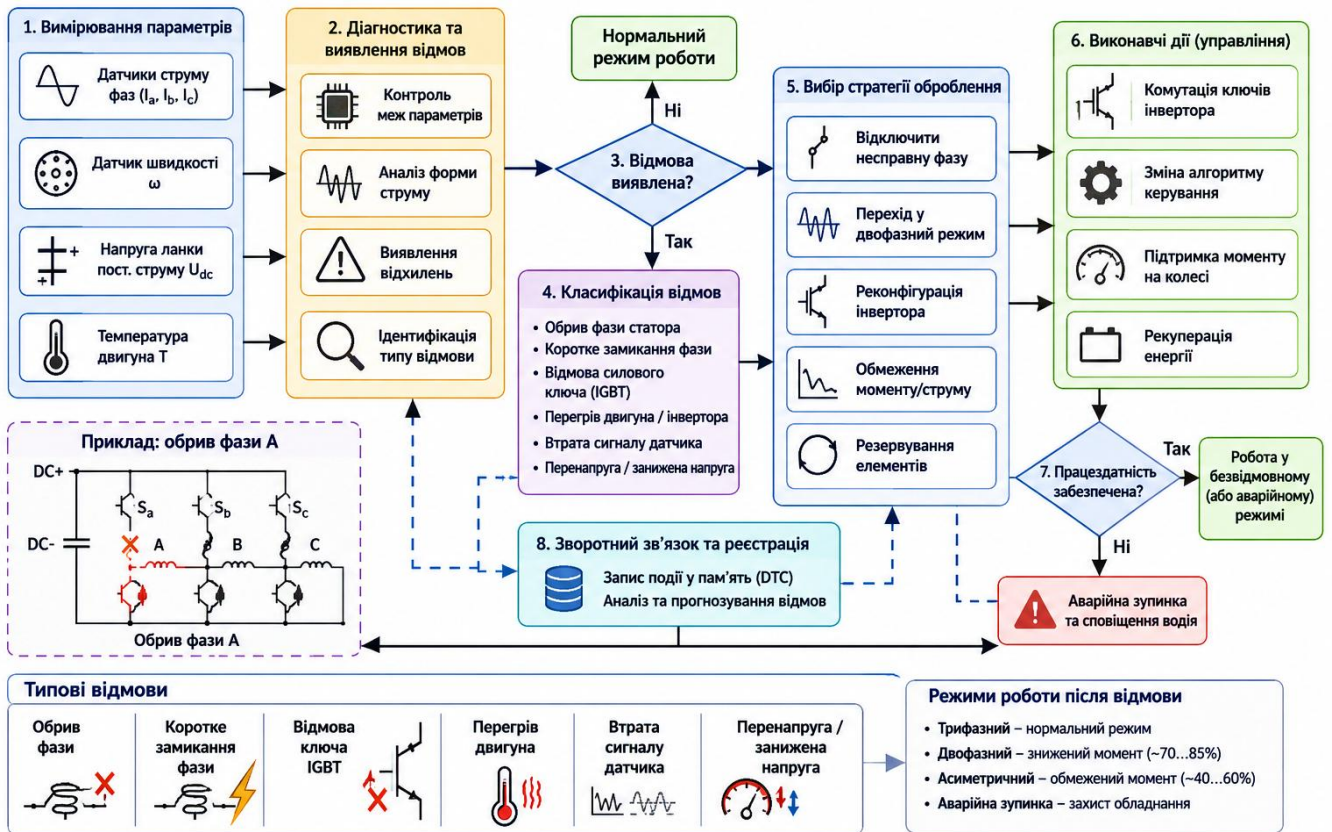


Рисунок 1.2 – Логіка оброблення типових відмов електроприводу

1.3 Підходи до підвищення надійності та діагностування

Підвищення надійності може виконуватися апаратними, алгоритмічними та експлуатаційними методами. Апаратні методи включають використання елементів із запасом за струмом і напругою, резервування датчиків, застосування багатофазної машини, додаткової гілки інвертора або незалежних модулів живлення. Алгоритмічні методи ґрунтуються на векторному керуванні, спостерігачах стану, діагностичних індикаторах, перерахунку струмів у післяаварійному режимі та обмеженні теплового навантаження.

Для гібридного автомобіля найбільш раціональним є поєднання помірного апаратного запасу та алгоритмічного відновлення працездатності. Повне резервування інвертора збільшує масу, вартість і тепловиділення, тоді як програмне керування при обриві фази може бути реалізоване на наявному мікроконтролері. Європейські дослідження багатофазних та багатомоторних приводів підтверджують, що відмовостійкість може досягатися не тільки дублюванням усіх елементів, а й оптимальною топологією та керуванням [7],

[11]. Середній напруження на відмову МТВФ є зручною інтегральною оцінкою, але для транспортного електроприводу її потрібно доповнювати показником готовності, оскільки сервісний час відновлення також впливає на експлуатаційну придатність.

Діагностика обриву фази може бути побудована на порівнянні миттєвих або діючих значень фазних струмів. Якщо одна фаза має струм, близький до нуля, а дві інші залишаються навантаженими, контролер фіксує open-phase fault. Для виключення помилкового спрацювання потрібно враховувати режим малих навантажень, перехідні процеси та період ШІМ.

$$\delta_i = \frac{|I_a + I_b + I_c|}{I_{ном}} \quad (1.3)$$

де δ_i – нормований індикатор несиметрії струмів.

Для справної трифазної системи з ізольованою нейтраллю сума миттєвих фазних струмів близька до нуля. Зростання δ_i вище порогового значення свідчить про втрату симетрії або помилку вимірювання.

Іншим важливим індикатором є теплове навантаження. Навіть якщо двигун продовжує обертання після відмови, нерівномірний струм може перегріти справні фази. Тому аварійний алгоритм повинен мати теплове обмеження, яке зменшує допустимий момент при підвищенні температури обмотки або силового модуля.

$$T_j = T_c + P_{loss} \cdot R_{th(j-c)} \quad (1.4)$$

T_j – температура переходу напівпровідникового елемента, °С;

T_c – температура корпусу транзистора або діода, °С;

P_{loss} – потужність втрат у напівпровідниковому елементі, Вт;

$R_{th(j-c)}$ – тепловий опір між p-n переходом і корпусом, °С/Вт.

Відмовостійке керування після обриву фази повинно вирішувати три задачі: зберегти середній електромагнітний момент, обмежити пульсації та не перевищити допустимі струми справних фаз. У трифазній машині без додаткової нейтральної гілки повна компенсація втраченої фази неможлива, тому реальним є режим обмеженої потужності. Якщо конструкція має доступ до нейтральної точки або додаткову гілку інвертора, можливості післяаварійного керування розширюються [8].

У транспортній системі допустиме короточасне зниження динаміки. Водій повинен отримати повідомлення про несправність, а контролер – перейти до профілю «limp-home», який обмежує максимальний момент, швидкість і рекупераційний струм. Такий режим підвищує експлуатаційну безпеку, тому що автомобіль не втрачає керованість раптово.

Таблиця 1.3 – Порівняння методів підвищення надійності електроприводу

Метод	Перевага	Недолік	Доцільність у роботі
Запас за струмом і напругою	Просте впровадження	Збільшення вартості	Обов'язково
Резервний датчик струму	Підвищення достовірності	Додаткові входи контролера	Доцільно для тягової системи
Четверта гілка інвертора	Краща компенсація відмови	Маса, вартість, складність	Як перспективне рішення
Двофазний режим	Не потребує повної заміни схеми	Обмежена потужність	Приймається як базовий
Теплове дерейтинг-керування	Захист від вторинних відмов	Потрібні датчики температури	Обов'язково

Сучасний підхід до надійності електроприводу гібридного автомобіля передбачає, що відмова не є одиничною подією, а процесом. Наприклад, деградація конденсатора DC-шини викликає збільшення пульсацій напруги, що підвищує теплове навантаження IGBT-модуля. Перегрів модуля прискорює старіння напівпровідника, а помилка датчика температури може приховати

критичний стан. Тому діагностика повинна аналізувати тренди, а не тільки граничні значення.

Для практичної реалізації у роботі прийнято такі принципи: контролювати струми всіх фаз, напругу DC-шини, температуру інвертора та обмоток; обмежувати швидкість наростання струму; фіксувати код відмови; застосовувати аварійний профіль керування; забезпечити захист від повторного запуску без підтвердження стану системи. Такі заходи не замінюють якісного апаратного проектування, але значно зменшують імовірність небезпечного розвитку відмови.

Розглянута тема також пов'язана з енергоефективністю. Надійний електропривід не повинен працювати з великим запасом у всіх режимах, оскільки це призводить до перевитрати маси і вартості. Оптимальним є розумний запас елементів у поєднанні з адаптивним керуванням, яке зменшує навантаження тільки тоді, коли це необхідно для збереження ресурсу.

Вибір вентиляного електроприводу для гібридного автомобіля обґрунтовується тим, що він забезпечує високий момент на малих швидкостях, широкий діапазон регулювання, можливість рекуперативного гальмування та інтеграцію з електронною системою керування. Порівняльні роботи щодо тягових двигунів для гібридних транспортних засобів показують, що машини з постійними магнітами та вентиляні реактивні машини є конкурентними для електрифікованих силових установок [4].

Недоліком приводу з постійними магнітами є ризик розмагнічування при перегріві та висока залежність від силової електроніки. Відмовостійкість у такому випадку повинна забезпечуватися не збільшенням габаритів двигуна, а правильним тепловим режимом, захистом інвертора, обмеженням струму та виявленням несиметрії.

У межах цієї роботи підвищення надійності розглядається у трьох площинах: конструктивна – вибір елементів із запасом і захистом; алгоритмічна – діагностика і аварійне керування; експлуатаційна – регламент перевірок, умови

обслуговування та охорона праці. Такий поділ дає змогу перейти від загального аналізу до конкретного технічного завдання і розрахунків.

Після відмови однієї фази трифазний вентильний двигун втрачає симетрію магніторухливих сил. Якщо продовжити звичайне трифазне керування, у справних фазах можуть виникнути перевантаження, а момент стане пульсуючим. Аварійний алгоритм повинен виключити несправний канал із розрахунку та сформувати допустимі струми у двох справних фазах.

Прийнято консервативний підхід: аварійний режим не призначений для тривалого руху з номінальною швидкістю, а використовується для безпечного завершення маневру або руху до місця ремонту. Для запобігання вторинним відмовам обмежується струм інвертора, зменшується максимальний момент, відключається агресивна рекуперація і вводиться контроль температури.

Така логіка узгоджується з дослідженнями fault-tolerant PMSM drives, де підкреслено, що аварійне керування повинно одночасно враховувати електромагнітний момент, струмові обмеження та теплові втрати [8], [10]. У гібридному автомобілі додатковою перевагою є можливість часткового покриття тягової потреби двигуном внутрішнього згоряння або генераторною частиною силової установки.

Для подальших розрахунків прийнято, що електропривід повинен мати номінальну потужність 80 кВт, живитися від DC-шини 288 В, забезпечувати роботу у нормальному режимі та підтримувати обмежений аварійний режим при обриві однієї фази або відмові одного датчика струму. Такий рівень потужності відповідає легковому гібридному автомобілю середнього класу та дозволяє виконати тягові розрахунки з достатнім запасом.

Основні критерії надійності: відсутність повної втрати тяги при одиничній некритичній відмові; відключення при небезпечній відмові силового ключа; збереження теплової стабільності; інформування водія; можливість діагностики на сервісі. У роботі не ставиться задача створення повністю автономної системи функціональної безпеки рівня серійного автомобіля, але формується інженерно обґрунтована структура для підвищення надійності дипломного проєкту.

Отже, аналіз показує, що ключовим напрямом є не заміна вентильного електроприводу іншим типом машини, а вдосконалення його структури керування, захисту і розрахункового вибору елементів.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ НА ВІДМОВОСТІЙКИЙ ЕЛЕКТРОПРИВІД

2.1 Вихідні дані та вимоги до системи

Метою технічного завдання є визначення параметрів вентиляного електроприводу, який може бути застосований у гібридному автомобілі середнього класу та має підвищену надійність. Електропривід повинен забезпечувати основний тяговий режим, рекуперативне гальмування, діагностування основних відмов і аварійний режим руху зі зниженою потужністю.

Обраний варіант структури передбачає акумуляторну батарею, головний запобіжник, контактор, контур попереднього заряджання, конденсатор DC-шини, трифазний інвертор, вентиляний електродвигун, датчики струму, напруги, температури та мікроконтролер. Для підвищення надійності обов'язковими є контроль несиметрії фазних струмів, температурний дерейтинг і реєстрація кодів відмов.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для технічного завдання

Параметр	Прийняте значення	Пояснення
Тип транспортного засобу	Гібридний легковий автомобіль	Міський та приміський режим руху
Маса автомобіля, т	1530 кг	З урахуванням батареї та пасажирів
Номінальна потужність ВД	80 кВт	За результатами тягового розрахунку
Напруга DC-шини	288 В	Сумісність із батарейним блоком
Аварійний режим	Двофазний, обмежений	Рух до безпечної зупинки або сервісу

Технічне завдання повинно враховувати специфіку гібридного автомобіля. На відміну від стаціонарного приводу, тяговий електропривід працює при вібраціях, змінній температурі, частих пусках і гальмуваннях. Тому до

конструкції висуваються вимоги механічної міцності, електромагнітної сумісності, захисту від вологи та пилу, а також стійкості до короткочасних перевантажень.

Номінальні параметри повинні доповнюватися аварійними. У технічному завданні задається, що при некритичній відмові електропривід не повинен створювати некерованого моменту. Замість цього він має перейти до обмеження струму і потужності. Якщо зафіксовано коротке замикання ключа, пробій ізоляції або перевищення температури, система повинна виконати безпечне вимкнення.

Таблиця 2.2 – Вимоги до нормального та аварійного режимів

Показник	Нормальний режим	Аварійний режим
Потужність	80 кВт короткочасно, 50–60 кВт тривало	не більше 45–50 кВт
Фазний струм	за паспортом інвертора	зниження до допустимого теплового рівня
Рекуперація	дозволена за SOC і температурою	обмежена або вимкнена
Повідомлення водія	необов'язкове	обов'язкове на панелі керування
Повторний запуск	дозволений	після самодіагностики і запису коду

$$k_{\text{зап}} = \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{розр}}} \quad (2.1)$$

Коефіцієнт запасу $k_{\text{зап}}$ для силових ключів і провідників повинен бути більшим за одиницю з урахуванням пускових струмів, температури та старіння ізоляції.

2.2 Функціональна структура електроприводу

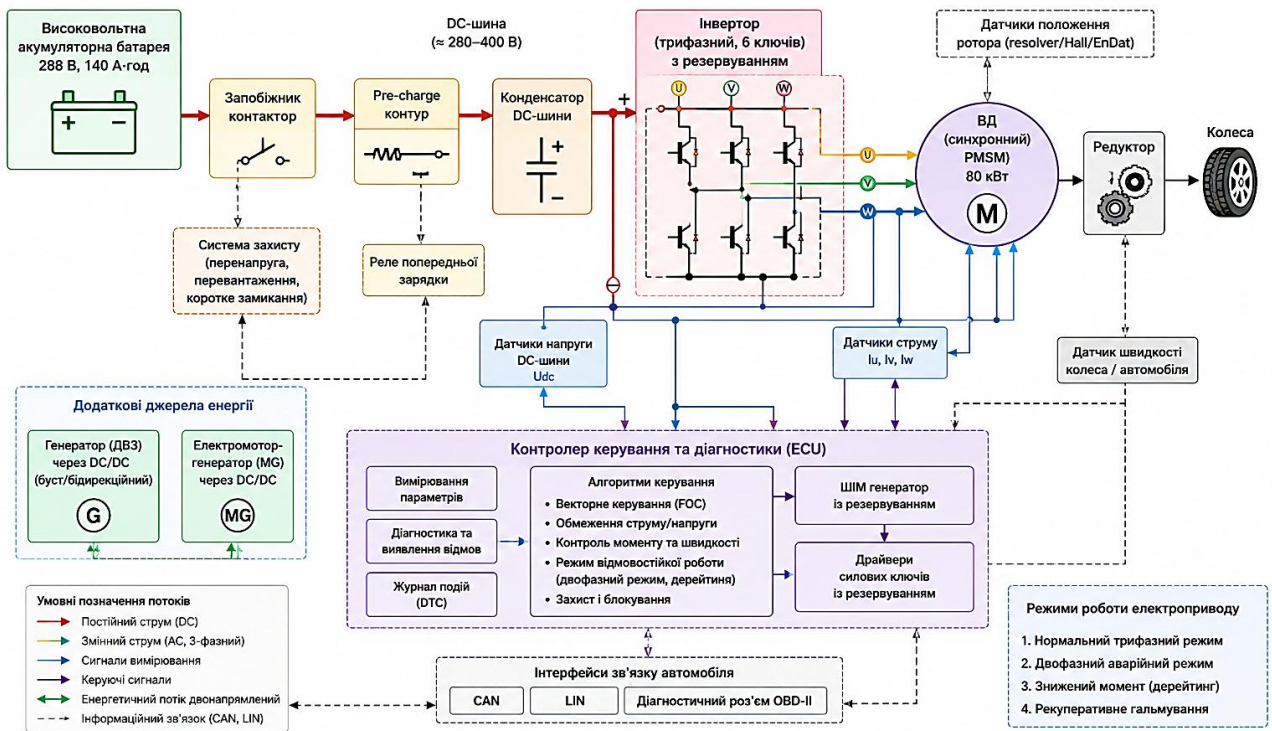


Рисунок 2.1 – Функціональна схема відмовостійкого вентильного електроприводу гібридного автомобіля

Функціональна структура на рисунку 2.1 відображає взаємодію основних вузлів. Акумуляторна батарея живить DC-шину через захист і контактор. Контур попереднього заряджання обмежує кидок струму при зарядженні конденсатора. Інвертор формує трифазну напругу для вентильного двигуна, а контролер отримує сигнали датчиків і формує ШІМ-команди.

У нормальному режимі контролер реалізує векторне або трапецієподібне керування залежно від типу вентильного двигуна. У режимі рекуперації напрям потоку енергії змінюється: механічна енергія коліс перетворюється в електричну і повертається до батареї. Умовами рекуперації є допустимий заряд батареї, температура елементів і справність інвертора.

Для підвищення надійності в технічному завданні передбачено чотири канали контролю: фазні струми, напруга DC-шини, температура силового модуля та температура двигуна. Додатково контролюється частота обертання і положення ротора. Якщо датчик положення недоступний, у перспективі може

застосовуватися бездатчиковий спостерігач, але у цій роботі основним варіантом залишається датчикове керування.

$$U_{dc,розр} \geq 1,2 \cdot U_{dc,max} \quad (2.2)$$

Формула (2.2) задає вимогу до допустимої напруги елементів DC-шини. Запас 20 % необхідний для врахування перенапруг при рекуперації та комутаційних процесах. Для підвищеної надійності силовий модуль доцільно обирати не на межі робочої напруги, а з класом 600 В або 1200 В залежно від доступної елементної бази.

Акумуляторна батарея повинна забезпечувати не лише енергетичний запас, а й допустимий піковий струм. Для гібридного автомобіля важливим є режим високої потужності протягом короткого часу, тому батарея повинна мати достатню C-rate характеристику. У технічному завданні прийнято батарейний блок 288 В, 140 А·год. Його енергоемність становить близько 40,3 кВт·год, що дозволяє виконати міський електричний пробіг і мати резерв для аварійного режиму.

$$E_{бат} = \frac{U_{бат} \cdot C_{бат}}{1000} \quad (2.3)$$

де $E_{бат}$ – енергія батареї, кВт·год;

$U_{бат}$ – номінальна напруга, В;

$C_{бат}$ – ємність, А·год.

Для прийнятих даних $E_{бат} = 288 \cdot 140 / 1000 = 40,32$ кВт·год.

Контактор і запобіжник вибираються за максимальним струмом батареї та здатністю відключення короткого замикання. Контур попереднього заряджання повинен зменшити кидок струму на конденсаторі DC-шини. Його наявність є обов'язковою, оскільки повторні струмові удари прискорюють деградацію контактів і конденсаторів.

Вентильний електродвигун вибирається за потужністю, моментом, максимальною швидкістю, режимом охолодження та допустимою температурою обмоток. Для гібридного автомобіля доцільна машина потужністю 80 кВт з можливістю короткочасного перевантаження. Конструкція повинна мати клас

ізоляції не нижче F, захист від пилу і вологи не нижче IP54, а також датчик температури обмоток.

Інвертор повинен містити захист від перенапруги, перевищення струму, перегріву, помилки драйвера та втрати живлення керування. Для підвищення надійності не рекомендується використовувати одиночні транзистори з малим струмовим запасом. Доцільним є застосування силового IGBT або MOSFET-модуля з номінальним струмом, що перевищує розрахунковий пусковий струм.

$$I_{inv,nom} \geq k_{пер} \cdot I_{phase,rms} \quad (2.4)$$

де $k_{пер}$ – коефіцієнт перевантаження, який для тягового інвертора приймається не менше 1,5–2,0.

Додатковий запас потрібен через нагрів, короточасні пікові струми та можливу роботу у двофазному режимі.

Таблиця 2.3 – Основні елементи силової частини та вимоги до надійності

Елемент	Основна функція	Вимога надійності
Акумуляторна батарея	Живлення DC-шини	BMS, контроль напруги, струму і температури
Головний контактор	Підключення/відключення HV-ланцюга	Ресурс контактів, дугогасіння, контроль залипання
Pre-charge контур	Обмеження пускового струму DC-шини	Резистор із тепловим запасом, тайм-аут заряджання
Конденсатор DC-шини	Зменшення пульсацій напруги	Низький ESR, температурний запас
Інвертор	Формування фазних напруг	Захист IGBT/MOSFET, контроль драйверів
ВД / СДПМ	Створення тягового моменту	Температурний датчик, якісна ізоляція
Контролер	Керування і діагностика	Watchdog, журнал відмов, безпечні стани

Таблиця 2.3 показує, що технічне завдання має охоплювати не тільки номінальні електричні параметри, а й діагностичні функції. Для кожного вузла необхідно визначити контрольований параметр, граничне значення та реакцію

системи. Наприклад, для конденсатора DC-шини контролюється напруга і пульсації, для інвертора – температура та сигнал помилки драйвера, для двигуна – фазні струми і температура обмоток.

2.3 Алгоритм керування та перевірки працездатності

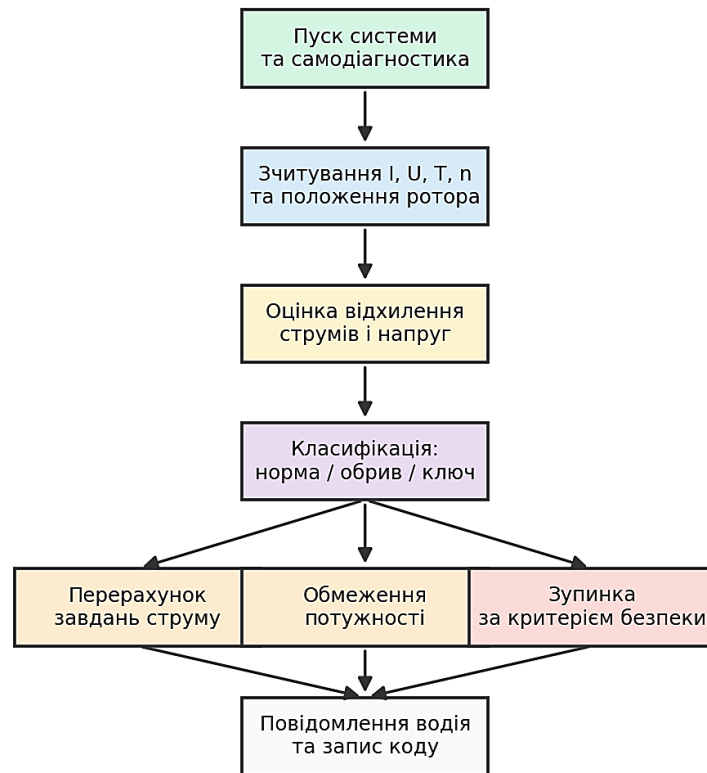


Рисунок 2.2 – Алгоритм діагностування та переходу в аварійний режим

Алгоритм на рисунку 2.2 починається із самодіагностики. Після ввімкнення перевіряється напруга батареї, стан контактора, заряд DC-шини, справність датчиків і відсутність активних критичних помилок. Під час руху контролер циклічно порівнює виміряні струми з очікуваними значеннями та оцінює тепловий стан.

Якщо виявлено обрив фази, контролер повинен відключити відповідний канал керування, заблокувати небезпечні комутаційні стани та перейти до двофазного режиму. У цьому режимі зменшується максимальний струм, обмежується швидкість і фіксується код відмови. Якщо відмова пов'язана з коротким замиканням ключа, алгоритм не повинен намагатися зберегти тягу, оскільки це може призвести до руйнування інвертора.

Критеріями переходу до аварійного режиму прийнято: струм однієї фази менший за 10 % від середнього струму двох інших фаз протягом заданого часу; зростання індикатора несиметрії; помилка драйвера ключа; перевищення допустимої температури; невідповідність напруги DC-шини режиму рекуперації.

$$I_{\text{lim, fault}} = k_{\text{fault}} \cdot I_{\text{nom}}, \quad 0,5 \leq k_{\text{fault}} \leq 0,7 \quad (2.5)$$

Формула (2.5) задає обмеження струму у післяаварійному режимі. Конкретне значення k_{fault} визначається температурою інвертора і двигуна, а також тривалістю дозволеного руху.

Програмна реалізація технічного завдання повинна мати чіткі стани: вимкнено, попереднє зарядження, готовність, тяга, рекуперація, аварійне обмеження, критичне вимкнення. Перехід між станами виконується тільки після перевірки умов безпеки. Наприклад, після критичного вимкнення повторний запуск дозволяється лише за відсутності активного короткого замикання і після розрядження DC-шини до безпечного рівня.

Для перевірки працездатності електроприводу у технічному завданні передбачаються випробування: холостий хід, поступове навантаження, пуск із підвищеним моментом, рекуперація, імітація обриву фази, імітація відмови датчика струму, перевірка реакції на перегрів. Кожне випробування повинно мати критерій успішності: стабільність швидкості, допустимі струми, відсутність критичних перенапруг, правильний запис коду помилки.

Особлива увага приділяється журналу відмов. У пам'яті контролера повинні зберігатися код події, час, температура інвертора, напруга DC-шини, фазні струми та режим автомобіля. Така інформація потрібна для сервісної діагностики і для оцінювання повторюваних відмов. Без журналу складно відрізнити випадкову помилку датчика від системної проблеми охолодження або поганого контакту.

Таблиця 2.4 – Програма перевірки технічного завдання

Випробування	Контрольований параметр	Критерій приймання
Пуск без навантаження	Струм фаз, швидкість	Відсутність помилок і надструму
Рух під навантаженням	Момент, температура	Температура нижча за допустиму
Рекуперація	Напруга DC-шини	Немає перенапруги батареї
Обрив фази	Індикатор несиметрії	Перехід у аварійний режим
Перегрів інвертора	Температура модуля	Дерейтинг або вимкнення

У технічному завданні також потрібно передбачити вимоги до електромагнітної сумісності. Різкі фронти ШІМ створюють завади, які можуть впливати на датчики та бортову мережу. Тому силові кабелі повинні бути екрановані або прокладені окремо від сигнальних, а корпус інвертора має бути з'єднаний з контуром вирівнювання потенціалів.

Додатковою вимогою є зручність обслуговування. Високовольтні роз'єми мають бути позначені, а доступ до DC-шини повинен передбачати процедуру перевірки відсутності напруги. Ці вимоги безпосередньо пов'язані з розділом охорони праці, оскільки підвищення технічної надійності не повинно створювати додаткових ризиків для персоналу.

Ризики технічного завдання оцінюються за ймовірністю та тяжкістю наслідків. Найбільш критичними є коротке замикання силового ключа, втрата охолодження і помилка алгоритму, що призводить до некерованого моменту. Менш критичними, але частішими можуть бути помилки датчиків і деградація контактів. Для кожного ризику встановлюється реакція системи.

Таблиця 2.5 – Технічні ризики та заходи зниження

Ризик	Причина	Заходи зниження
Перенапруга DC-шини	Рекуперація при зарядженій батареї	Обмеження рекуперації, гальмівний резистор за потреби
Перегрів інвертора	Високий струм, засмічення охолодження	Датчик температури, дерейтинг, сервісний регламент
Втрата фази	Обрив кабелю або ключа	Діагностика несиметрії, двофазний режим
Помилка датчика	Пошкодження або завади	Порівняння каналів, фільтрація, резервний алгоритм
Некоректне ПЗ	Помилка станів	Watchdog, перевірка безпечних переходів

Отримані вимоги формують основу для розрахункової частини. Далі визначаються тягові параметри, потужність двигуна, ємність батареї, струми інвертора, залишкова працездатність у аварійному режимі та показники надійності.

3 РОЗРАХУНКИ ВЕНТИЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ

3.1 Тяговий розрахунок і вибір двигуна

Розрахунок виконується для легкового гібридного автомобіля масою 1530 кг. Приймаємо коефіцієнт опору коченню $f = 0,015$, коефіцієнт аеродинамічного опору $C_x = 0,26$, лобову площу $A = 2,2 \text{ м}^2$, густину повітря $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$, швидкість руху для розрахунку потужності $v = 36,1 \text{ м/с}$, що відповідає 130 км/год. Коефіцієнт корисної дії трансмісії $\eta_{tr} = 0,90$.

$$F_{\text{коч}} = m \cdot g \cdot f \quad . \quad (3.1)$$

$$F_{\text{пов}} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2 \quad . \quad (3.2)$$

$$F_{\text{під}} = m \cdot g \cdot i \quad . \quad (3.3)$$

Для підйому приймаємо $i = 0,06$. Тоді $F_{\text{коч}} = 1530 \cdot 9,81 \cdot 0,015 = 225 \text{ Н}$; $F_{\text{пов}} = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,26 \cdot 2,2 \cdot 36,1^2 = 456 \text{ Н}$; $F_{\text{під}} = 1530 \cdot 9,81 \cdot 0,06 = 901 \text{ Н}$. Сумарна сила опору дорівнює 1582 Н.

$$P_{\text{тяги}} = \frac{(F_{\text{коч}} + F_{\text{пов}} + F_{\text{під}}) \cdot v}{\eta_{tr}} \quad (3.4)$$

Отримаємо $P_{\text{тяги}} = 63,5 \text{ кВт}$.

З урахуванням запасу на прискорення, роботу допоміжних систем, деградацію батареї та можливе підвищення маси автомобіля приймаємо номінальну потужність електродвигуна 80 кВт.

Перевіримо момент, необхідний для інтенсивного пуску. Приймаємо прискорення $a = 1,5 \text{ м/с}^2$, радіус колеса $r = 0,31 \text{ м}$, передавальне число редуктора

$i_p = 8,5$, ККД редуктора $\eta_p = 0,92$. Сила розгону визначається як $F_{\text{розг}} = m \cdot a = 2295 \text{ Н}$.

Разом із коченням і підйомом $F_{\Sigma} = 2295 + 225 + 901 = 3421 \text{ Н}$.

$$M_{\text{дв}} = \frac{F_{\Sigma} \cdot r}{i_p \cdot \eta_p} \quad (3.5)$$

$$M_{\text{дв}} = \frac{3421 \cdot 0,31}{8,5 \cdot 0,92} = 135,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Обраний двигун 80 кВт забезпечує більший момент у зоні малих швидкостей, тому прийнятий вибір є достатнім.

Таблиця 3.1 – Результати тягового розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Маса автомобіля	m	1530 кг
Розрахункова швидкість	v	36,1 м/с
Опір коченню	F _{коч}	225 Н
Аеродинамічний опір	F _{пов}	456 Н
Опір підйому 6 %	F _{під}	901 Н
Сумарна сила опору	F _Σ	1582 Н
Розрахункова потужність	P _{тяги}	63,5 кВт
Прийнята потужність двигуна	P _{ном}	80 кВт

За результатами таблиці 3.1 приймається вентильний електродвигун або синхронний двигун з постійними магнітами тягового виконання потужністю 80 кВт. Для забезпечення надійності паспортні параметри повинні містити температурний клас ізоляції, допустиме короткочасне перевантаження, максимальну частоту обертання і спосіб охолодження.

$$M_{\text{ном}} = \frac{9550 \cdot P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \quad (3.6)$$

Якщо номінальна швидкість двигуна $n_{\text{ном}} = 4000$ об/хв, то $M_{\text{ном}} = \frac{9550 \cdot 80}{4000} = 191$ Н·м. Це більше за розрахунковий момент пуску 135,6 Н·м, отже двигун має необхідний запас.

3.2 Розрахунок батареї, інвертора та аварійного режиму

Енергоємність батареї визначається за формулою (2.3). Для $U_{\text{бат}} = 288$ В і $C_{\text{бат}} = 140$ А·год отримаємо $E_{\text{бат}} = 40,32$ кВт·год. Якщо питомі витрати енергії у міському електричному режимі становлять 0,22 кВт·год/км, то теоретичний електричний пробіг без урахування резерву дорівнює близько 183 км. Для гібридного автомобіля така батарея забезпечує значний запас, однак у навчальному розрахунку вона також використовується для демонстрації аварійного режиму та підвищеної автономності.

$$L_{\text{ел}} = \frac{E_{\text{бат}} \cdot \eta_{\text{пр}}}{e_{\text{пит}}} \quad (3.7)$$

де $L_{\text{ел}}$ – пробіг в електричному режимі;

$\eta_{\text{пр}}$ – середній ККД приводу;

$e_{\text{пит}}$ – питомі витрати енергії.

При $\eta_{\text{пр}} = 0,88$ і $e_{\text{пит}} = 0,22$ кВт·год/км отримуємо $L_{\text{ел}} = 40,32 \cdot 0,88 / 0,22 = 161$ км. Реальне значення буде меншим через обмеження BMS, температуру та стиль руху.

Таблиця 3.2 – Параметри батарейного блоку

Параметр	Значення
Номінальна напруга	288 В
Ємність	140 А·год
Енергоємність	40,32 кВт·год
Рекомендований робочий SOC	20–90 %
Контроль	BMS, датчики напруги і температури

Струм інвертора розраховується за потужністю двигуна, напругою DC-шини та коефіцієнтами ефективності. Для попередньої оцінки діючий фазний струм визначається через еквівалентну трифазну потужність. Приймаємо $\cos\varphi = 0,95$, $\eta_{\text{інв}} = 0,96$, $\eta_{\text{дв}} = 0,92$.

$$I_{\phi} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{дв}}} \quad (3.8)$$

За $U_{\text{л}} = 288 \text{ В}$ маємо $I_{\phi} = 80000 / (1,732 \cdot 288 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \cdot 0,92) = 191 \text{ А}$. Піковий фазний струм дорівнює $I_{\text{пик}} = \sqrt{2} \cdot I_{\phi} = 270 \text{ А}$. Для тягового режиму з короткочасним перевантаженням 2,5 приймаємо розрахунковий струм силового модуля близько 675 А.

$$I_{\text{мод}} \geq k_{\text{пуск}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\phi} \quad (3.9)$$

Отже, для підвищення надійності слід обрати силовий модуль класу не нижче 600 В за напругою і 650–800 А за струмом. Такий вибір коректніший, ніж застосування малострумівих дискретних IGBT, оскільки тяговий електропривід має великі пікові струми і значне теплове навантаження.

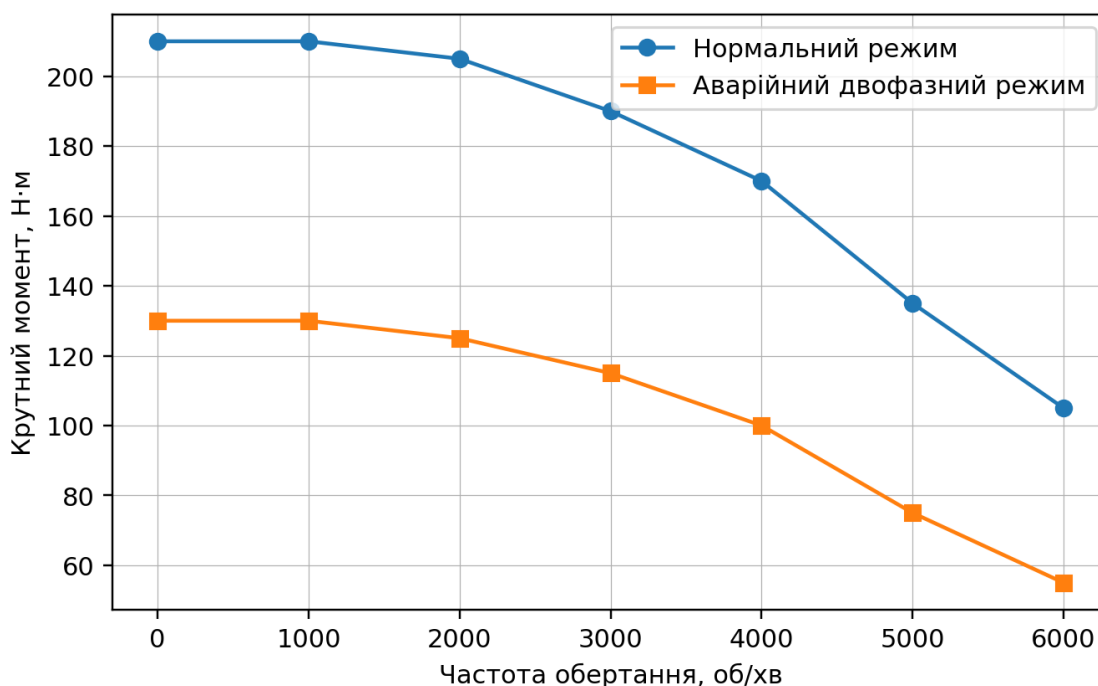


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики електроприводу у нормальному та аварійному режимах

Рисунок 3.1 показує, що аварійний двофазний режим зменшує доступний момент на всьому діапазоні швидкостей. Найбільш важливим є обмеження моменту на малих швидкостях, оскільки саме там потрібна найбільша тяга для пуску. У післяаварійному режимі доцільно обмежити максимальну швидкість та не допускати тривалого руху з високим моментом.

Зменшення моменту не означає повну втрату рухомості. Якщо контролер правильно перераховує струми справних фаз, автомобіль може рухатися з обмеженням прискорення. Це відповідає меті підвищення надійності: не забезпечити повну потужність після відмови, а запобігти раптовій зупинці та дати можливість безпечно завершити рух.

Розрахуємо втрати в силовому модулі для попередньої теплової оцінки. Повні втрати складаються з провідникових і комутаційних. Для спрощеної оцінки приймемо $P_{\text{cond}} = 1,4$ кВт, $P_{\text{sw}} = 0,8$ кВт у номінальному режимі. Тоді сумарні втрати інвертора становлять 2,2 кВт. Якщо тепловий опір від кристала до охолоджувача еквівалентно $R_{\text{th}} = 0,008$ °C/Вт, приріст температури становитиме 17,6 °C.

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}} \quad (3.10)$$

$$\Delta T = P_{\text{loss}} \cdot R_{\text{th}} \quad (3.11)$$

У аварійному двофазному режимі струми справних фаз зростають, тому втрати можуть збільшитися приблизно у 1,3–1,5 раза. Це є причиною обмеження тривалості такого режиму. Якщо температура охолоджувача дорівнює 65 °C, то в нормальному режимі оцінна температура кристала становить 82,6 °C, а у післяаварійному режимі при збільшенні втрат у 1,4 раза – близько 89,6 °C. Значення є допустимим лише за справного охолодження.

Оцінка двофазного режиму виконується через коефіцієнт залишкової потужності. У трифазному режимі електромагнітний момент створюється симетричною системою струмів. Після обриву однієї фази дві справні фази повинні створювати момент при підвищених пульсаціях. Для навчального розрахунку приймаємо безпечний коефіцієнт залишкової потужності $k_{\text{зал}} = 0,62$.

$$P_{ав} = k_{зал} \cdot P_{ном}$$

$$P_{ав} = 0,62 \cdot 80 = 49,6 \text{ кВт.}$$

Це достатньо для руху з обмеженою швидкістю по рівній дорозі, але недостатньо для інтенсивного розгону або тривалого руху на підйомі. Тому аварійний режим повинен супроводжуватися попередженням водія та обмеженням максимальної швидкості.

$$M_{ав} = k_{зал} \cdot M_{ном} \quad (3.13)$$

За $M_{ном} = 191 \text{ Н}\cdot\text{м}$ отримаємо $M_{ав} = 118 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Порівняно з потрібним пусковим моментом $135,6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ це менше, тому старт на крутий підйом у аварійному режимі може бути обмежений. На рівній дорозі моменту достатньо для повільного руху.

Таблиця 3.3 – Порівняння нормального та аварійного режиму

Показник	Нормальний режим	Аварійний режим
Доступна потужність	80 кВт	≈ 49,6 кВт
Номінальний момент	191 Н·м	≈ 118 Н·м
Фазна система	3 фази	2 справні фази
Рекуперація	повна за умов BMS	обмежена
Теплове навантаження	нормальне	підвищене, потрібен дерейтинг
Призначення	звичайна експлуатація	рух до безпечного місця

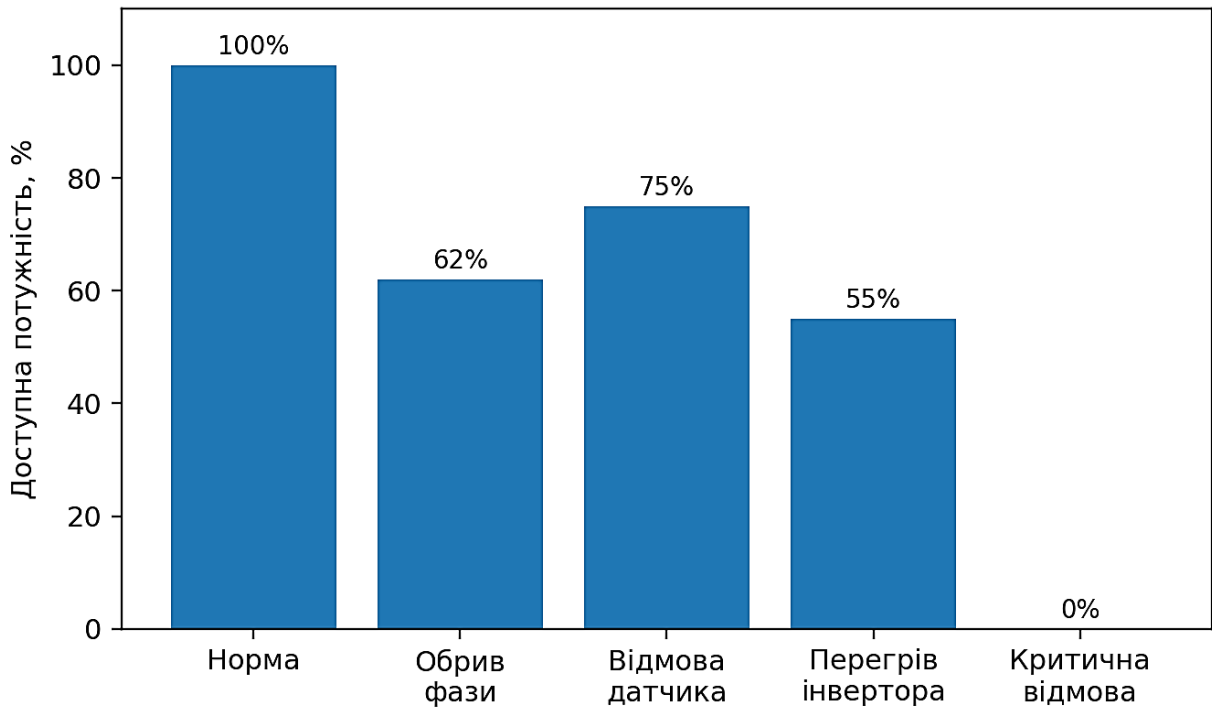


Рисунок 3.2 – Оцінка залишкової потужності електроприводу при різних відмовах

3.3 Розрахунок показників надійності

Оцінювання надійності виконується для основних вузлів електроприводу. Приймаємо орієнтовні інтенсивності відмов у 10^{-6} 1/год для навчального розрахунку: батарейний контактор – 0,05; конденсатор DC-шини – 0,25; інвертор – 0,60; драйвери – 0,20; датчики – 0,15; обмотка двигуна – 0,25; контролер – 0,10; охолодження – 0,20. Сумарна інтенсивність відмов для послідовної структури дорівнює $1,80 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.14)$$

$$MTBF = \frac{1}{1,80 \cdot 10^{-6}} = 5,56 \cdot 10^5 \text{ год}$$

Для автомобільного електроприводу важливою є готовність системи. Якщо середній час ремонту MTTR прийняти 4 год, то коефіцієнт готовності визначається формулою (3.15).

$$K_r = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3.15)$$

$$K_r = \frac{555556}{555556 + 4} = 0,999993.$$

Це високе значення, однак воно характеризує лише середню експлуатаційну готовність. Для безпеки руху важливішим є те, як система поводить у момент виникнення відмови. Саме тому введення аварійного режиму має практичну цінність навіть тоді, коли розрахунковий MTBF великий.

Таблиця 3.4 – Орієнтовна оцінка інтенсивності відмов елементів

Елемент	$\lambda, 10^{-6}$ 1/год	Заходи підвищення надійності
Контактор і запобіжник	0,05	Вибір за струмом, контроль залипання
Конденсатор DC-шини	0,25	Температурний запас, контроль пульсацій
Інвертор	0,60	Модуль із запасом, охолодження, захист
Драйвери ключів	0,20	Гальванічна розв'язка, контроль помилок
Датчики	0,15	Фільтрація, перевірка достовірності
Обмотка двигуна	0,25	Контроль температури та ізоляції
Контролер	0,10	Watchdog, безпечні стани
Охолодження	0,20	Датчик температури, сервісний регламент

Ефект від алгоритмічного підвищення надійності можна оцінити через зменшення частки відмов, що призводять до повної втрати тяги. Якщо частка некритичних одиничних відмов, які переводяться в обмежений режим, становить 30 % від загальної інтенсивності, то ефективна інтенсивність відмов із повною втратою тяги зменшується.

$$\lambda_{\text{stop}} = \lambda_{\Sigma} \cdot (1 - k_{\text{FT}}) \quad (3.16)$$

При $k_{FT} = 0,30$ маємо $\lambda_{stop} = 1,80 \cdot 10^{-6} \cdot 0,70 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ 1/год. Відповідний МТBF за критерієм повної втрати тяги зростає до $7,94 \cdot 10^5$ год. Це підтверджує доцільність відмовостійкого керування.

Таким чином, виконано тяговий розрахунок гібридного автомобіля. Для маси 1530 кг, швидкості 130 км/год і підйому 6 % отримано розрахункову потужність 63,5 кВт, тому з урахуванням запасу прийнято вентильний електродвигун потужністю 80 кВт. Розраховано параметри батареї 288 В, 140 А·год, енергоємність якої становить 40,32 кВт·год. Визначено орієнтовний фазний струм інвертора 191 А та обґрунтовано необхідність силового модуля з запасом 650–800 А і напругою не нижче 600 В. Оцінено аварійний двофазний режим. За консервативним коефіцієнтом залишкової потужності 0,62 доступна потужність становить близько 49,6 кВт, що достатньо для обмеженого руху, але потребує дерейтингу та інформування водія. Виконано розрахунок показників надійності. Введення fault-tolerant алгоритму зменшує інтенсивність відмов, що призводять до повної втрати тяги, і підвищує експлуатаційну придатність електроприводу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Небезпечні фактори та організаційні заходи

Роботи з вентильним електроприводом гібридного автомобіля належать до робіт із підвищеною електричною безпекою, оскільки DC-шина має напругу 288 В, а у режимах комутації можливі перенапруги. Організація робіт повинна відповідати вимогам законодавства України з охорони праці, правилам безпечної експлуатації електроустановок споживачів та нормативам мікроклімату виробничих приміщень [19], [20], [21].

Основні небезпечні фактори: ураження електричним струмом, електрична дуга при розмиканні DC-ланцюга, опіки від нагрітих елементів, пожежна небезпека батареї, механічне травмування при обертанні валу або коліс, вплив електромагнітних завад, хімічні ризики при пошкодженні акумуляторних комірок.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори під час обслуговування електроприводу

Фактор	Джерело	Можливий наслідок	Заходи захисту
Електрична напруга	Батарея, DC-шина, інвертор	Ураження струмом	Вимкнення, перевірка напруги, ЗІЗ
Електрична дуга	Контактори, роз'єми	Опіки, пожежа	Pre-charge, заборона роз'єднання під навантаженням
Перегрів	Інвертор, двигун	Опіки, відмова ізоляції	Охолодження, температурний контроль
Механічний рух	Вал, колеса	Травми	Блокування коліс, огороження
Пожежа батареї	КЗ, пошкодження комірок	Задимлення, токсичні гази	Вогнегасники, вентиляція, евакуація

Перед початком робіт необхідно виконати організаційні заходи: призначити відповідального, провести інструктаж, зняти напругу, відключити головний

контактор, дочекатися розрядження конденсаторів DC-шини, перевірити відсутність напруги вимірювальним приладом, встановити попереджувальні таблички. Забороняється працювати з високовольтними роз'ємами без діелектричних рукавичок і захисного щитка.

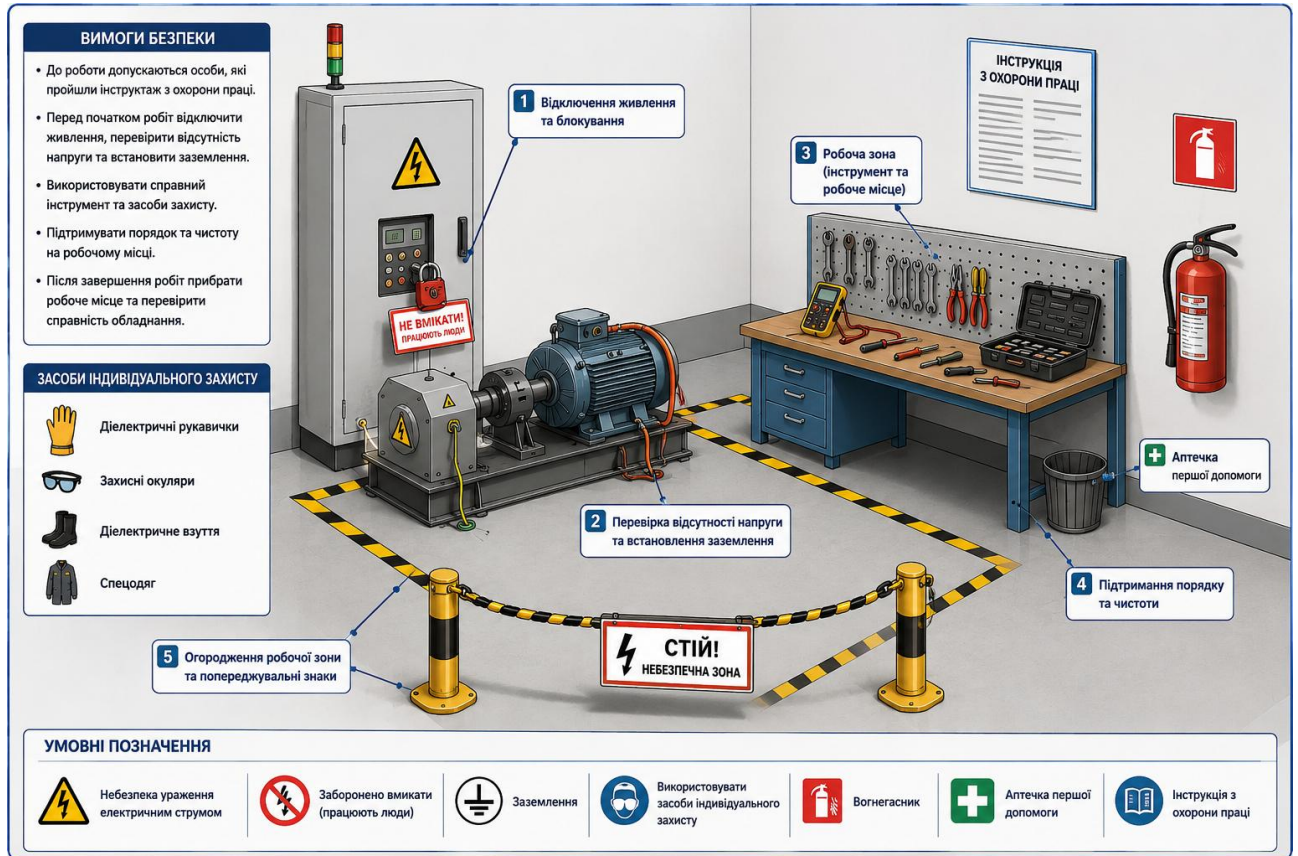


Рисунок 4.1 – Організація безпечного робочого місця для обслуговування електроприводу

Робоче місце повинно мати виділену високовольтну зону, суху підлогу або ізолювальний килимок, достатнє освітлення, вентиляцію та засоби пожежогасіння. Інструмент повинен мати ізольовані ручки, а вимірювальні прилади – категорію безпеки, що відповідає напрузі вимірювання.

4.2 Розрахунки освітлення, вентиляції та електробезпеки

Розрахуємо небезпеку дотику до DC-шини. Для попередньої оцінки приймаємо опір тіла людини $R_{\text{л}} = 1000 \text{ Ом}$, напругу $U = 288 \text{ В}$. Струм через тіло визначається за законом Ома.

$$I_{\pi} = \frac{U}{R_{\pi}} \quad (4.1)$$

$$I_{\pi} = \frac{288}{1000} = 0,288 \text{ A}$$

Це значення є небезпечним для життя, тому будь-які роботи на відкритих високовольтних частинах під напругою заборонені. Додатково після відключення потрібно проконтролювати розрядження конденсатора DC-шини.

$$U_c(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R_{\text{розр}}C}} \quad (4.2)$$

При $U_0 = 288 \text{ В}$, $R_{\text{розр}} = 10 \text{ кОм}$, $C = 2 \text{ мФ}$ стала часу $\tau = 20 \text{ с}$. Через 5τ , тобто приблизно 100 с , напруга зменшиться до рівня менше 2% від початкової. У регламенті приймається очікування не менше 3 хв із подальшою перевіркою мультиметром.

Таблиця 4.2 – Організаційні заходи електробезпеки

Етап	Дія	Виконавець
Підготовка	Інструктаж, перевірка ЗІЗ	Відповідальний
Відключення	Розмикання контактора, блокування запуску	Електротехнічний персонал
Контроль	Вимір напруги DC-шини	Працівник з допуском
Робота	Використання ізольованого інструменту	Виконавець
Завершення	Огляд, відновлення кожухів	Відповідальний

Розрахунок штучного освітлення виконаємо методом світлового потоку. Приймаємо площу ділянки $S = 54 \text{ м}^2$, нормовану освітленість $E = 300 \text{ лк}$, коефіцієнт запасу $k = 1,5$, коефіцієнт використання $\eta = 0,55$, світловий потік одного LED-світильника $F = 3200 \text{ лм}$.

$$N = \frac{E \cdot S \cdot k}{F \cdot \eta} \quad (4.3)$$

$$N = \frac{300 \cdot 54 \cdot 1,5}{3200 \cdot 0,55} = 13,8$$

Приймаємо 14 світильників. Для рівномірності освітлення їх розміщують у два ряди по 7 світильників. Освітлення повинно виключати різкі тіні у зоні підключення високовольтних кабелів.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку освітлення

Параметр	Значення
Площа приміщення	54 м ²
Нормована освітленість	300 лк
Коефіцієнт запасу	1,5
Потік одного світильника	3200 лм
Розрахункова кількість	13,8
Прийнято	14 LED-світильників

Під час випробування інвертора і двигуна в приміщенні виділяється теплота. Для попереднього розрахунку вентиляції приймаємо тепловиділення $Q = 0,8$ кВт, допустиме підвищення температури повітря $\Delta t = 6$ °С, густину повітря $\rho = 1,2$ кг/м³, теплоємність $c_p = 1,0$ кДж/(кг·°С).

$$L = \frac{3,6 \cdot Q}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta t} \quad (4.4)$$

$$L = \frac{3,6 \cdot 800}{1,2 \cdot 1,0 \cdot 6} = 400 \text{ м}^3/\text{год}$$

З урахуванням запасу для видалення продуктів нагріву та можливого задимлення при аварії приймаємо вентиляцію не менше 600 м³/год. У зоні заряджання і батарейного блоку вентиляція повинна працювати до початку випробувань і після їх завершення.

$$K_{\text{пов}} = \frac{L}{V_{\text{прим}}} \quad (4.5)$$

Якщо об'єм приміщення $V_{\text{прим}} = 162 \text{ м}^3$, кратність повітрообміну $K_{\text{пов}} = 600/162 = 3,7 \text{ 1/год}$. Це є достатнім для навчальної лабораторної дільниці за умови відсутності відкритого пошкодження батареї.

Для оцінки ризиків використаємо матрицю «ймовірність – тяжкість». Рівень ризику визначається добутком $P \cdot S$, де P – умовна ймовірність від 1 до 5, S – тяжкість наслідків від 1 до 5. Значення 1–5 вважається прийнятним, 6–12 – потребує заходів, 15–25 – неприпустимим без додаткового захисту.

$$R_{\text{риз}} = P \cdot S \quad (4.6)$$

Таблиця 4.4 – Оцінка ризиків під час робіт з вентиляним електроприводом

Подія	P	S	$R_{\text{риз}}$	Заходи
Дотик до DC-шини	2	5	10	Зняття напруги, ЗІЗ, блокування
Коротке замикання інструментом	2	5	10	Ізольований інструмент, кожухи
Опік від інвертора	3	3	9	Охолодження, попереджувальні знаки
Падіння важкого вузла	2	4	8	Підймальні пристрої, фіксація
Задимлення батареї	1	5	5	Вентиляція, евакуація, вогнегасники

Після впровадження заходів ризику переходять у контрольований діапазон. Найбільш важливими залишаються електробезпека та пожежна безпека, оскільки наслідки цих подій мають максимальну тяжкість.

Пожежна безпека для електроприводу гібридного автомобіля пов'язана з батареєю, силовими кабелями та інвертором. На робочому місці повинні бути порошкові або вуглекислотні вогнегасники, пісок або інший придатний засіб локалізації, а також план евакуації. Для систем заряджання електромобілів в

Україні встановлено спеціальні вимоги протипожежного захисту, які доцільно враховувати і під час випробування гібридного автомобіля [22], [23], [25].

$$n_{\text{вогн}} = \frac{S}{S_{\text{норм}}} \quad (4.7)$$

Для площі $S = 54 \text{ м}^2$ і умовної площі обслуговування одним переносним вогнегасником $S_{\text{норм}} = 25 \text{ м}^2$ маємо $n_{\text{вогн}} = 54/25 = 2,16$. Приймаємо три переносні вогнегасники: два порошкові та один CO_2 для електрообладнання. Вогнегасники розміщуються біля виходу та біля високовольтної зони, але не всередині потенційно небезпечної зони.

Таблиця 4.5 – Технічні заходи безпечної роботи

Напрямок	Захід
Електробезпека	Блокування запуску, перевірка відсутності напруги, ізолюваний інструмент
Пожежна безпека	Вогнегасники, контроль температури, заборона робіт біля легкозаймистих матеріалів
Механічна безпека	Фіксація коліс, огороження обертових частин
Мікроклімат	Вентиляція не менше $600 \text{ м}^3/\text{год}$
Організація	Інструктаж, журнал робіт, допуск персоналу

Таким чином, визначено основні небезпечні фактори під час роботи з вентилювальним електроприводом гібридного автомобіля: висока напруга DC-шини, електрична дуга, перегрів, пожежна небезпека батареї та механічні ризики від рухомих частин. Розроблено організаційні та технічні заходи безпеки: відключення високовольтної системи, перевірка відсутності напруги, використання ЗІЗ, ізолюваного інструменту, вентиляції, огорожень, вогнегасників та попереджувальних знаків. Виконано розрахунки: струму можливого дотику, часу розрядження DC-шини, кількості світильників, повітрообміну, рівня ризику та кількості вогнегасників. Запропоновані заходи охорони праці доповнюють технічні рішення з підвищення надійності, оскільки безпечне обслуговування зменшує ймовірність пошкодження обладнання та травмування персоналу.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що вентиляльний електропривід є ефективним рішенням для гібридного автомобіля, однак його надійність визначається станом інвертора, датчиків, обмоток, DC-шини та системи охолодження. Найбільш раціональним напрямом підвищення надійності є поєднання апаратного запасу і алгоритмічного переходу до обмеженого аварійного режиму.

2. Розроблено технічне завдання на відмовостійкий електропривід: прийнято потужність двигуна 80 кВт, напругу батареї 288 В, ємність 140 А·год, структуру силової частини з pre-charge контуром, трифазним інвертором, датчиками струму, напруги і температури та контролером діагностики.

3. Виконано тягові та електричні розрахунки. Отримано розрахункову потужність 63,5 кВт і обґрунтовано вибір двигуна 80 кВт; визначено параметри батареї, струми інвертора, теплове навантаження та залишкову потужність у двофазному аварійному режимі близько 49,6 кВт. Розрахунок надійності показав, що fault-tolerant алгоритм зменшує частку відмов із повною втратою тяги.

4. Розроблено заходи охорони праці для робіт із високовольтним вентиляльним електроприводом. Проведено розрахунки електробезпеки, розрядження DC-шини, освітлення, вентиляції, ризиків і пожежного захисту. Запропоновані заходи забезпечують безпечні умови обслуговування та випробування електроприводу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріали XIX Всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період» (91-ї науково-технічної конференції ХНУМГ ім. О. М. Бекетова) : в 5-и ч. / Ч. 2. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. 300 с. URL: <https://sds.kname.edu.ua/kafedra/sklad/zdobutky/530-iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovatsijni-tehnologiji-v-svitlotekhnitsi-ta-elektroenergetitsi>
2. Двадненко В. Я. Забезпечення стійкості вентиляційного електродвигуна конверсійного гібридного автомобіля. Вісник НТУ «ХПІ».2014. № 67 (1109). С. 8–17. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/12963> .
3. Ніконенко Є. О. Керування електромеханічними системами електричних транспортних засобів з гібридним акумуляторно-суперконденсаторним джерелом живлення : дис. д-ра філософії. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/60783> .
4. Осадчук Ю. Г., Козакевич І. А., Ільченко Р. А. Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентильних реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів. Вісник Криворізького національного університету. 2016. № 42. С. 104–109.
5. Bianchi N., Bolognani S., Carraro E., Castiello M., Fornasiero E. Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 52(6). DOI: 10.1109/TIA.2016.2599850.
6. Jurca F. N., Mircea R., Martis C., Martis R., Pop P. P. Synchronous reluctance motors for small electric traction vehicle. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2014. P. 317–321. DOI: 10.1109/ICEPE.2014.6969920.
7. Al Sakka M., Geury T., El Baghdadi M., Dhaens M., Al Sakka M., Hegazy O. Review of Fault Tolerant Multi-Motor Drive Topologies for Automotive Applications. Energies. 2022. Vol. 15(15). Article 5529. DOI: 10.3390/en15155529.

8. Bolognani S., Zordan M., Zigliotto M. Experimental Fault-Tolerant Control of a PMSM Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2000. Vol. 47(5). P. 1134–1141. DOI: 10.1109/41.873223.
9. Stumper J.-F., Dötlinger A., Kennel R. Classical Model Predictive Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor. *European Power Electronics and Drives Journal*. 2012. Vol. 22(3). P. 24–31. DOI: 10.48550/arXiv.1212.5815.
10. Hackl C. M., Pecha U., Schechner K. Modeling and Control of Permanent-Magnet Synchronous Generators under Open-Switch Converter Faults. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2855423; arXiv:1802.00182.
11. Rubino S., Dordevic O., Bojoi R., Levi E. Modular Vector Control of Multi-Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. DOI: 10.1109/TIE.2020.3026271.
12. Rücker F., Schoeneberger I., Wilmschen T., Chahbaz A., Dechent P., Hildenbrand F., Barbers E., Kuipers M., Figgenger J., Sauer D. U. A Comprehensive Electric Vehicle Model for Vehicle-to-Grid Strategy Development. *Energies*. 2022. Vol. 15(12). Article 4186. DOI: 10.3390/en15124186.
13. Iftikhar M. H., Park B.-G., Kim J.-W. Design and Analysis of a Five-Phase Permanent-Magnet Synchronous Motor for Fault-Tolerant Drive. *Energies*. 2021. Vol. 14(2). Article 514. DOI: 10.3390/en14020514.
14. Hackl C. M., Landerer M. A., Peters D. Robust control and fault-tolerant current control approaches for permanent-magnet machines in power electronic drives. Technical University of Munich / open research materials, 2018–2021.
15. Bosch R. *Automotive Electrics and Automotive Electronics: Systems and Components, Networking and Hybrid Drive*. 5th ed. Springer Vieweg, 2014.
16. Chau K. T. *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*. Wiley-IEEE Press, 2015.
17. Ehsani M., Gao Y., Longo S., Ebrahimi K. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. 3rd ed. CRC Press, 2018.
18. IEC 61851-1:2017. Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission, 2017.

19. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12> .
20. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98> .
21. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99> .
22. ДСТУ 9222:2023. Пожежна безпека систем зарядки електромобілів. Основні положення. Чинний з 01.11.2023.
23. ДСТУ EN ІЕС 61851-1:2021. Система зарядки електричних транспортних засобів дротова. Частина 1. Загальні вимоги.
24. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17> .
25. Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417.