

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» місто Київ»

Виконав: студент 2-го курсу, групи

1АТ-24м спеціальності 274 –

Автомобільний транспорт

Освітньо-професійна програма –

Автомобільний транспорт

Васильковський Р.О.

Керівник: к.т.н., доцент каф. АТМ

Смирнов Є.В.

« 27 » 11 2025 р.

Опонент: к.т.н. доц. каф. АТМ

Савуленко В.В.

« 4 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АТМ

Цимбал С.В.

« 5 » 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 27 – Транспорт
Спеціальність – 274 – Автомобільний транспорт
Освітньо-професійна програма – Автомобільний транспорт

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри АТМ
к.т.н., доцент Цимбал С.В.

« 25 » 09 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Васильковському Руслану Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» місто Київ,

керівник роботи Смирнов Євгеній Валерійович, к.т.н., доцент,

затверджені наказом ВНТУ від «24» вересня 2025 року № 313.

2. Строк подання здобувачем роботи: 30.11.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Вимоги до конструкції та експлуатації автотранспортних засобів (діючі міжнародні, державні, галузеві стандарти та технічні умови заводів-виробників автомобільної техніки); показники ВТБ СТОА «Master Service Electro» місто Київ; досліджувані моделі АТЗ – батарейні електромобілі; технічні характеристики автомобіля KIA Soul EV; об'єкт дослідження – підвищення інформативності та оперативності діагностування агрегатів силового приводу електромобілів на стендах із біговими барабанами.

4. Зміст текстової частини:

1 Стан проблеми діагностування силових приводів електромобілів. Аналіз функціонування станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro»

2 Теоретичне обґрунтування контролю силового приводу електромобіля на стенді з біговими барабанами

3 Моделювання функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами та визначення діагностичних параметрів

4 Методика діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів

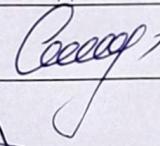
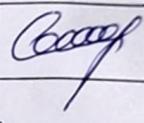
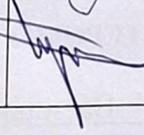
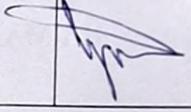
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1-3 Тема, мета та завдання дослідження.

4 Стендові методи діагностування силового приводу автомобіля

- 5 Характеристика ВТБ СТОА «Master Service Electro» м. Київ
- 6 Структурна схема процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами
- 7 Математична модель системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»
- 8 Алгоритм розрахунку параметрів функціонування системи
- 9 Результати моделювання функціонування електромобіля на стенді (1-2 слайди)
- 10 Структура діагностичного стенда з біговими барабанами
- 11 Діагностична матриця постановки діагнозу силового приводу електромобіля
- 12 Алгоритм діагностування силового приводу електромобіля
- 13 Основні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ/підрозділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розв'язання основної задачі	Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ		
Визначення ефективності запропонованих рішень	Буренніков Ю.Ю., професор кафедри АТМ		

7. Дата видачі завдання « 25 » вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

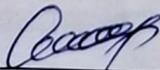
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Вивчення об'єкту та предмету дослідження	25.09-29.09.2025	Вик
2	Аналіз відомих рішень, постановка задач	30.09-20.10.2025	Вик
3	Обґрунтування методів досліджень	30.09-20.10.2025	Вик
4	Розв'язання поставлених задач	21.10-10.11.2025	Вик
5	Формування висновків по роботі, наукової новизни, практичної цінності результатів	11.11-16.11.2025	Вик
6	Виконання розділу/підрозділу «Визначення ефективності запропонованих рішень»	17.11-24.11.2025	Вик
7	Нормоконтроль МКР	25.11-30.11.2025	Вик
8	Попередній захист МКР	01.12-04.12.2025	Вик
9	Рецензування МКР	05.12-09.12.2025	Вик
10	Захист МКР	10.12.2025-12.12.2025	Вик

Здобувач


(підпис)

Васильковський Р.О.

Керівник роботи


(підпис)

Смирнов Є.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 629.3

Васильковський Р.О. Удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» місто Київ. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 274 – Автомобільний транспорт, освітня програма – Автомобільний транспорт. Вінниця: ВНТУ, 2025. 88 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 28; табл. 2.

В магістерській кваліфікаційній роботі пророблено питання підвищення інформативності та оперативності діагностування агрегатів силового приводу електромобілів на стендах із біговими барабанами. У розділі 1 обґрунтовано проаналізовано методи діагностування силових приводів електромобілів; проаналізовано стан виробничо-технічної бази СТОА «Master Service Electro». В розділі 2 здійснено теоретичні розробки діагностування силового привода електромобіля на стенді з біговими барабанами. В розділі 3 проведено моделювання функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами та визначення діагностичних параметрів. В розділі 4 розроблена методика діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів та виконано оцінку ефективності впровадження методики на прикладі СТОА «Master Service Electro».

Ілюстративна частина складається з 14 плакатів.

Ключові слова: електромобіль, силовий привід, стенд з біговими барабанами, діагностування, станція технічного обслуговування автомобілів, діагностична матриця.

ABSTRACT

UDC 629.3

Vasytkovsky R.O. Improving the process of diagnosing the power drive of electric vehicles in the conditions of the car maintenance station "Master Service Electro" city of Kyiv. Master's qualification work in the specialty 274 - Motor transport, educational program - Motor transport. Vinnytsia: VNTU, 2025. 88 p.

In Ukrainian Language. Bibliography: 31 titles; Fig.: 28; table 2.

The master's qualification work deals with the issue of increasing the informativeness and efficiency of diagnosing powertrain units of electric vehicles on stands with running drums. In section 1, methods for diagnosing powertrains of electric vehicles are analyzed in a reasonable manner; the state of the production and technical base of the «Master Service Electro» service station is analyzed. In section 2, theoretical developments for diagnosing the powertrain of an electric vehicle on a stand with running drums are carried out. In section 3, modeling of the functioning of an electric vehicle on a stand with running drums and determination of diagnostic parameters are carried out. In section 4, a methodology for diagnosing the powertrain of electric vehicles in the conditions of a car service station is developed and an assessment of the effectiveness of the implementation of the methodology is carried out using the example of the «Master Service Electro» service station.

The illustrative part consists of 14 posters.

Keywords: electric vehicle, power drive, stand with running drums, diagnostics, car service station, diagnostic matrix.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 СТАН ПРОБЛЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ «MASTER SERVICE ELECTRO».....	7
1.1 Тенденції електрифікації на автомобільному транспорті.....	7
1.2 Огляд конструкцій автомобілів з електричним силовим приводом	8
1.3 Методи та засоби діагностування силового приводу електромобілів.....	13
1.4 Стенди з біговими барабанами для діагностики електричного силового приводу.....	16
1.5 Загальна характеристика станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» м. Київ.....	19
1.6 Характеристика виробничо-технічної бази СТОА «Master Service Electro» м. Київ.....	22
1.7 Висновки	23
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНТРОЛЮ СИЛОВОГО ПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА СТЕНДІ З БІГОВИМИ БАРАБАНАМИ	25
2.1 Виявлення взаємозв'язків у системі «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»	25
2.2 Обґрунтування тестових режимів діагностування силового приводу електромобіля	26
2.3 Математична модель системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»	34
2.4 Алгоритм розрахунку тягово-швидкісних властивостей електромобіля при діагностуванні на стенді з біговими барабанами	46
2.5 Висновки	49
3 МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА СТЕНДІ З БІГОВИМИ БАРАБАНАМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	50
3.1 Методи визначення діагностичних параметрів	50

3.2 Результати моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами	54
3.3 Визначення діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан силового приводу електромобіля.....	62
3.3.1 Функціональний зв'язок потокозчеплення з силою тяги на колесі електромобіля	63
3.3.2 Функціональний зв'язок струму інвертора з опором обмоток статора електродвигуна	64
3.3.3 Функціональний зв'язок дисипації трансмісії електромобіля з силою, що витрачається на обертання трансмісії	65
3.3.4 Функціональний зв'язок опору високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї із її напругою	67
3.4 Висновки	68
4 МЕТОДИКА ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВОГО ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УМОВАХ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ	69
4.1 Вимоги до обладнання для діагностування силового приводу електромобіля	69
4.2 Обладнання для діагностування силового приводу електромобіля	72
4.3 Методика діагностування силового приводу електромобіля.....	74
4.4 Економічний ефект від впровадження методики	78
4.5 Висновки	82
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	85
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	89
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	104

ВСТУП

Актуальність теми.

В останні роки ключовим напрямом розвитку автомобільного транспорту стало збільшення кількості машин з електричними силовими установками. Аналіз статистичних даних свідчить, що їхня кількість і надалі зростатиме, а питання технічного обслуговування, відновлення працездатності та забезпечення якісної діагностики для ефективної й безпечної експлуатації електромобілів набувають особливої актуальності.

Складність конструкцій електромобілів, їх систем та агрегатів часто призводить до періодичного виникнення відмов. При цьому значна частина часових витрат при простої електромобіля припадає не на ремонтні роботи з усунення несправності, а на пошук несправного агрегату та визначення причин його відмови. Відсутність сучасних методів діагностики та обладнання для їх реалізації унеможливорює ефективний пошук несправностей електромобілів і визначення їх причин.

За допомогою діагностичного сканера неможливо оцінити стан електричного силового приводу по потужності, ефективність роботи трансмісії, ефективність роботи силової установки в режимі рекуперації енергії тощо. Проте ефективно здійснювати діагностування силового приводу електромобіля дозволяють стенди з біговими барабанами.

Проте існуючі методи діагностики та обладнання, що їх реалізує, не дають можливості задавати всі тестові режими, ідентичні режимам функціонування електромобілів у дорожніх умовах. Отже удосконалення процесів діагностування силового привода електромобіля на стенді з біговими барабанами дозволяє знизити витрати часу під час діагностування та ремонту електромобіля, уникнути непотрібних операцій при виконанні робіт та знизити імовірність постановки неправильного діагнозу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження по темі магістерської роботи належить до основних наукових напрямків кафедри «Автомобілі та транспортний менеджмент» Вінницького національного технічного університету.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення інформативності та оперативності діагностування агрегатів силового приводу електромобілів на стендах із біговими барабанами.

Задачі магістерської кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз існуючих методів та наукових підходів діагностування автомобілів та електромобілів зокрема на стендах з біговими барабанами;
- проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази СТОА «Master Service Electro» м. Київ;
- описати математичну модель функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами, розробити алгоритм моделювання функціонування агрегатів силового приводу електромобіля при діагностуванні на стенді з біговими барабанами;
- виконати моделювання функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами, обґрунтувати діагностичні параметри та отримати функціональні залежності діагностичних параметрів від параметрів технічного стану агрегатів електричного силового приводу;
- удосконалити методику діагностування силового приводу електромобіля на стендах з біговими барабанами, обґрунтувати принципову схему діагностичного обладнання та розрахувати ефективність впровадження методики в СТОА «Master Service Electro».

Об'єктом дослідження є процес функціонування електромобілів при діагностуванні їхнього технічного стану на стендах з біговими барабанами.

Предметом дослідження є функціональні залежності діагностичних параметрів та показників тягово-динамічних властивостей електромобілів від параметрів технічного стану агрегатів електричного силового приводу при діагностуванні на стендах з біговими барабанами.

Новизна роботи:

– удосконалено методи діагностики та підходи до проектування обладнання для контролю технічного стану силового приводу електромобіля на стендах з біговими барабанами;

– отримали подальший розвиток математичні моделі, які описують функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами.

Практична цінність роботи полягає у підвищенні якості контролю технічного стану агрегатів електричного силового приводу автомобілів в умовах СТОА за рахунок зниження трудомісткості та підвищення оперативності робіт.

Апробація результатів. Основні положення магістерської роботи апробовано на міжнародній науково-технічній інтернет-конференції конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)».

Публікації. За результатами виконання магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані 1 тези доповіді [3].

1 СТАН ПРОБЛЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ «MASTER SERVICE ELECTRO»

1.1 Тенденції електрифікації на автомобільному транспорті

В умовах суворих екологічних норм для традиційних ДВЗ, спрямованих на зменшення кількості шкідливих викидів, дедалі частіше застосовуються електрифіковані силові приводи в конструкції автомобілів.

Сучасні електричні силові приводи на автомобілях є складними технічними системами, що з безперервним їх вдосконаленням. Складність конструкцій електричних силових приводів, їх систем та агрегатів часто призводить до періодичного виникнення відмов. Попередній аналіз відмов електрифікованих автомобілів та електромобілів, що обслуговуються СТОА мережі «Master Service» та «Master Service Electro», дозволив виявити основні системи, вузли та агрегати електричного силового приводу, у яких найчастіше виникають несправності в умовах експлуатації. Результати аналізу представлено а рисунку 1.1.

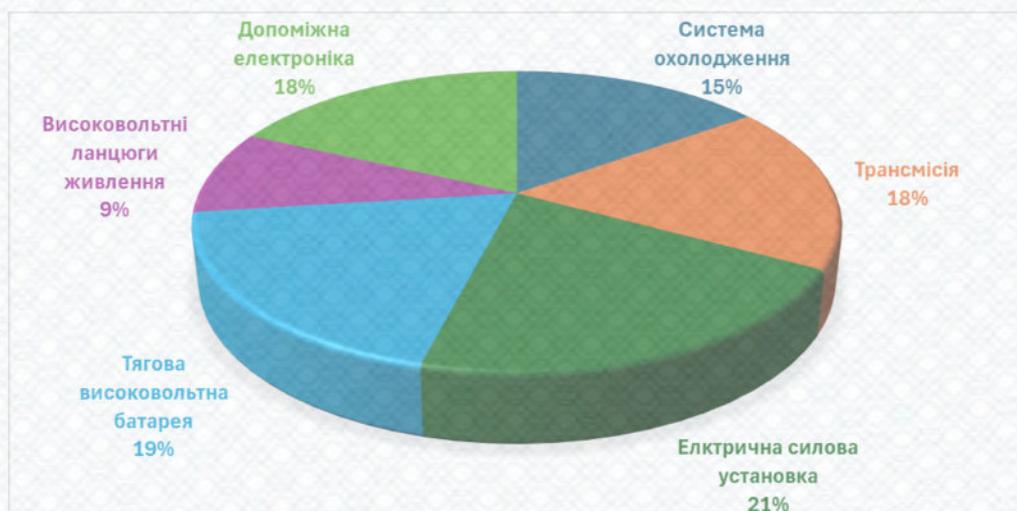


Рисунок 1.1 – Основні елементи електричного силового приводу, в яких виникають несправності

Аналіз отриманих даних показує, що на електричну силову установку та трансмісію припадає до 39% відмов, а на високовольтну тягову батарею та ланцюги живлення — близько 28%. Найчастішою причиною виходу з ладу елементів електричного силового приводу є порушення температурного режиму роботи силової установки. Несправності, спричинені відмовою системи охолодження електричного силового приводу, становлять приблизно 15% випадків.

Автомобілі з електроприводом відрізняються більшою динамічністю під час експлуатації, оскільки електродвигун (ЕД) здатний розвивати максимальний крутний момент M_e вже на низькій частоті обертання ротора. Така особливість часто спонукає водіїв електромобілів та електрифікованих транспортних засобів до агресивного стилю керування. Унаслідок частих динамічних розгонів і більш жорстких умов експлуатації приблизно у 18% випадків виникає відмова трансмісії, що пов'язана з виходом з ладу підшипників, приводних валів та корпусу редуктора.

Неоптимальні погодні та кліматичні умови експлуатації електротранспорту (високі або низькі температури навколишнього середовища), а також порушення режиму заряду тягових високовольтних батарей у 19% випадків призводять до їх передчасного виходу з ладу. Крім того, приблизно у 9% випадків відбувається відмова високовольтних ланцюгів живлення через окислення, спричинене порушенням герметичності з'єднань.

Окрім зазначених несправностей, близько 18% припадає на відмови допоміжної електроніки, яка має менший вплив на безпеку та ефективність експлуатації електрифікованих і електричних автомобілів.

1.2 Огляд конструкцій автомобілів з електричним силовим приводом

Під терміном автомобілі з електричним силовим приводом слід мати на увазі всі автомобілі, які рухаються за допомогою електроенергії. До таких автомобілів слід відносити як електромобілі з тяговою батареєю, так і гібридні автомобілі, зокрема і автомобілі, у конструкції яких використовуються паливні елементи [27].

Варто зазначити, що дана робота спрямована на вивчення проблеми діагностування електричних силових приводів виключно в електромобілях з тяговими акумуляторними батареями.

Класифікувати автомобільні електричні силові приводу прийнято за способом подачі електричної енергії на силовий привід. Якщо провести класифікацію за ступенем «гібридизації» автомобіля, починаючи від автомобіля з ДВЗ, то всі автомобілі можна розділити за такими ознаками [20, 27].

Традиційні (звичайні) автомобілі — це транспортні засоби, в яких використовується ДВЗ. У цьому випадку як паливо можуть застосовуватися бензин, дизельне паливо або скраплений газ.

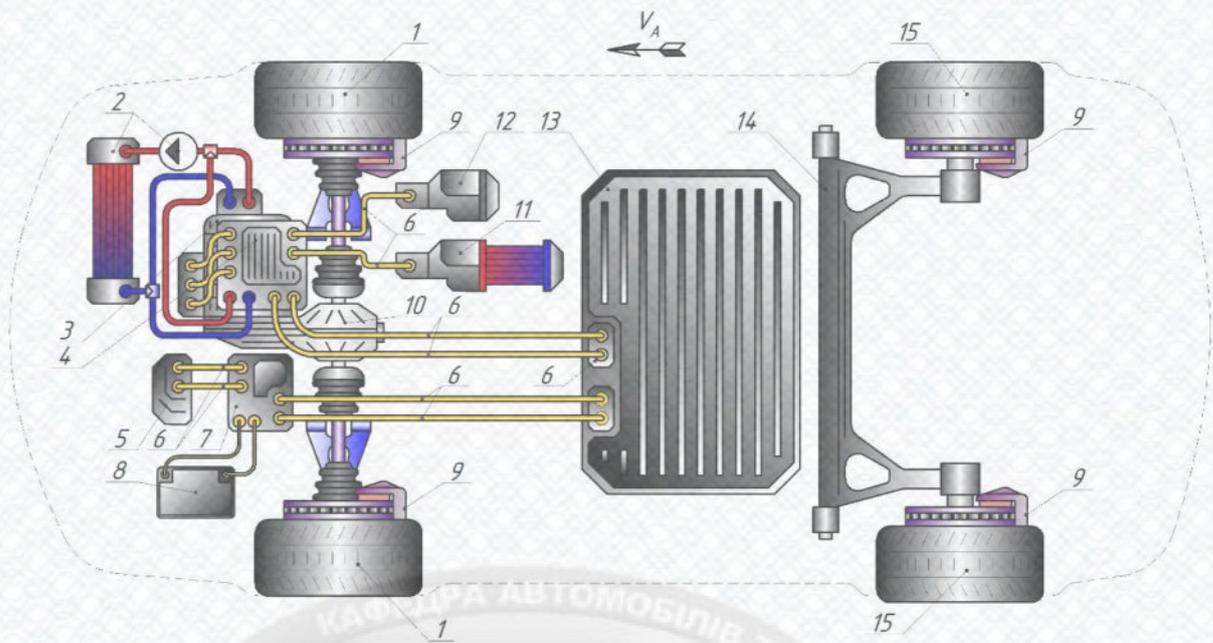
Мікрогібриди — це автомобілі, у яких силові електричні компоненти виконують лише функцію «Старт/Стоп». Зазвичай це традиційний автомобіль, оснащений додатковою системою для запуску двигуна.

М'який гібрид — це автомобіль, подібний до мікрогібрида, але крім функції «Старт/Стоп» електродвигун (ЕД) додатково підтримує роботу ДВЗ. Рух виключно на електричному приводі неможливий, проте передбачена система рекуперації енергії.

Повний гібрид (HEV — Hybrid Electric Vehicle — Full HEV) — це аналог середнього гібрида, але додатково електродвигун може забезпечувати рух без участі ДВЗ. Автомобіль здатний пересуватися виключно за допомогою електричного приводу. Типовим прикладом повного гібрида є Toyota Prius.

Плагін-гібрид (PHEV — Plugin Hybrid Electric Vehicle — автомобіль із гібридним приводом, що може заряджати тягову батарею від електромережі або зарядної станції) — це аналог повного гібрида, але з додатковою можливістю заряджання високовольтної батареї від зовнішнього джерела. Одним із типових представників плагін-гібридів є Mitsubishi Outlander PHEV.

Акумуляторні електромобілі (BEV – Battery Electric Vehicle, EV – Electric Vehicle) – «чисті» електромобілі, які рухаються тільки за допомогою електричного приводу (рис. 1.2).



1 – ведучі колеса; 2 – система термостатування електричного силового приводу; 3 – електродвигун; 4 – блок керування електричним силовим приводом; 5 – зарядний пристрій; 6 – високовольтні проводи; 7 – перетворювач напруги; 8 – 12-вольтова акумуляторна батарея; 9 – гальмівна система; 10 – трансмісія; 11 – обігрівач салону; 12 – кондиціонер; 13 – високовольтна батарея; 14 – елементи задньої підвіски; 15 – ведені колеса

Рисунок 1.2 – Схема батарейного електромобіля

У автомобілів із ДВЗ та електричним силовим приводом є багато спільних або схожих елементів, таких як кузов, підвіска тощо. Основними складовими електричного силового приводу електромобіля є електродвигун-генератор (ЕДГ) 3 та редуктор із головною передачею 10. Коробка перемикання передач в електромобілях відсутня, оскільки крутного моменту, який розвиває ЕДГ 3, достатньо для початку руху автомобіля. Роботою ЕДГ керує силовий блок 4. Система охолодження 2 забезпечує відведення тепла як від ЕДГ 3, так і від силової електроніки 4. Керування системою клімат-контролю (обігрівач салону 11, кондиціонер 12) та рекуперативною гальмівною системою здійснюється блоком управління 4 через високовольтні проводи. У традиційних автомобілях ці пристрої працювали за рахунок відбору теплової чи іншої енергії від ДВЗ. В електромобілях обігрівач салону 11, кондиціонер 12 та рекуперативна гальмівна система живляться

від високовольтної батареї 13 і разом з ЕДГ 3 утворюють силову систему електромобіля. [20, 27].

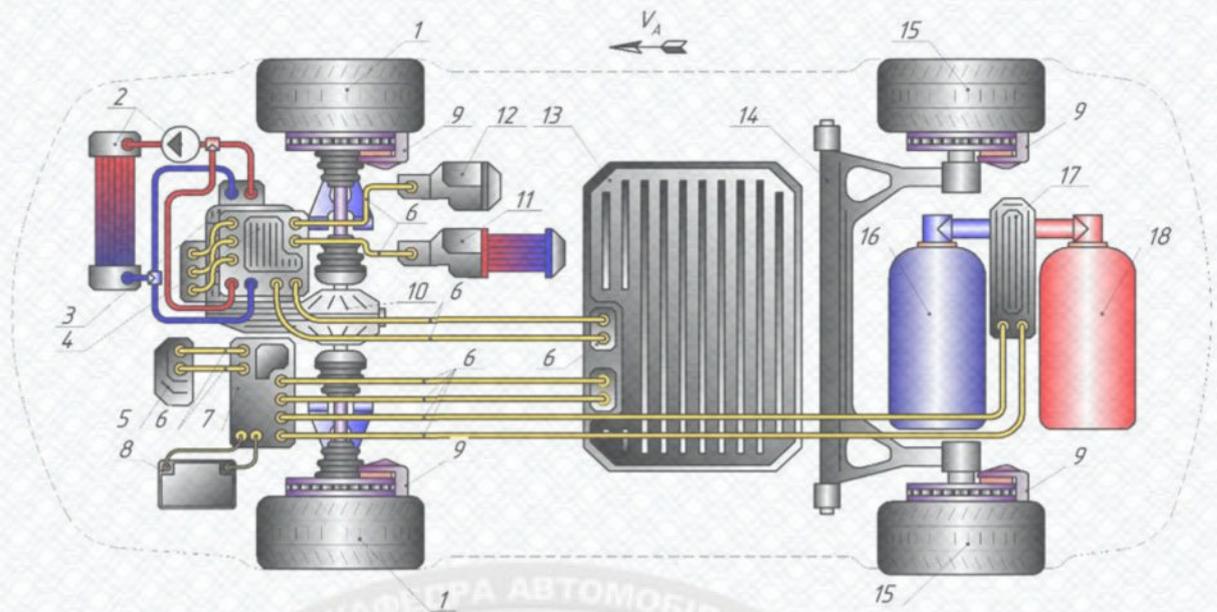
Допоміжні електронні системи силового привода електромобіля працюють від 12-вольтової мережі постійного струму. Для їх живлення використовується акумуляторна батарея 8 з номінальною напругою 12 В та перетворювач напруги 7. Заряджання 12-вольтової батареї здійснюється від високовольтної батареї 13 під час руху або від зарядного пристрою 5, коли електромобіль підключений до мережі. Перетворювач 7 служить для зниження високої напруги до низької. У деяких електромобілях перетворювач напруги 7 може бути інтегрований в один блок разом із силовою електронікою 4 та блоком управління. [20, 27].

При функціонуванні електромобіля з тягової високовольтної батареї 13 електроенергія передається на блок управління 4. Штатний зарядний пристрій 5 реалізує можливість заряджання тягової батареї від електричної мережі.

Автомобілі з електричним силовим приводом, під час експлуатації яких відсутні викиди шкідливих речовин у атмосферу, класифікуються як Zero Emission Vehicle (ZEV) або Zero Emission (ZE). Найбільш типовими представниками цього класу є Nissan Leaf та Kia Soul EV. [20, 27].

Електромобілі на паливних елементах (FCBEV, FCEV - Fuel Cell (Battery) Electric Vehicle – (батареїні) електромобілі з паливними елементами) – це електромобілі, що рухаються тільки електричним приводом з додатковими хімічними перетворювачами енергії (рис. 1.3) [20,27].

Загалом конструкція (батареїного) електромобіля з паливними елементами багато в чому схожа на конструкцію звичайного батарейного електромобіля. Відмінність полягає в тому, що в якості джерела енергії, крім батареї (яка в деяких автомобілів може заряджатися від мережі), в електромобілях на паливних елементах є електрохімічний паливний елемент 17, який виробляє електричну енергію завдяки хімічній реакції між воднем і киснем. Водень, що виконує роль палива, заправляється в окремий паливний балон 16. Для забезпечення паливних елементів киснем використовується кисень, наявний в повітрі, в деяких випадках може встановлюватись балон з киснем 18 [20,27].



1 – ведучі колеса; 2 – система охолодження; 3 – електродвигун-генератор; 4 – блок управління; 5 – зарядний пристрій (за наявності); 6 – високовольтні провoda; 7 – перетворювач напруги; 8 – 12-вольтова АКБ; 9 – гальмівна система; 10 – трансмісія; 11 – обігрівач салону; 12 – кондиціонер; 13 – високовольтна батарея; 14 – елементи задньої підвіски; 15 – ведені колеса; 16 – балон із воднем; 17 – паливний елемент; 18 – система подачі повітря (кисню), або балон з киснем

Рисунок 1.3 – Схема електромобіля з паливними елементами

Згідно з експертними оцінками [30], визначено найбільш характерні режими руху електромобіля як у міських умовах, так і під час замських поїздок. Типові режими роботи електромобіля в міському та замському циклах наведені на рисунку 1.4. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити режими руху, що найчастіше зустрічаються під час експлуатації електромобілів. До них належать:

- розгін на горизонтальній дорозі та/або на підйомі;
- вибіг на горизонтальній дорозі та/або на підйомі;
- гальмування гальмівною системою та/або двигуном;
- рух із постійною швидкістю на горизонтальній дорозі;
- рух із постійною швидкістю під навантаженням (наприклад, рух у гору).

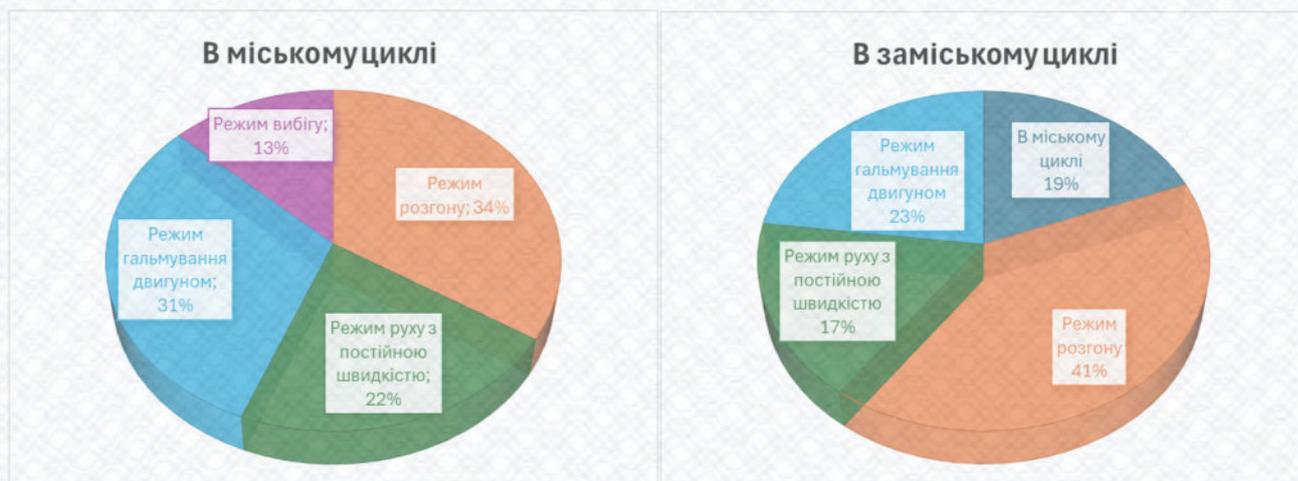


Рисунок 1.4 – Типові режими руху електромобіля

Відтворення кожного з наведених режимів руху у стендових умовах дає змогу повноцінно оцінити тягово-швидкісні характеристики автомобіля. Це, у свою чергу, забезпечує ефективний контроль технічного стану силового привода електромобіля на тягових стендах із біговими барабанами. Такий підхід значно підвищує інформативність і оперативність діагностики агрегатів силового привода, що позитивно впливає на ефективність експлуатації.

1.3 Методи та засоби діагностування силового привода електромобілів

Більша частина часу витрачається на локалізацію несправності та визначення причин її виникнення, а не на самі ремонтні роботи. Ефективний контроль технічного стану силового привода електромобіля неможливий без сучасних методів діагностики та відповідного обладнання. Використання методів контролю технічного стану агрегатів силового привода є ключовим елементом стратегії підтримки електромобілів, адже дозволяє суттєво скоротити час на пошук несправностей і встановлення діагнозу. Це, у свою чергу, знижує витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також підвищує рівень безпеки під час експлуатації.

Методи діагностування, що застосовуються для визначення технічного стану агрегатів автомобілів, поділяються на три групи (рис. 1.5). Перша група передбачає вимірювання основних експлуатаційних характеристик автомобіля, що дозволяє оцінити його працездатність та загальні експлуатаційні властивості. До другої групи належать методи, засновані на вимірюванні параметрів процесів, які супроводжують роботу автомобіля, його систем, агрегатів і механізмів. Використання другої групи дає змогу визначити конкретні причини несправностей. Тому при контролі технічного стану автомобіля застосовують принцип «від загального до конкретного»: спочатку використовують методи першої групи, а потім — методи другої групи для точного встановлення причин відмови агрегатів.



Рисунок 1.5 – Класифікація методів діагностування автомобілів

Контроль технічного стану агрегатів силового приводу електромобілів доцільно виконувати на силових (тягових) стендах з біговими барабанами, оскільки такий метод дозволяє отримати більш повну інформацію про технічний стан об'єкта діагностування [11-15, 17]. Однак реалізація цього методу ускладнюється браком знань про роботу силового приводу електромобілів на тягових стендах. По-

перше, відсутні науково обґрунтовані тестові режими, що забезпечують ефективний контроль технічного стану агрегатів силового привода в стендових умовах. По-друге, немає достатньої інформації про діагностичні параметри та їх нормативні значення, придатні для такого контролю. По-третє, не встановлено функціональні залежності між параметрами технічного стану агрегатів силового привода та діагностичними показниками. Крім того, необхідно визначити оптимальний метод контролю технічного стану агрегатів силового привода електромобілів.

Контроль технічного стану силового приво́ду електромобі́ля може виконуватися як стендовим, так і дорожнім методом.

Існуючі методи дорожнього діагностування технічного стану силового привода електромобілів виконуються без застосування дорогого діагностичного обладнання, що робить їх доступними та економічними. Однак такі методи не набули широкого поширення. По-перше, їх реалізація неможлива за несприятливих погодних умов. По-друге, у міських умовах неможливо безпечно створювати тестові впливи, необхідні для виявлення несправностей та їх причин. По-третє, дорожні методи не дозволяють вимірювати ключові параметри, такі як сила тяги на ведучому колесі або сила рекуперативного гальмування, що унеможлиблює кількісну оцінку технічного стану агрегатів силового привода. Усе це робить дорожні методи контролю малоефективними та обмежує їх застосування в реальних умовах експлуатації. [9, 10, 15, 17, 21].

Для визначення працездатності агрегатів силового привода електромобіля можна застосовувати діагностичні сканери, проте вони не завжди забезпечують повну інформацію про технічний стан об'єкта діагностування. За допомогою сканера неможливо оцінити потужність силового привода, ефективність роботи трансмісії та функціонування електричного привода в режимі рекуперації енергії, оскільки для цього необхідно, щоб силовий привід працював у режимах, найбільш характерних для реальних умов експлуатації. Виконати такі перевірки неможливо ні в межах сучасних населених пунктів, ні на дорогах загального користування.

З цієї причини найбільше ефективно контролювати тягово-швидкісні властивості автомобілів дозволяють тягові стенди з біговими барабанами. Вони є одним із найінформативніших засобів діагностування автомобілів в умовах експлуатації, оскільки забезпечують отримання більш точної та детальної інформації про стан об'єкта діагностування. Стендовий метод контролю технічного стану агрегатів автомобілів набув широкого застосування, адже його реалізація відбувається в закритих приміщеннях, без впливу зовнішніх факторів. Крім того, використання стендів із біговими барабанами дозволяє здійснювати кількісну оцінку технічного стану електричного силового приводу, наприклад, шляхом вимірювання основних тягово-динамічних параметрів автомобіля.

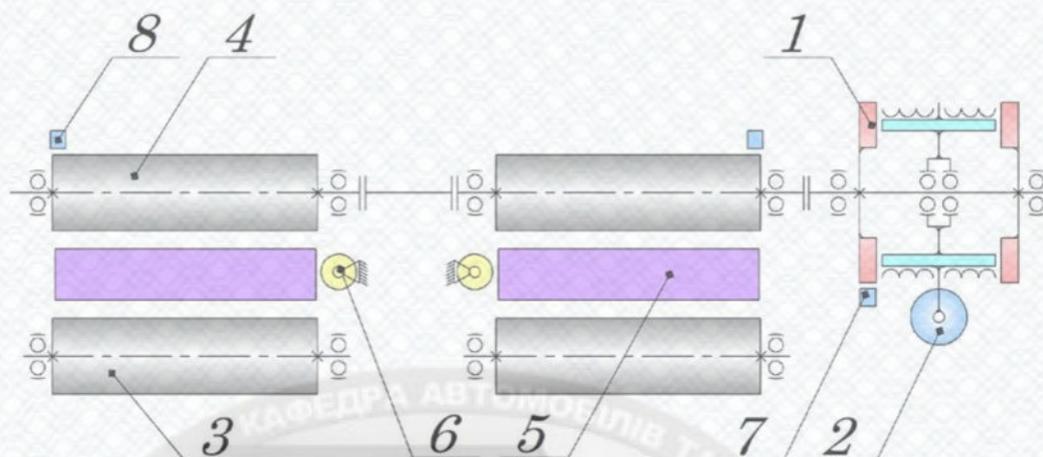
1.4 Стенди з біговими барабанами для діагностики електричного силового приводу

Далеко не всі стенди з біговими барабанами та методи, які вони реалізують, коректно відображають тягово-швидкісні властивості силових приводів автомобілів. Найбільш точні та інформативні дані для встановлення діагнозу забезпечують силові стенди контролю технічного стану автомобілів. Стенди силового типу дозволяють вимірювати такі параметри, як сила тяги та потужність на колесах, а також силу і потужність, що витрачаються на обертання трансмісії.

Сучасні силові стенди (рис. 1.6) складаються з двох блоків із передніми 4 та задніми 3 біговими барабанами. Бігові барабани 3 і 4 слугують опорою для коліс автомобіля, а їхня швидкість обертання контролюється датчиками 8, що вимірюють частоту обертання барабанів.

Електродинамічне гальмо 1 виконує роль навантажувального пристрою та під час імітації розгону автомобіля на стендах із біговими барабанами створює силовий вплив на силову установку, який вимірюється датчиком зусилля 2. Швидкість обертання ротора електродинамічного гальма фіксується датчиком 7.

Сигнали, отримані від датчиків частоти, передаються до програмного забезпечення для обробки та постановки діагнозу.



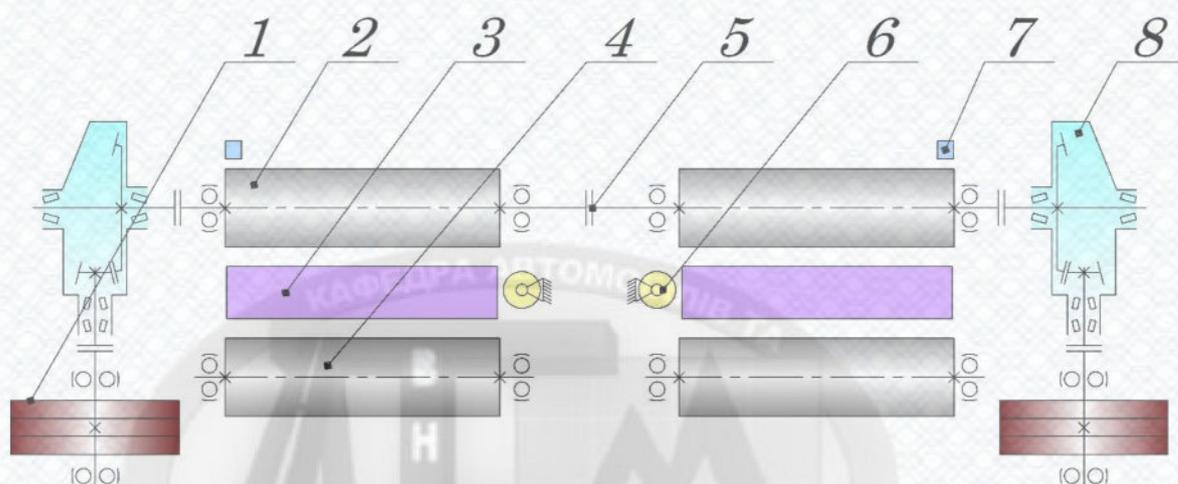
- 1 – електродинамічне гальмо; 2 – датчик зусилля на електродинамічному гальмі; 3 – задній бiговий барабан; 4 – передній бiговий барабан; 5 – підйомно-виштовхувальний пристрій; 6 – обмежувальний ролик-вiдбiйник; 7 – датчик частоти обертання електродинамічного гальма; 8 – датчик частоти обертання бiгового барабана

Рисунок 1.6 – Структура силового стелда з бiговими барабанами

Головний недолiк силових стелдiв з бiговими барабанами полягає у неможливостi вiдтворення невстановлених тестових впливiв. Силовi стелди не здатнi iмiтувати рух автомобiля в режимах розгону та вибiгу, хоча саме в цих режимах можна визначити бiльшiсть несправностей. Тому для повного та iнформативного контролю технiчного стану агрегатiв силового привода електромобiлiв на стелдах iз бiговими барабанами необхідно забезпечити iмiтацiю розгону автомобiля, що неможливо реалiзувати на стелдах силового типу.

Прямою протилежнiстю силовим стелдам є стелди з бiговими барабанами iнерцiйного типу, що реалiзують динамiчнi методи дiагностики автомобiлiв. Iнерцiйнi стелди з бiговими барабанами (рис. 1.7) складаються з блокiв iз переднiми 2 та заднiми 4 бiговими барабанами. Кожна пара барабанiв 2 i 4 з'єднана муфтою з редуктором 8, який, у свою чергу, пов'язаний з iнерцiйною маховою

масою 1, що виконує функцію навантажувального пристрою. Датчики 7, розташовані біля бігових барабанів 2, фіксують їхню частоту обертання. Подальша обробка сигналів, отриманих від вимірювальних датчиків, здійснюється програмним забезпеченням діагностичного стенду.



1 – інерційна махова маса; 2 – передній біговий барабан; 3 - підіймно-виштовхувальний пристрій; 4 – задній біговий барабан; 5 – муфта; 6 – відбійний ролик; 7 – датчик реєстрації швидкості обертання колеса; 8 – редуктор

Рисунок 1.7 – Структура інерційного стенда з біговими барабанами

Найбільш суттєва різниця між силовими та інерційними стендами з біговими барабанами полягає у переліку параметрів, які вони реєструють під час роботи автомобіля. До таких параметрів належать час і шлях розгону, а також час і шлях вибігу. Аналіз конструкцій стендів для оцінки тягових характеристик показує, що існують також інерційно-силові стенди, які поєднують силовий та інерційний методи задавання тестових режимів. Вимірювання силових параметрів на таких стендах здійснюється за допомогою датчика сили, встановленого на балансирному вихрострумівому гальмі.

Усі зазначені стенди здатні вимірювати сумарну тягову силу на ведучих колесах автомобіля. Однак для сучасних електромобілів необхідно контролювати силу тяги на кожному колесі окремо.

Кінематичні та часові параметри, що вимірюються на інерційних стендах, є нестабільними, малопоказовими та потребують великої кількості повторних вимірювань. Водночас інерційні стенди дозволяють імітувати динамічні режими — розгін і вибіг, які є надзвичайно важливими та інформативними для оцінки технічного стану агрегатів автомобіля.

Для контролю тягово-швидкісних характеристик автомобілів на стендах необхідно вимірювати як швидкість обертання коліс, так і силу тяги на них. Тому для якісного аналізу тягово-швидкісних властивостей електромобілів слід здійснювати контроль їх роботи як у сталих режимах, так і в режимі «розгін – вибіг». Це передбачає як окреме використання зазначених режимів, так і їх раціональне поєднання.

Аналіз наявних методів та кінематичних схем стендів, що їх реалізують, свідчить, що наразі відсутнє обладнання, яке дозволяє вимірювати силу тяги на кожному ведучому колесі транспортного засобу та одночасно забезпечувати застосування силового і динамічного методів як окремо, так і в комплексі.

Підсумовуючи наведене, можна зробити висновок, що використання гібридних стендів, які поєднують переваги інерційних та силових конструкцій, є найбільш ефективним з точки зору діагностики. Такі стенди дозволяють відтворювати навантаження на автомобіль, максимально наближене до реальних умов експлуатації. При цьому особливо важливо вимірювати саме силові параметри, адже вони значно більш інформативні та стабільні порівняно з часовими та кінематичними показниками – шляхом і швидкістю.

1.5 Загальна характеристика станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» м. Київ

Мережа автосервісних підприємств «Master Service» надає широкий перелік послуг по обслуговуванню та ремонту автомобілів, включаючи електромобілі та гібриди. Мережа СТОА налічує 11 філій в Україні та Польщі, зокрема в містах Київ,

Харків, Дніпро, Львів, Одеса та Варшава. Для обслуговування електромобілів та гібридів було створено дві спеціалізовані СТОА «Master Service Electro» в м. Київ та Харків.

Маючи великі потужності та власний R&D центр – підприємство здійснює розробку нового технологічного обладнання та спецінструменту під брендом «MSG Equipment». Зокрема обладнання для обслуговування і ремонту:

- стартерів і генераторів;
- вузлів рульового керування;
- систем кондиціонування;
- амортизаторів;
- вузлів гальмівних систем;
- промивки сажових фільтрів;
- електромобілів.

СТОА «Master Service Electro» в м. Київ знаходиться за адресою вул. М. Грінченка, 18 (рис. 1.8, 1.9).

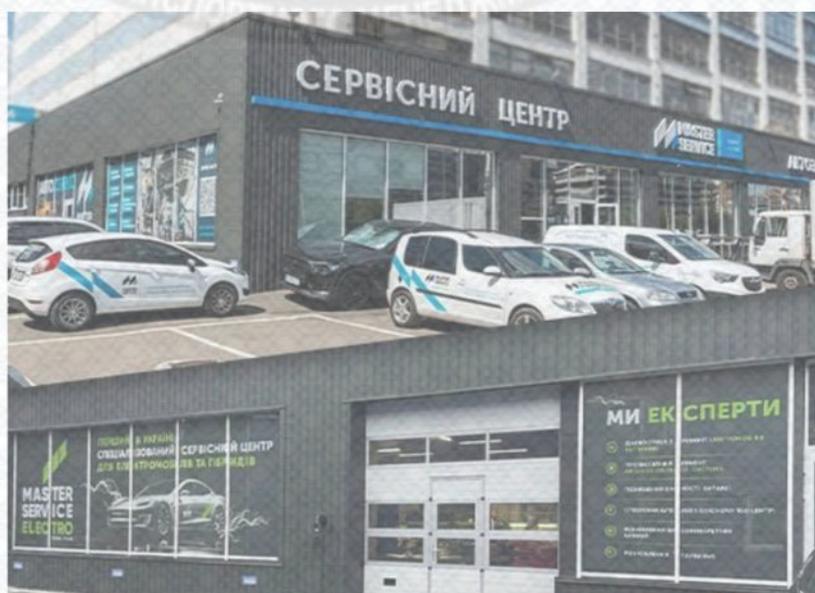


Рисунок 1.8 – СТОА «Master Service» та «Master Service Electro» в м. Київ, вул. М. Грінченка, 18



Рисунок 1.9 – СТОА «Master Service Electric» в м. Київ, вул. М. Грінченка, 18

Основними видами діяльності СТОА «Master Service Electro» є обслуговування і ремонт електромобілів та гібридів. Маючи сучасне діагностичне обладнання, в тому числі власного виробництва, фахівці СТОА здатні вирішити проблеми будь-якої складності, виконують роботи за які інші автосервіси навіть не беруться.

СТОА «Master Service Electro» надає такий перелік послуг:

- відновлення електродвигунів та силових приводів електромобілів та гібридів;
- діагностування та ремонт високовольтних батарей;
- ремонт зарядних модулів;
- ремонт несправностей у високовольтній та низьковольтній системах;
- ремонт систем термостатування батарей та терморегулювання електромобілів та гібридів, ремонт електричних обігрівачів;
- ремонт гальмівних систем та систем рекуперації;
- ремонт інверторів, DC/DC перетворювачів та іншого електрообладнання електромобілів та гібридів;
- інші послуги з ремонту систем вузлів і агрегатів електромобілів та гібридів.

СТОА «Master Service Electric» є мультимарочною, обслуговуючи всі марки електромобілів та гібридів, включаючи електромобілі Tesla та китайські електромобілі. СТОА «Master Service Electric» надає гарантію на виконані роботи.

1.6 Характеристика виробничо-технічної бази СТОА «Master Service Electro» м. Київ

СТОА «Master Service Electro» розташовано в спільній будівлі, в якій також знаходяться СТОА «Master Service» та інші підприємства. СТОА розташовано на першому поверсі. На території є стоянка автомобілів, обладнане місце відпочинку для клієнтів станції.

Заїзд на територію підприємства здійснюється з вул. М. Грінченка.

Основна будівля прямокутної форми. Висота стелі в виробничих приміщеннях 5 м. В корпусі СТОА «Master Service Electro» розташовані наступні приміщення:

- зона ТО і ПР електромобілів та гібридів на 10 виробничих постів;
- дільниця ремонту високовольтних акумуляторних батарей;
- дільниця ремонту електричного та електронного обладнання електромобілів та гібридів;
- дільниця ремонту силових приводів та електродвигунів;
- склад;
- адміністративні приміщення та приміщення для клієнтів;
- побутовий блок.

В зоні ТО і ПР розташовано 10 тупикових паралельних постів ТО і ПР обладнані двостійковими підйомниками.

СТО обладнані сучасним діагностичним та ремонтним стендовим обладнанням, в тому числі власного виробництва, спеціалізованим фірмовим обладнанням окремих автовиробників. На СТО встановлена сучасна система вентиляції та видалення відпрацьованих газів.

Аналіз переліку обладнання показав його достатність для виконання робіт з ТО і ПР електромобілів та гібридів. ТО і ремонт вузлів систем і агрегатів, які є аналогічними до звичайних автомобілів здійснюється на потужностях СТОА «Master Service», яка знаходиться в суміжних приміщеннях. Крім того СТОА «Master Service» має в свої структурі гальмівний стенд, тяговий стенд, стенд ходових властивостей, що дозволяє виконувати повний перелік робіт на потужностях автосервісних підприємств «Master Service» та «Master Service Electric».

Проаналізувавши стан ВТБ СТОА «Master Service Electro» можна зазначити, що ВТБ придатна для якісного виконання робіт ТО і ремонту електромобілів та гібридів. Завантаженість ВТБ досить висока, тому підвищення її ефективності передбачає покращення технологічних процесів виконання робіт, і в першу чергу діагностичних.

1.7 Висновки

1. На сьогодні спостерігається чітка тенденція до електрифікації автомобільного транспорту, що супроводжується відмовою від двигунів внутрішнього згоряння та зростанням кількості автомобілів з електричним силовим приводом. Такі автомобілі, як і транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння, потребують регулярного технічного обслуговування, ремонту, діагностики та контролю технічного стану їхніх агрегатів.

2. Аналіз методів контролю технічного стану агрегатів автомобілів з електричним силовим приводом показує, що стендові методи призначені на вирішення обмеженого переліку завдань. Існуючі методи контролю технічного стану агрегатів автомобілів і обладнання, що їх реалізує, не надають можливості задавати всі тестові режими, ідентичні типовим дорожнім режимам функціонування електромобілів. За допомогою сучасних методів контролю технічного стану практично неможливо оцінити ефективність функціонування

автомобілів з силовим електричним приводом в режимі рекуперації енергії. Це призводить до неможливості отримання повноцінної інформації про стан електричного приводу.

3. Контроль технічного стану автомобілів з електричним силовим приводом стендовим методом наразі потребує удосконалення з метою адаптації до процесів функціонування автомобілів з електричним силовим приводом на стендах з біговими барабанами.

4. Виконавши аналіз структури і стану ВТБ СТОА «Master Service Electro» встановлено, що СТОА надає спеціалізовані послуги з обслуговування та ремонту електромобілів та гібридів. Існуюча ВТБ в цілому відповідає поставленим задачам. Вдосконалення роботи СТОА можливо шляхом удосконалення виробничих процесів діагностування і ремонту. Удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобіля дозволить знизити трудовитрати робітників на виконання робіт по діагностуванню і ремонту електромобілів.

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНТРОЛЮ СИЛОВОГО ПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА СТЕНДІ З БІГОВИМИ БАРАБАНАМИ

2.1 Виявлення взаємозв'язків у системі «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»

Для реалізації аналітичного дослідження процесу функціонування «системи силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами» було визначено чинники, що впливають на об'єкт дослідження. Регулювання процесу функціонування об'єкта дослідження здійснюється з допомогою керуючих факторів.

Керуючими називають фактори, що впливають на об'єкт дослідження під час його функціонування. Саме ці фактори визначають тестові режими при контролі технічного стану силового привода електромобіля. До них належать коефіцієнт керування електродвигуном силової установки β_e , гальмівний момент електродинамічного гальма M_T , а також сумарний момент інерції махових мас стенда з біговими барабанами ΣM_J .

Зовнішніми факторами досліджуваного процесу виступають температура навколишнього середовища T_e та атмосферний тиск $P_{атм}$. Ці фактори можуть суттєво впливати на роботу силового привода електромобіля у випадку, якщо не застосовуються жодні захисні заходи.

Фактори, що визначають поточний стан об'єкта дослідження, прийнято називати внутрішніми. Вони також відображають особливості його функціонування. У цьому випадку до внутрішніх факторів належать потокозчеплення в електродвигуні, опір обмоток статора електродвигуна R_A, R_B, R_C , опір високовольтного кола $R_{ВЦ}$, ємність високовольтної тягової батареї QVAT, а також втрати на тертя в підшипниках електродвигуна d_e та редуктора $d_{ред}$.

Вихідними параметрами є сила R_X тяги на колесах; швидкість V_A , що моделюється на стенді; струм, споживаний електродвигуном I_e ; потужність N_e та

крутний момент M_e , які розвиває електродвигун. На основі вихідних параметрів об'єкта дослідження можна точно й інформативно оцінити його технічний стан.

Для більш глибокого аналізу досліджуваного процесу та виявлення внутрішніх взаємозв'язків була розроблена детальна структурна схема (рис. 2.1). Схема системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами» дає змогу детально визначати та аналізувати причинно-наслідкові взаємодії й зв'язки між елементами цієї системи.

Прийнято припущення, що досліджуваний процес не зазнає впливу зовнішніх чинників. Це обґрунтовується застосуванням стендового контролю технічного стану силового привода електромобіля, що передбачає розміщення як електромобіля, так і стенду в закритому приміщенні. Така умова свідчить про ізоляцію об'єкта дослідження від впливів навколишнього середовища.

2.2 Обґрунтування тестових режимів діагностування силового привода електромобіля

У процесі діагностування технічного стану агрегатів силового привода електромобіля необхідно забезпечити тестові режими, що включають розгін, рух із постійною швидкістю під навантаженням, вибіг, а також режим рекуперації енергії. При цьому слід виконувати вимірювання силових та кінематичних параметрів на кожному колесі.

Під час експлуатації електромобіля найчастіше застосовуються п'ять основних режимів руху:

- розгін на горизонтальній дорозі та/або на підйомі;
- вибіг на горизонтальній дорозі та/або на підйомі;
- гальмування гальмівною системою та/або двигуном;
- рух із постійною швидкістю на горизонтальній дорозі;
- рух із постійною швидкістю під навантаженням (наприклад, рух у гору).

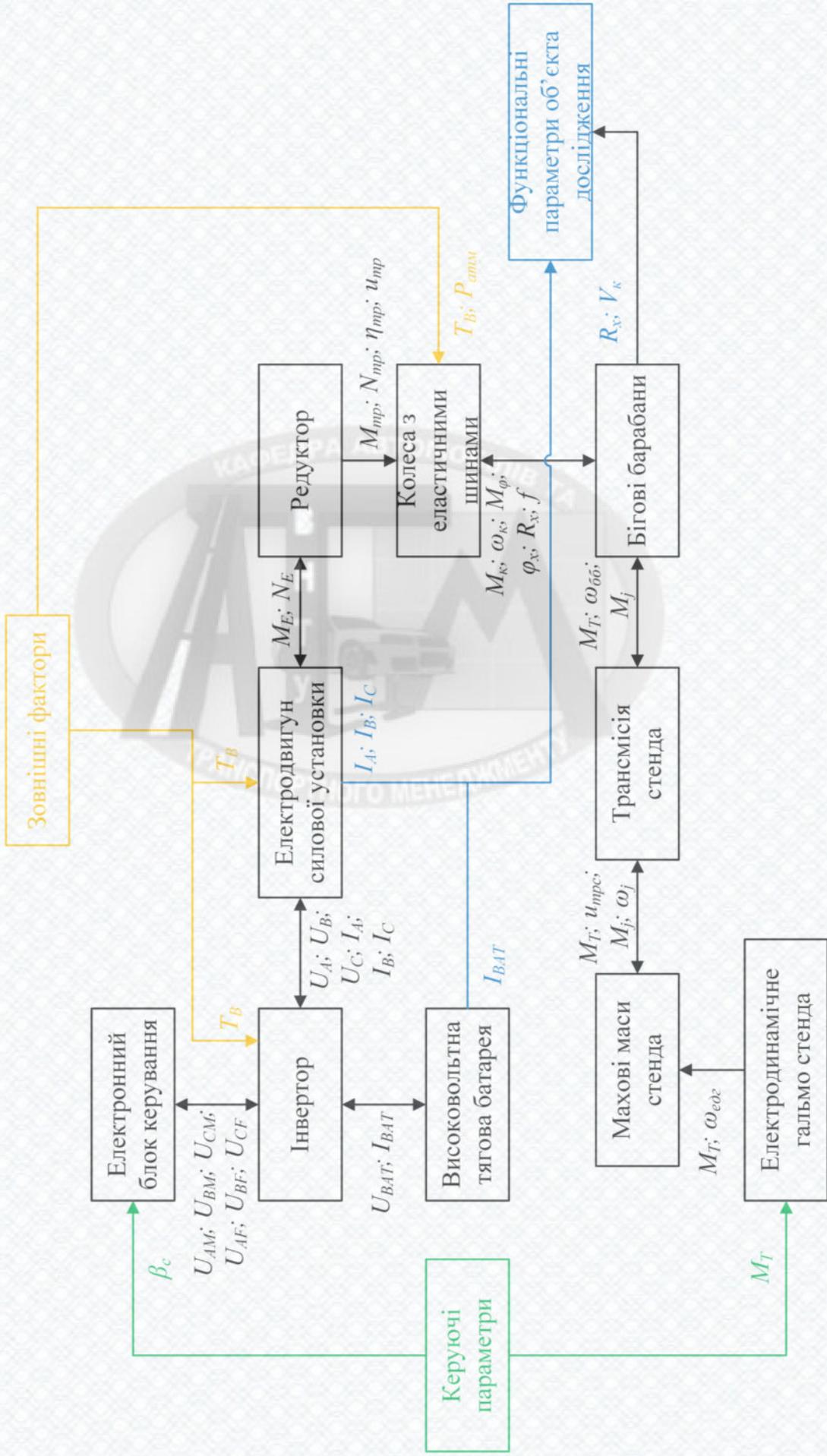


Рисунок 2.1 – Структурна схема процесу функціонування системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими

Для кількісного визначення технічного стану агрегатів силового привода електромобіля необхідно відтворювати тестові впливи, що відповідають реальним режимам роботи електромобіля на дорозі. Стендова імітація кожного з цих режимів значно підвищує ефективність експлуатації електромобіля, забезпечуючи більш повну та точну діагностику агрегатів силового привода.

Рівняння силового балансу на ведучих колесах електромобіля в режимі його розгону в гору в загальному вигляді може бути представлено як [1, 4, 6, 8, 13, 16 18]:

$$F_k = F_f + F_\alpha + F_{wx} + F_{jx} \cdot \delta_j; \quad (2.1)$$

де F_k – сила тяги на ведучих колесах;

F_f – сила опору коченню;

F_α – сила опору підйому;

F_{wx} – сила аеродинамічного опору;

F_{jx} – сила інерції поступального руху електромобіля;

δ_j – коефіцієнт, що враховує інерцію розгону обертових мас.

У розгорнутому вигляді рівняння (2.1), приведене до ведучих колес електромобіля, виглядатиме таким чином [1, 4, 6, 8, 13, 16 18]:

$$\frac{M_e \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = G \cos \alpha \cdot f + G \sin \alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2} + \frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_k \frac{d\omega_k}{dt}}{r_{k0}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}}, \quad (2.2)$$

де i_{mp} – передаточне число трансмісії;

η_{mp} – ККД трансмісії електромобіля;

r_{k0} – радіус кочення колеса в веденому режимі;

G – сила тяжіння електромобіля;

f – коефіцієнт опору коченню;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору автомобіля;

ρ – густина повітря;

S_w – площа лобового перетину авомобіля;

ΣJ_k – сумарний момент інерції коліс автомобіля;

J_e – момент інерції електродвигуна.

Баланс сил на ведучих колесах електромобіля при русі з постійною швидкістю по рівній горизонтальній поверхні показує витрату його сили тяги на подолання сил опору коченню і аеродинамічного силового опору:

$$F_k = F_f + F_{wx}. \quad (2.3)$$

У більш розгорнутій формі вираз (2.3) можна подати як:

$$\frac{M_e \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.4)$$

Баланс сил на ведучих колесах електромобіля під час руху з постійною швидкістю в гору представлений рівнянням виду:

$$F_k = F_f + F_\alpha + F_{wx}. \quad (2.5)$$

У розгорнутій формі вираз (2.5) можна подати як:

$$\frac{M_e \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = G \cos \alpha \cdot f + G \sin \alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.6)$$

У режимі рекуперативного гальмування силовий привід електромобіля за допомогою його електродвигуна на горизонтальній поверхні дороги наведені до ведучих колес сили витрачаються на зниження кінетичної енергії поступального руху електромобіля та обертального руху його мас:

$$F_{jx} \cdot \delta_j = F_{\tau d} + F_f + F_{ix}. \quad (2.7)$$

У розгорнутій формі рівняння (2.7) має вигляд:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt}}{r_{k0}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = \frac{M_{m0} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} + G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}, \quad (2.8)$$

де F_{m0} - підведена до ведучих колес сила гальмування електродвигуном;

M_{m0} - гальмівний момент електродвигуна.

Режим вільного вибігу електромобіля на горизонтальній поверхні описується:

$$F_{jx} = F_f + F_{ix}. \quad (2.9)$$

У розгорнутій формі вираз (2.9) матиме такий вигляд:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt}}{r_{k0}} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.10)$$

Вирази (2.1) – (2.10) описують силовий баланс електромобіля для дорожніх умов їх руху, але не є коректними для опису силового балансу в умовах їхнього функціонування на стенді з біговими барабанами. Для коректного опису процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами необхідне перетворення виразів (2.1) - (2.10) з урахуванням наступних факторів [27].

Насамперед функціонування електромобіля у стендових умовах характеризується тим, що маса автомобіля залишається нерухою. Цей фактор необхідно враховувати під час опису силового балансу на колесах електромобіля. Оскільки відсутнє переміщення маси, відповідно, її швидкість та прискорення

залишаються незмінними та дорівнюють нулю. З урахуванням вищесказаного зміну кінетичної енергії W_a мас електромобіля, що рухаються поступово, який прискорюється або сповільнюється, необхідно імітувати на стенді.

Реалізувати це можна за допомогою кінетичної енергії W_m прискорення та уповільнення обертання махових мас стенда. Таке рішення дозволяє відтворювати динамічні режими функціонування електромобіля у стендових умовах [24].

Прирівнявши величини кінетичних енергій поступального та обертального руху $W_a = W_m$, отримаємо вираз, відповідно до якого можна описати процес розгону електромобіля на стенді з біговими барабанами:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1}{r_{k0}} \sum J_m \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (2.11)$$

За умови, що буксування коліс електромобіля щодо поверхні бігових барабанів стенда відсутнє, кутове прискорення бігових барабанів пов'язане з прискоренням автомобіля та розраховується за формулою:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{dV}{dt} \frac{1}{r_{\sigma}}, \quad (2.12)$$

де r_{σ} - радіус бігового барабана стенду.

Заміна сили інерції поступального розгону маси електромобіля здійснюється відповідно до виразу:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{1}{r_{k0}} \sum \frac{J_m}{r_{\sigma}} \frac{d\omega_m}{dt}. \quad (2.13)$$

Щоб визначити момент інерції махових мас стенда з біговими барабанами необхідно враховувати наведену до бігових барабанів масу електромобіля, а також

моменти інерції бігових барабанів та передавальні числа кінематичних елементів стенда:

$$\frac{G}{g} \cdot r_{k0}^2 = \sum J_m \cdot i_b^2 \cdot i_n^2 + \sum J_b \cdot i_n^2. \quad (2.14)$$

Визначити момент інерції однієї махової маси стенда можна за допомогою виразу:

$$J_m = \frac{\frac{G}{g} \cdot r_{k0}^2 - \sum J_b \cdot r_n^2}{r_b^2 \cdot r_n^2 \cdot N}, \quad (2.15)$$

де N – кількість маховиків у конструкції стенда.

Сила аеродинамічного опору $F_{вх}$, так само як і паралельна опорній поверхні складова ваги електромобіля F_a (2.1–2.10), дорівнюватимуть нулю при функціонуванні електромобіля на стенді. Відповідно, їх вплив на електромобіль у стендових умовах необхідно імітувати, створюючи штучне навантаження F_i на ведучі колеса електромобіля. Подані величини при функціонуванні електромобіля у дорожніх умовах не є постійними. Вони змінюються в залежності від швидкості руху та профілю дороги. Внаслідок чого їх вплив на електромобіль у стендових умовах необхідно імітувати. Зробити це можна за рахунок підведення до бігових барабанів гальмівного моменту M_m . У цьому випадку штучне навантаження F_i , що імітується, підведене до ведучих коліс електромобіля від дії гальмівного моменту M_m , розраховується за формулою:

$$F_i = \frac{M_m \cdot i_m \cdot \eta_m}{r_b} = G \cos \alpha \cdot f + G \sin \alpha + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.16)$$

Після виконання перетворень з урахуванням вищеописаних особливостей функціонування електромобіля у стендових умовах рівняння (2.2) балансу сил на

ведучих колесах при імітації режиму його розгону в гору на стенді з біговими барабанами має такий вигляд [24, 27]:

$$\frac{M_e \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = \frac{M_m \cdot i_m \cdot \eta_m}{r_{\delta}} + \frac{1}{r_{k0}} \sum \frac{J_m}{r_{\delta}} \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt}}{r_{k0}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}}. \quad (2.17)$$

Перетворення виразу (2.4), що описує процес руху з постійною швидкістю, для опису імітації руху електромобіля на стенді по горизонтальній дорозі та незмінній швидкості з урахуванням виразів (2.11) - (2.16) матиме вигляд:

$$\frac{M_e \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = \frac{M_m \cdot i_m \cdot \eta_m}{r_{\delta}}. \quad (2.18)$$

У цьому випадку права частина рівняння (2.18) – що представляє силу F_i , що імітує штучне навантаження на бігові барабани, яке створює гальмо стенда, визначається відповідно до виразу:

$$F_i = \frac{M_m \cdot i_m \cdot \eta_m}{r_{\delta}} = G \cdot f + \frac{C_x \cdot \rho \cdot S_w \cdot V^2}{2}. \quad (2.19)$$

Рівняння (2.6) балансу сил на ведучих колесах електромобіля при імітації режиму руху з постійною швидкістю в гору на стенді також може бути подане у вигляді формули (2.18). При цьому вираз (2.16), описує імітацію навантаження F_i на електричну силову установку, визначатиме праву частину рівняння (2.18). Рівняння (2.8) балансу сил на ведучих колесах електромобіля при імітації режиму гальмування електродвигуном на горизонтальній поверхні дороги на стенді, наведені до ведучих коліс сили, витрачаються на зниження кінетичної енергії поступального руху електромобіля та обертального руху його мас стендом, має такий вигляд:

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{\sum J_{\kappa} \frac{d\omega_{\kappa}}{dt}}{r_{k0}} + \frac{J_e \frac{d\omega_e}{dt} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} = \frac{M_{m0} \cdot i_{mp} \cdot \eta_{mp}}{r_{k0}} + \frac{M_m \cdot i_m \cdot \eta_m}{r_0}. \quad (2.20)$$

Представлений рівняннями (2.9) та (2.10) режим вільного вибігу електромобіля на горизонтальній поверхні позбавлений сенсу з енергетичної точки зору. У цьому випадку немає заряду тягової батареї. При цьому енергія руху електромобіля витрачається виключно на подолання сил опору руху автомобіля. З цього можна дійти невтішного висновку у тому, що цей режим функціонування електромобіля перестав бути інформативним з погляду контролю технічного стану агрегатів силового приводу. Цей режим доцільно застосовувати виключно для контролю технічного стану трансмісії та ходової частини електромобіля.

2.3 Математична модель системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»

Під час роботи електромобіля на стенді з біговими барабанами під дією сили тяги або гальмування на колесах відбуваються переміщення та нахил кузова. Ці зміщення впливають на механіку взаємодії шин з опорними поверхнями бігових барабанів діагностичного стенду [11–15, 17].

Під час опису динаміки переміщень кузова електромобіля в імітаційній математичній моделі були прийняті певні припущення. Вони дозволяють спростити реалізацію опису досліджуваного процесу. Функціонування електромобіля на стенді моделюється як рух по прямій дорозі без поворотів і з рівномірним покриттям.

У моделі не враховується вплив бічних сил на електромобіль, що дозволяє виключити необхідність розгляду відхилення від прямолінійного руху. Відповідно, коефіцієнти зчеплення всіх чотирьох коліс приймаються однаковими, а пройдений шлях лівих і правих коліс вважається рівним. Завдяки цьому немає потреби

описувати переміщення кузова в усіх площинах, і доцільно виконувати розрахунок лише у площині XOZ.

Для складання диференціальних рівнянь переміщення кузова електромобіля в зазначеній площині була розроблена двовимірний розрахункова схема електромобіля на стенді (рис. 2.2).

Диференціальне рівняння для визначення прискорення поздовжнього переміщення підресореної маси електромобіля вздовж осі OX має наступний вигляд:

$$M_a \frac{d^2x}{dt^2} = \sum R'_{Xi} + \sum R'_{Zi} + \sum F'_{Oi}; \quad (2.21)$$

де M_a – підресорена маса електромобіля;

$\sum R'_{Xi}$ – сума проєкцій на вісь OX реалізованих дотичних реакцій i -го колеса електромобіля у плямах контакту шин з біговими барабанами діагностичного стенду;

$\sum R'_{Zi}$ – сума проєкцій на вісь OX нормальних реакцій i -го колеса в плямах контакту шин з біговими барабанами діагностичного стенду;

$\sum F'_{Oi}$ – сума проєкцій на вісь OX зусиль в i -му обмежувачі, що виникають при переміщенні кузова електромобіля.

Диференціальне рівняння для розрахунку прискорення поздовжнього переміщення підресореної маси електромобіля вздовж осі OZ має такий вигляд:

$$M_a \frac{d^2z}{dt^2} = \sum R''_{Xi} + \sum R''_{Zi} + \sum F''_{Oi} - M_a g; \quad (2.22)$$

де $\sum R''_{Xi}$ – сума проєкцій на вісь OZ реалізованих дотичних реакцій i -го колеса електромобіля у плямах контакту шин з біговими барабанами діагностичного стенду;

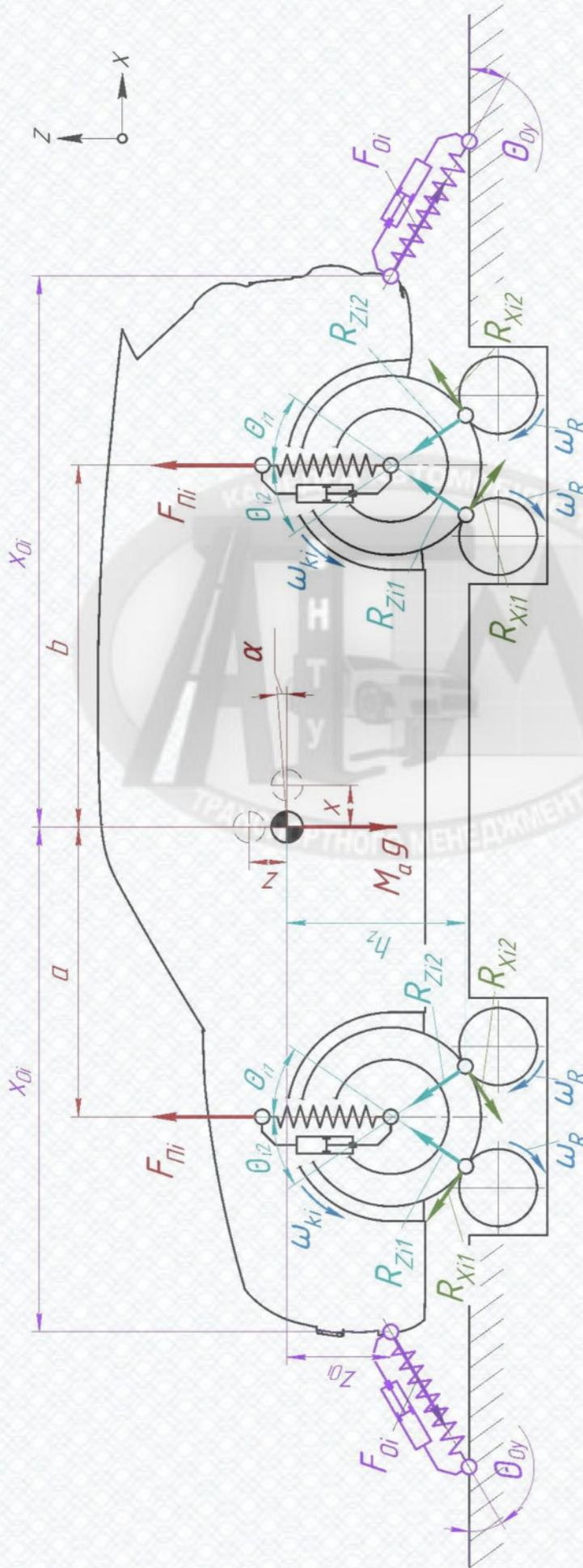


Рисунок 2.2 – Двовимірний розрахунковий набір параметрів процесу функціонування системи

$\sum R_{Zi}''''$ – сума проєкцій на вісь OZ нормальних реакцій i -го колеса в плямах контакту шин з біговими барабанами діагностичного стенду;

$\sum F_{Oi}''''$ – сума проєкцій на вісь OZ зусиль в i -му обмежувачі, що виникають при переміщенні кузова електромобіля.

Кутове переміщення кузова електромобіля у площині XOZ щодо осі OY визначається за диференційним виразом виду:

$$J_y \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum R'_{Xi} z_i + \sum R'_{Zi} z_i + \sum R''_{Xi} x_i + \sum R''_{Zi} x_i + \sum F'_{Oi} z_{Oi} + \sum F''_{Oi} x_{Oi} + \sum F_{III} a + \sum F_{III} b; \quad (2.23)$$

де J_y – момент інерції електромобіля відносно осі OY;

x_i та z_i – плечі дії проєкцій на осі OZ та OX реакцій у плямі контакту i -го колеса електромобіля відповідно;

x_{Oi} та z_{Oi} – плечі дії проєкцій на осі OZ та OX зусиль у i -х обмежувачах переміщень кузова електромобіля відповідно;

F_{III} – зусилля в елементах підвіски i -го колеса електромобіля;

a та b – відстань від центру мас електромобіля до передньої та задньої осей відповідно.

Нормальні реакції R_{Zi1} та R_{Zi2} у плямах контакту i -го колеса з опорними поверхнями бігових барабанів розраховуються за виразами:

$$R_{Zi1} = \begin{cases} C_{III} \cdot \Delta h_{Ci1} - d_{III} \cdot V_{HCi1}, & \text{якщо } \Delta h_{Ci1} > 0; \\ 0, & \text{якщо } \Delta h_{Ci1} \leq 0; \end{cases} \quad (2.24)$$

$$R_{Zi2} = \begin{cases} C_{III} \cdot \Delta h_{Ci2} - d_{III} \cdot V_{HCi2}, & \text{якщо } \Delta h_{Ci2} > 0; \\ 0, & \text{якщо } \Delta h_{Ci2} \leq 0; \end{cases} \quad (2.25)$$

де C_{III} – радіальна жорсткість еластичної шини;

d_{III} - коефіцієнт демпфування еластичної шини;

Δh_{Ci1} , Δh_{Ci2} – деформації еластичної шини i -го колеса у радіальному напрямку;

V_{HCi1}, V_{HCi2} – швидкість деформації еластичної шини i -го колеса.

Розрахунок деформації еластичних шин у місцях контакту з біговими барабанами виконується на основі геометричних параметрів розташування коліс автомобіля відносно стенда наступним чином:

$$\Delta h_{Ci1} = r_C + r_{\bar{o}} - L_{Ci1}; \quad (2.26)$$

$$\Delta h_{Ci2} = r_C + r_{\bar{o}} - L_{Ci2}; \quad (2.27)$$

де L_{Ci1}, L_{Ci2} – відстані між центром осі обертання i -го колеса електромобіля та центрами осей обертання бігових барабанів діагностичного стенду;

r_C – вільний радіус колеса електромобіля;

$r_{\bar{o}}$ – радіус бігового барабана діагностичного стенду.

Відстань від центру осі обертання колеса електромобіля до центрів осей обертання бігових барабанів діагностичного стенда визначається за такими рівняннями:

$$L_{Ci1} = \sqrt{(h_0 - Z_{ki})^2 + (0,5l_w - X_{ki})^2}; \quad (2.28)$$

$$L_{Ci2} = \sqrt{(h_0 - Z_{ki})^2 + (0,5l_w + X_{ki})^2}; \quad (2.29)$$

де h_0 – початкова відстань, при якій еластична шина торкається бігового барабана діагностичного стенду, але деформація шини при цьому відсутня;

Z_{ki}, X_{ki} – координати центру осі обертання i -го колеса електромобіля;

l_w – відстань між осями бігових барабанів діагностичного стенду;

$$h_0 = \sqrt{(r_C + r_{\bar{o}})^2 - (0,5l_w)^2}. \quad (2.30)$$

При деформації пружних елементів підвіски електромобіля виникають зусилля $F_{\Pi i}$, величину яких визначають за відповідною формулою

$$F_{\text{III}} = \Delta h_{\text{III}} C_{\text{II}} - d_{\text{II}} \frac{d\Delta h_{\text{III}}}{dt}, \quad (2.31)$$

де d_{II} - коефіцієнт демпфування пружних елементів підвіски електромобіля;

Δh_{III} – деформація пружних елементів підвіски i -го колеса електромобіля;

C_{II} – жорсткість пружних елементів підвіски.

Кузов електромобіля закріплений на стенді за допомогою обмежувачів. При імітації роботи електромобіля на стенді в обмежувачах виникають зусилля F_O , величину яких визначають за відповідним рівнянням.

$$F_O = \Delta L_O C_O - d_O \frac{d\Delta L_O}{dt}, \quad (2.32)$$

де d_O - коефіцієнт демпфування обмежувача переміщень кузова;

ΔL_O – деформація пружних елементів обмежувача переміщень кузова електромобіля;

C_O – жорсткість пружних елементів обмежувача переміщень кузова електромобіля.

Колеса з еластичними шинами відіграють ключову роль у процесі функціонування електромобіля, оскільки саме через них реалізується контакт із біговими барабанами діагностичного стенду. Вони забезпечують передачу як дотичних, так і нормальних реакцій, що виникають під час роботи силового привода. Ці реакції визначають умови зчеплення та впливають на точність імітації дорожніх режимів. При коченні коліс по бігових барабанах спостерігається явище прослизання, яке суттєво впливає на режими роботи шин та ефективність передачі тягового або гальмівного зусилля. Врахування цього фактора є необхідним для коректного моделювання процесів, що відбуваються у зоні контакту. Розроблені розрахункові схеми дозволяють математично описати взаємодію шин зі стендом як у тяговому режимі (рис. 2.3, А), так і в режимі гальмування (рис. 2.3, Б), що

M_f – момент опору коченню колеса.

Відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 2.3, Б) аналогічно було сформульовано диференціальне рівняння, що описує динаміку обертання колеса в режимі гальмування або рекуперації енергії.

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{-M_T + M_{jk} + R_{X1}r_{k01} + R_{X2}r_{k02} + M_{jc} - M_f}{J_k}, \quad (2.34)$$

де M_T – гальмівний момент на колесі електромобіля, що виникає у процесі гальмування чи рекуперації енергії.

Параметри зчеплення еластичної шини з циліндричною опорною поверхнею бігового барабана діагностичного стенду визначають можливість обчислення величини R_x згідно з виразом:

$$R_{Xi} = \varphi_{\max} \cdot R_{Zi} \cdot f(S), \quad (2.35)$$

де $f(S)$ - функція прослизання S ;

R_{Zi} - нормальна реакція i -го колеса електромобіля;

φ_{\max} – максимальне значення коефіцієнта зчеплення шини із опорною поверхнею бігового барабана діагностичного стенду.

Функція прослизання шини формується на основі нормованих характеристик, визначених за їх максимальними значеннями, і може бути описана наступним аналітичним рівнянням [17]:

$$f(S) = \sin(A \cdot \arctg(BS)), \quad (2.36)$$

де A та B – коефіцієнти, які визначають параметри прослизання шини.

Величина прослизання колеса визначається залежно від режиму його роботи за відповідними аналітичними виразами. Для режиму розгону електромобіля:

$$S = 1 - \frac{\omega_k r_k}{\omega_6 r_6}; \quad (2.37)$$

у режимі гальмування:

$$S = 1 - \frac{\omega_6 r_6}{\omega_k r_{k0}}; \quad (2.38)$$

де ω_6 і ω_k – кутові швидкості бігового барабана стенда та колеса відповідно.

У процесі експлуатації колеса його ефективний радіус зазнає змін, що обумовлено перерозподілом навантаження між передньою та задньою осями електромобіля під час розгону або гальмування. Обчислення зміни радіуса здійснюється за допомогою наступного рівняння:

$$r_{k0i} = r_C - R_{Zi} c_2 - \sqrt{R_{Zi} c_1}; \quad (2.39)$$

де c_1, c_2 – константи.

Максимальний момент по зчепленню M_ϕ , що реалізується в контакті шини з опорною поверхнею, може відрізнятись від підведеного до колеса крутного моменту і визначається за наступним виразом:

$$M_\phi = R_X r_{k0}. \quad (2.40)$$

Момент M_f опору коченню колеса визначається за формулою:

$$M_f = R_Z r_{k0} f, \quad (2.40)$$

де f - коефіцієнт опору коченню.

Для визначення крутильних коливань у трансмісії електромобіля під час його роботи на діагностичному стенді розроблено кінематичну схему (рис. 2.4). У схемі враховано моменти інерції: електродвигуна J'_1 , редуктора та диференціала J'_2 ,

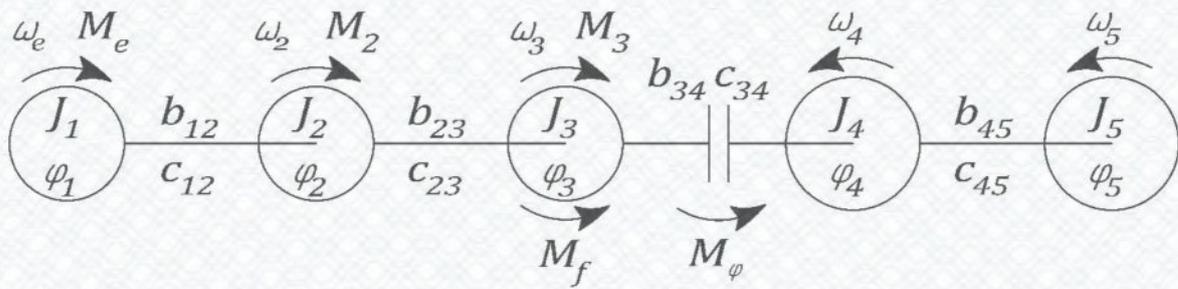


Рисунок 2.5– Приведена схема визначення крутильних коливань у системі

$$J_1 = J'_1; \quad J_2 = \frac{J'_2}{u_T}; \quad J_3 = J'_3; \quad J_4 = J'_4; \quad J_5 = \frac{J'_5}{u_m}. \quad (2.41)$$

У математичній моделі передбачено, що моменти інерції півосей і коліс, бігових барабанів та махових мас, розташованих симетрично відносно поздовжньої осі, прийняті однаковими.

Розрахунок крутильних коливань виконано на основі системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку обертання елементів трансмісії електромобіля та діагностичного стенда. Вираз, який визначає динаміку обертання ротора електродвигуна, має наступний вигляд:

$$\frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = \frac{M_e}{J_1 + J_2 + 2J_3}; \quad (2.42)$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} dt; \quad (2.43)$$

$$\varphi_1 = \varphi_1 + \frac{d\varphi_1}{dt} dt; \quad (2.44)$$

де φ_1 - кут повороту ротора електродвигуна.

Динаміка обертання корпусу диференціала описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = \frac{c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - b_{12} \frac{d\varphi_2}{dt}}{J_2}; \quad (2.45)$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{d\varphi_2}{dt} + \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} dt; \quad (2.46)$$

$$\varphi_2 = \varphi_2 + \frac{d\varphi_2}{dt} dt; \quad (2.47)$$

де φ_2 – кут повороту диференціала;

φ_3 – кут повороту ведучого колеса електромобіля;

b_{12} – коефіцієнт демпфування вала з'єднання електродвигуна та редуктора;

c_{12} – жорсткість валу між електродвигуном та редуктором;

c_{23} – жорсткість привідного вала (півосі).

Динаміка обертання ведучих коліс електромобіля описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2\varphi_3}{dt^2} = \frac{c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - c_{34}(\varphi_3 - \varphi_4) - b_{23} \frac{d\varphi_3}{dt} - F_f r_{k0}}{J_3}; \quad (2.48)$$

$$\frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{d\varphi_3}{dt} + \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} dt; \quad (2.49)$$

$$\varphi_3 = \varphi_3 + \frac{d\varphi_3}{dt} dt; \quad (2.50)$$

де φ_4 – кут повороту бігових барабанів;

b_{23} – коефіцієнт демпфування привідного вала (півосі);

c_{34} – жорсткість колеса.

Динаміка обертання бігових барабанів діагностичного стенда описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\frac{d^2\varphi_4}{dt^2} = \frac{R_{x1}r_6 - F_f r_{k0}}{J_4}; \quad (2.51)$$

$$\frac{d\varphi_4}{dt} = \frac{d\varphi_4}{dt} + \frac{d^2\varphi_4}{dt^2} dt; \quad (2.52)$$

$$\varphi_4 = \varphi_4 + \frac{d\varphi_4}{dt} dt; \quad (2.53)$$

де φ_5 – кут повороту махових мас.

Динаміка обертання махових мас стенда з біговими барабанами описана такими диференціальними рівняннями :

$$\frac{d^2\varphi_5}{dt^2} = \frac{c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) - b_{45} \frac{d\varphi_5}{dt}}{J_5}; \quad (2.54)$$

$$\frac{d\varphi_5}{dt} = \frac{d\varphi_5}{dt} + \frac{d^2\varphi_5}{dt^2} dt; \quad (2.55)$$

$$\varphi_5 = \varphi_5 + \frac{d\varphi_5}{dt} dt; \quad (2.56)$$

де c_{45} - жорсткість ланцюгової передачі між біговими барабанами та маховими масами стенда;

b_{45} – коефіцієнт демпфування ланцюгової передачі між біговими барабанами та маховими масами стенда.

2.4 Алгоритм розрахунку тягово-швидкісних властивостей електромобіля при діагностуванні на стенді з біговими барабанами

Для моделювання впливу зміни параметрів силового приводу електромобіля на тягово-швидкісні параметри його функціонування на стенді розроблено керуючий алгоритм (рис. 2.6).

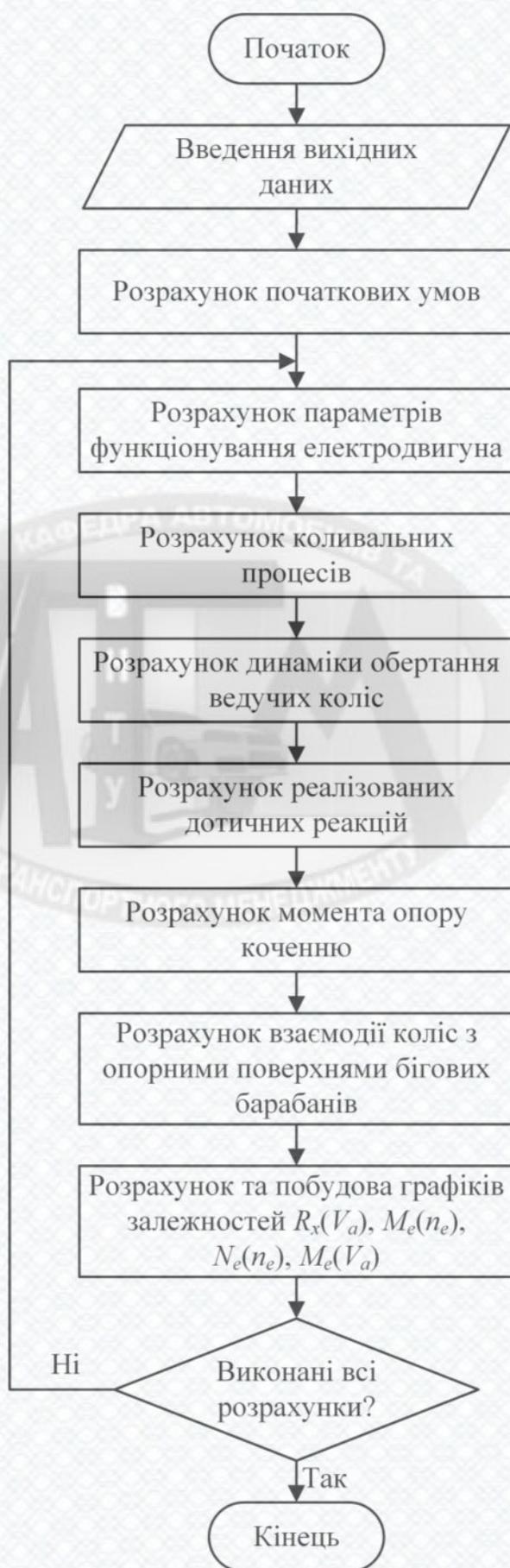


Рисунок 2.6 – Алгоритм розрахунку параметрів функціонування системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»

Розроблений алгоритм складається з таких операцій.

1. На першому етапі вводяться вихідні дані:

- константи;
- характеристики електромобіля (колісна база, колія, маса, координати центру мас);
- характеристики коліс (ширина та висота профілю шини, посадковий діаметр, момент інерції колеса, жорсткість і коефіцієнт демпфування шини);
- характеристики стенда (радіуси бігових барабанів, відстань між осями обертання, передавальні числа стенда, моменти інерції махових мас, жорсткості та коефіцієнти демпфування елементів трансмісії стенда);
- характеристики взаємодії шини з біговими барабанами діагностичного стенда (максимальний коефіцієнт зчеплення шини з опорною поверхнею, коефіцієнт, що характеризує зміну зчіпних властивостей шини у блоці);
- характеристики електродвигуна (максимальний крутний момент та максимальна потужність електродвигуна, максимальна частота обертання ротора електродвигуна, коефіцієнт керування електричним силовим приводом);
- характеристики трансмісії електромобіля (передавальне число редуктора, моменти інерції, жорсткості та коефіцієнти демпфування елементів трансмісії).

2. Розв'язання системи рівнянь для визначення початкових параметрів циклу (перерозподіл навантаження між осями електромобіля, нормальні сили у пляях контакту шин з поверхнею бігових барабанів, величини деформацій шин, коефіцієнти моделі пружної шини, приведені моменти інерції елементів трансмісії електромобіля та стенда з урахуванням передавальних чисел).

3. Виконання розрахунків для визначення параметрів роботи електродвигуна відповідно до методики, наведеної в [27]. На цьому етапі обчислюються такі показники: крутний момент електродвигуна; потужність електродвигуна; кутове прискорення та частота обертання ротора.

4. Розв'язання системи рівнянь, що описують процеси крутильних коливань у трансмісії електромобіля та стенда (визначення кутових прискорень, частот

обертання та кутів закручування елементів трансмісії електромобіля і стенда з біговими барабанами).

5. Розв'язання системи рівнянь, що описують роботу колеса з еластичною шиною (визначення величини прослизання шин відносно опорних поверхонь бігових барабанів діагностичного стенда, параметрів моделі шини, реакції у плямах контакту шин з поверхнею барабанів, моменту по зчепленню, що реалізується, та момент опору коченню).

6. Процедура формування результатів розрахунку математичної моделі у вигляді графічних залежностей основних параметрів роботи електромобіля на стенді з біговими барабанами та числових значень цих параметрів.

Даний алгоритм дозволяє проводити дослідження процесу функціонування електромобіля на діагностичному роликівому стенді та розраховувати його основні тягово-швидкісні властивості.

2.5 Висновки

1. Обґрунтована та сформована математична модель для моделювання процесу функціонування електромобіля при контролі технічного стану агрегатів електричного силового приводу на стендах з біговими барабанами. Модель дозволяє отримати залежності діагностичних параметрів та показників тягово-швидкісних властивостей електромобілів від параметрів технічного стану їх агрегатів силового приводу електромобіля.

2. Створено структурну схему процесу роботи електромобіля на стенді з біговими барабанами, яка дає можливість ідентифікувати та аналізувати причинно-наслідкові взаємозв'язки між елементами досліджуваної системи.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА СТЕНДІ З БІГОВИМИ БАРАБАНАМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

3.1 Методи визначення діагностичних параметрів

Оптимальний контроль технічного стану динамічних систем доцільно здійснювати шляхом аналізу фазових динамічних характеристик – залежностей вихідних параметрів об'єкта діагностування від вхідних. Для електромобіля як вихідні параметри розглядаються його тягово-швидкісні показники, зокрема крутний момент M_e та потужність N_e електродвигуна, крутний момент на ведучих колесах M_k , струм високовольтної батареї I_{BAT} (віддаваний і споживаний), а також струм I_e і напруга U_e , що споживаються або генеруються електродвигуном. Як вхідні параметри можуть використовуватися частота обертання ротора електродвигуна ω_e або швидкість руху електромобіля V_a [19, 21, 23, 26, 27, 30, 31].

Характер фазових динамічних характеристик агрегатів силового приводу електромобіля визначається параметрами їх технічного стану. Зміна цих параметрів призводить до варіації форми динамічних фазових характеристик. Їхнє суміщення на одному графіку формує області локальних діагностичних рішень, наведені на рис. 3.1.

Використання сформованих динамічних фазових характеристик дозволяє оцінювати технічний стан агрегатів силового приводу електромобіля та ідентифікувати конкретні несправності. Це здійснюється на основі інформації, що міститься в області D_{jq} фазових динамічних характеристик, яка відображає величину певного параметра технічного стану. Індекс j позначає номер області локальних діагностичних рішень, що формується при зміні значення параметра технічного стану агрегатів силового приводу електромобіля [19, 21, 26, 30, 31].

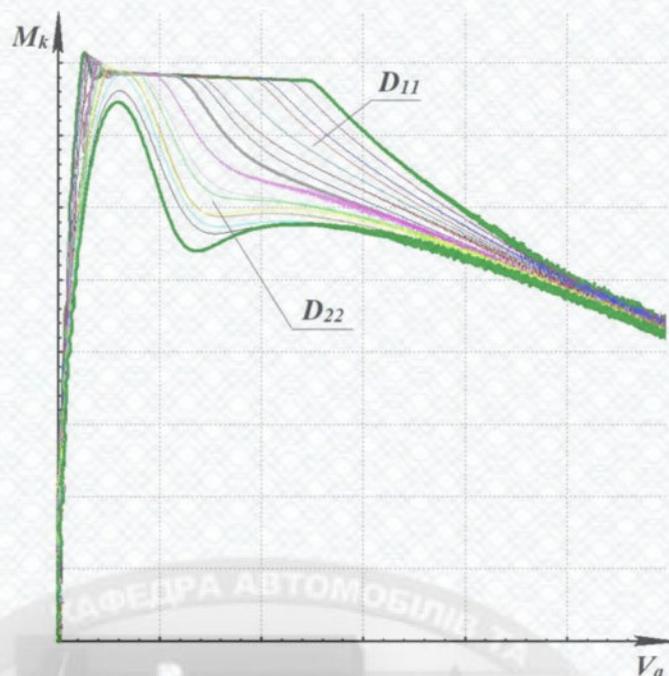


Рисунок 3.1 – Приклад області локальних діагнозів

Індекс q приймає значення 1 або 2. Значення 1 використовується для позначення областей локальних діагностичних станів агрегатів силового приводу електромобіля, у яких параметри технічного стану знаходяться в допустимих межах. Значення 2 відповідає областям, де діагностичні показники виходять за встановлені нормативи. Електромобіль, силовий привід якого характеризується такою динамічною фазовою залежністю, класифікується як несправний.

Діагностування вузлів електромобіля здійснюється на основі аналізу їхніх динамічних фазових характеристик. Процедура передбачає поетапну перевірку сегментів отриманих фазових траєкторій з визначенням їх належності до області справних або несправних режимів роботи силового приводу. Електромобіль визнається працездатним за умови, що всі сегменти фазової характеристики знаходяться в межах діагностичних областей, які відповідають допустимим станам. Якщо хоча б одна точка траєкторії виходить за межі області справних станів, транспортний засіб класифікується як несправний.

Розпізнавання технічного стану вузлів електромобіля на основі динамічних фазових характеристик доцільно виконувати із застосуванням методу максимальних перерізів.

Метод найбільших перерізів при діагностиці агрегатів електромобіля ґрунтується на редукції двовимірної задачі з багатозначними реалізаціями до одновимірної постановки, у якій забезпечується функціональна однозначність між діагностичним параметром та параметром технічного стану.

У межах кожної області локальних діагнозів фазової характеристики необхідно виділити діагностичні сегменти, що забезпечують максимальну чутливість до варіацій параметрів технічного стану силових агрегатів електромобіля. Для цього в заданій області виконується побудова січної, орієнтованої паралельно одній з координатних осей, у точці найбільшого перерізу. Відрізок цієї січної, обмежений крайніми фазовими траєкторіями, визначається як діагностична ділянка. Перетин фазової траєкторії з даною січною дозволяє встановити значення діагностичних параметрів технічного стану та їх нормативні межі [19, 21, 26, 30, 31].

На діагностичній ділянці, що відповідає найбільшому перерізу області локальних діагнозів, встановлюється допустиме значення діагностичного параметра. У цьому випадку отримана фазова характеристика дозволяє визначити належність параметра технічного стану до допустимого діапазону або його вихід за межі нормативних значень, що свідчить про несправність. Діагностичним параметром виступає абсциса точки перетину фазової траєкторії з діагностичною ділянкою, проведеною через максимальний переріз відповідної області локальних діагнозів.

Нормативні значення діагностичного параметра на діагностичній ділянці визначаються у вигляді початкового нормативу K_n , допустимого нормативу K_d та граничного нормативу K_n , що наведено на рис. 3.2.

Ордината побудованої січної відповідає певному значенню тягової сили M_{kd} , тоді як абсциси точок V_n , V_d , V_n визначають початкове, допустиме та граничне значення діагностичного параметра на відповідній ділянці локальних діагнозів.

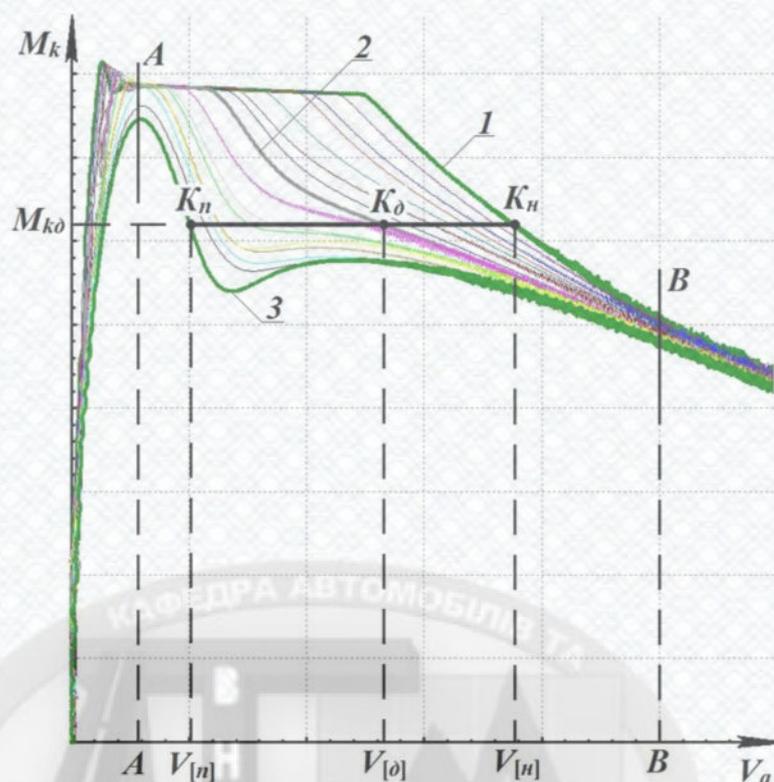


Рисунок 3.2 – Виявлення областей локальних діагнозів

Початковий норматив визначається за фазовою характеристикою 1, що відповідає стану агрегатів, який повністю задовольняє вимоги та нормативи виробника. Точка перетину січної з цією характеристикою формує позицію K_n , абсциса якої V_n приймається як початкове значення діагностичного параметра.

Параметр технічного стану автомобіля, що досяг допустимого рівня відповідно до вимог технічної документації, описується відрізком фазової характеристики 2. Точка перетину цієї ділянки з січною визначає позицію K_0 , абсциса якої V_0 приймається як допустиме значення діагностичного параметра для даного стану на відповідній ділянці локальних діагнозів.

Параметр технічного стану електромобіля, при якому агрегати досягають граничного значення, описується фазовою характеристикою 3. Точка перетину цієї характеристики із січною визначає позицію K_n , абсциса якої V_n приймається як граничне значення діагностичного параметра.

Для встановлення належності будь-якого відрізка $|AB|$ фазової характеристики агрегатів електромобіля до певної області локальних діагнозів застосовуються відповідні критерії та параметри аналізу.

$$V_a(k_x) \leq V_a(k_d), |AB| \in D_{j1}; \quad (3.1)$$

$$V_a(k_x) > V_a(k_d), |AB| \in D_{j2}; \quad (3.2)$$

де $V_a(k_d)$ – значення припустимого нормативу діагностичного параметра ділянки локальних діагнозів $|AB|$;

$V_a(k_x)$ – значення діагностичного параметра ділянки $|AB|$ отриманої для динамічної фазової характеристики.

Якщо в процесі аналізу динамічної фазової характеристики в певній області локальних діагнозів виконується умова $V_a(k_x) \leq V_a(k_d)$, то j -й параметр технічного стану відповідає нормальному стану. У протилежному випадку вважається, що діагностичний параметр виходить за межі нормального стану. Формування висновку щодо технічного стану агрегатів електромобіля здійснюється шляхом послідовного аналізу його динамічних фазових характеристик у кожній області локального діагнозу D_{jq} . Якщо всі ділянки фазової характеристики належать областям D_{j1} , електромобіль класифікується як справний. Якщо хоча б одна ділянка відповідає області D_{j2} , технічний стан визначається як несправний. При цьому індекс j ідентифікує конкретний тип несправності об'єкта діагностування.

3.2 Результати моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами

Проведено моделювання функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами. В процесі моделювання застосовано параметри електромобіля KIA Soul EV. Трансмісія представлена двоступінчастим циліндричним редуктором із

постійним передавальним числом, яке не змінюється протягом експлуатації.

Для отримання аналітичних залежностей у процесі моделювання роботи електромобіля на стенді з біговими барабанами в розрахунках використано вихідні дані, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані моделювання

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Значення
1	2	3	4
Максимальна потужність електродвигуна	Ne_{max}	кВт	80
Максимальний крутний момент електродвигуна	Me_{max}	Нм	280
Максимальна частота обертання електродвигуна	ne_{max}	об/хв	10 200
Максимальний струм споживання електродвигуна	Ied_{max}	А	400
Опір обмотки електродвигуна	rs_{ed}	Ом	0,001
Потокозчеплення електродвигуна	ψ_{ed}	Вб	0,35
Кількість пар полюсів електродвигуна	zed	од.	4
Опір високовольтного ланцюга	re_{ed}	Ом	0,0015
Індуктивність фази електродвигуна	Led	Гн	0,0007
Одинична форма ЕРС електродвигуна	Eed	–	1
Початкова напруга тягової високовольтної батареї	$U0_{tvb}$	В	360
Ємність тягової високовольтної батареї	Q_{tvb}	Ач	75
Експоненціальна напруга тягової високовольтної батареї	$Atvb$	В	0,26422
Експоненціальна ємність тягової високовольтної батареї	B_{tvb}	А-год	26,5487
Внутрішній опір тягової високовольтної батареї	R_{tvb}	Ом	0,0125
Стала поляризації тягової високовольтної батареї	K_{tvb}	В/А-год	0,0076
Жорсткість шини	$c_{ш}$	Н/м	220 000
Коефіцієнт демпфування шини	$d_{ш}$	Н·м·с/рад	815
Жорсткість пружних елементів підвіски	$c_{п}$	Н/м	650 000
Коефіцієнт демпфування підвіски	$d_{п}$	Н·м·с/рад	1130
Радіус бігового барабана	r_{bb}	м	0,105

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Довжина бігового барабана	l_{bb}	м	0,8
Відстань між осями бігових барабанів	a_w	м	0,4
Максимальний коефіцієнт зчеплення	φ_{max}	–	0,615
Коефіцієнт жорсткості поздовжнього проковзування	η	–	21
Коефіцієнт зниження фрикціоних властивостей шини в блоці	fb	–	0,489
Вільний радіус колеса	r_s	м	0,305
Жорсткість обмежувальних стяжок	$c_{об}$	Н/м	5620000
Коефіцієнт демпфування обмежувальних стяжок	$d_{об}$	Н·м·с/рад	4800
Дисипація трансмісій електромобіля	$d_{тр}$	Н·м·с/рад	0,01
Колія електромобіля	K_A	м	1,58
Колісна база електромобіля	B_A	м	2,57
Коефіцієнт опору коченню	f_0	–	0,018
Посадковий діаметр шини	$d_{ш}$	Дюйм	16
Ширина профіля шини	$b_{ш}$	м	205
Висота профіля шини	$h_{ш}$	%	60
Жорсткість ланцюгових передач стэнда	$c_{ц}$	Н/м	$1 \cdot 10^9$
Коефіцієнт демпфування ланцюгових передач стэнда	$d_{ц}$	–	3,25
Передаточне число трансмісій електромобіля	$U_{тр}$	–	8,209

Моделювання здійснювалось у програмному комплексі MSC Adams. У ході моделювання виконувались серії багатоваріантних розрахунків із варіюванням параметрів агрегатів електромобіля під час його роботи на стендовому обладнанні. Аналіз проводився щодо впливу зміни потокозчеплення ψ_{ED} , фазного опору R_{iED} , опору R_{BAT} у ланцюзі підключення тягової батареї високої напруги, а також дисипативних втрат d_{mp} у трансмісії на основні експлуатаційні характеристики електромобіля.

Результати проведеного багатоваріантного моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді при зміні технічного стану електродвигуна силового приводу за рахунок зниження потокозчеплення електродвигуна представлені на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Залежність сили тяги R_x на ведучих колесах електромобіля від швидкості V_a , що імітується на стенді, в режимі розгону електромобіля при зміні потокозчеплення ψ_{ED}

Дискретне варіювання потокозчеплення ψ_{ED} виконувалося в інтервалі 0,3–0,05 Вб із кроком 0,05 Вб. У ході аналізу встановлено, що найбільш інформативним для оцінки технічного стану силового приводу під час розгону на стенді є функціональний зв'язок сили тяги R_x на ведучих колесах із швидкістю V_a , яка моделюється на бігових барабанах. Цю залежність рекомендовано використовувати як діагностичний параметр. Результати моделювання показали, що максимальна чутливість параметра спостерігається при швидкості $V_a=16$

км/год. Зменшення потокозчеплення ψ_{ED} з 0,3 до 0,05 Вб у процесі розгону призводить до зниження сили тяги на ведучих колесах на 58,8 %.

Результати моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді за зміни технічного стану його силового приводу за допомогою збільшення опору обмоток статора R_{iED} представлені рис. 3.4 та табл. 3.2.

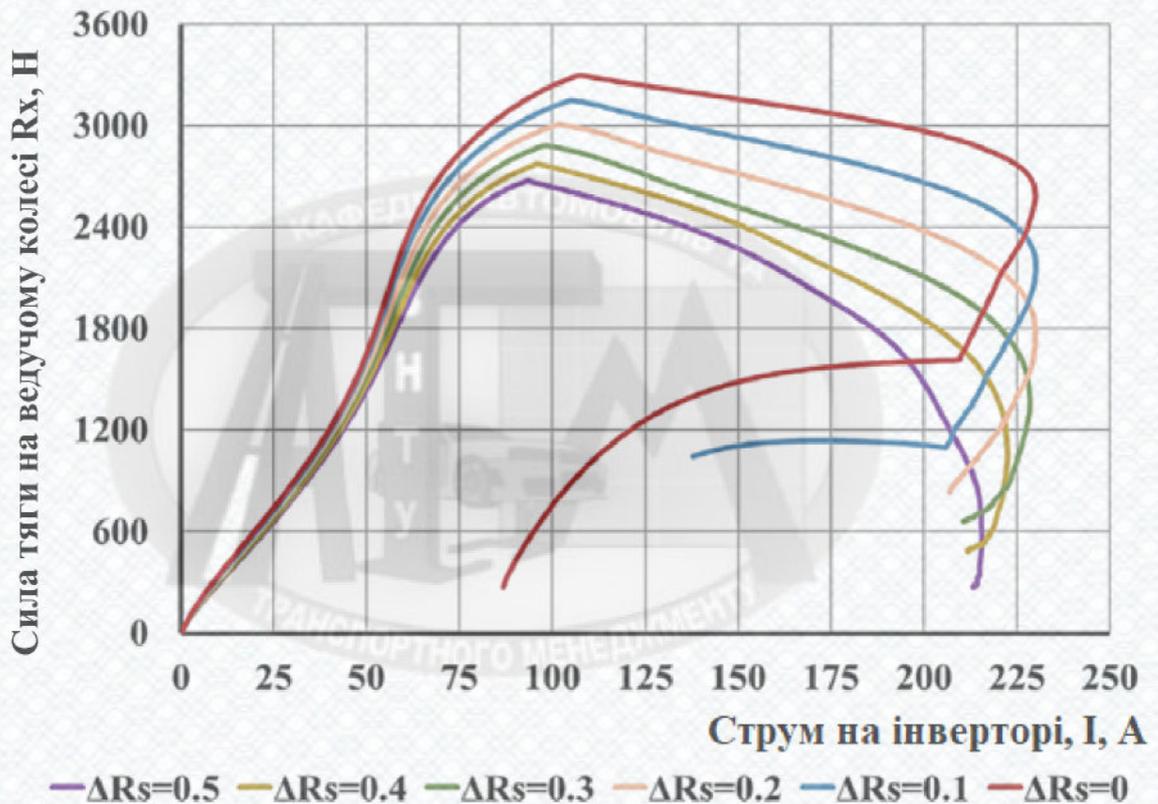


Рисунок 3.4 – Залежність сили тяги R_x на ведучих колесах електромобіля від споживаного струму I зі збільшенням величини опору R_s двох фаз електродвигуна

Під час моделювання розгону електромобіля на стенді проводилась параметрична варіація опору обмоток статора R_s шляхом введення додаткового опору ΔR_s . Значення ΔR_s змінювалось дискретно в межах 0–0,5 Ом із кроком 0,1 Ом. Аналіз функціональної залежності потужності електродвигуна N_e від струму I , споживаного інвертором, показав істотне зниження тягово-швидкісних характеристик при збільшенні R_s . Для діагностування технічного стану силового приводу запропоновано використовувати величину струму I , що відповідає досягненню сили тяги $R_x = 2670$ Н на ведучому колесі, оскільки в цій точці

забезпечується максимальна чутливість діагностичного параметра до зміни стану агрегатів. Результати моделювання свідчать, що приріст ΔR_s від 0 до 0,5 Ом зумовлює зниження ефективної потужності N_e на 58,3 % при силі тяги $R_x=2670$ Н.

Результати моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді за зміни технічного стану трансмісії автомобіля за рахунок збільшення дисипації d_{mp} представлені на рис. 3.5 та табл. 3.1.

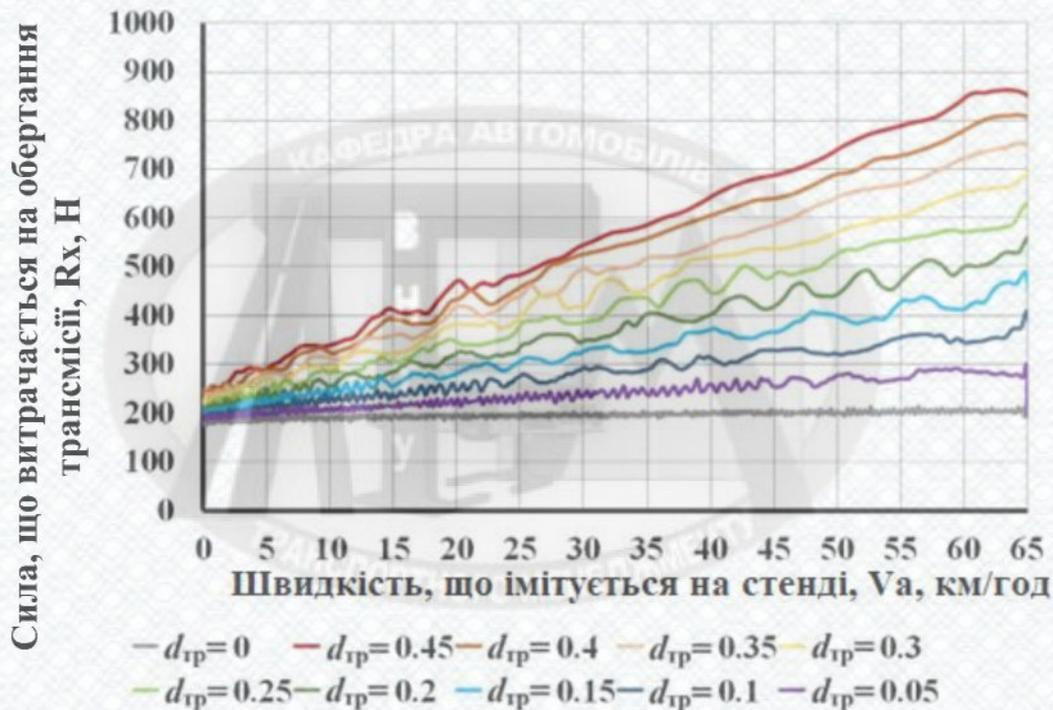


Рисунок 3.5 – Залежність сили R_x , що витрачається на обертання трансмісії, від швидкості V_a , що імітується на стенді, у режимі вільного вибігу зі швидкості 60 км/год при зміні дисипації d_{mp} у трансмісії електромобіля

Таблиця 3.2 - Результати моделювання функціонування електромобіля на стенді в режимі вільного вибігу при зміні технічного стану його трансмісії

№ розрахунку	d_{mp} , Н·м·с/рад	t_b , с
1	0	35,01
2	0,05	17,16
3	0,1	11,64
4	0,15	8,81
5	0,2	7,17

Продовження табл. 3.2

№ розрахунку	d_{mp} , Н·м·с/рад	t_6 , с
6	0,25	5,98
7	0,3	5,51
8	0,35	4,52
9	0,4	4,01
10	0,45	3,62

Дисипативні втрати d_{mp} у трансмісії електромобіля змінювалися дискретно в діапазоні 0–0,45 Н·м·с/рад із кроком 0,05. Аналіз показав, що для контролю технічного стану агрегатів у режимі вільного вибігу найбільш інформативними є два параметри: сила R_x , витрачена на подолання опору трансмісії, та час вільного вибігу t_6 , необхідний для повної зупинки електромобіля на стенді. Ці залежності доцільно використовувати як діагностичні ознаки.

Аналіз результатів моделювання показав, що збільшення дисипативних втрат d_{mp} у трансмісії від 0 до 0,45 Н·м·с/рад призводить до зростання сили R_x , необхідної для обертання трансмісії, з 199 до 853 Н, що відповідає збільшенню у 4,29 раза в режимі вільного вибігу зі швидкості 60 км/год. Одночасно час вільного вибігу t_6 скорочується з 35,01 до 3,62 с, тобто зменшується у 9,67 раза. Висока чутливість цих параметрів до зміни технічного стану трансмісії підтверджує їхню доцільність як діагностичних ознак.

Результати моделювання процесу функціонування електромобіля при зміні технічного стану високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї за рахунок збільшення опору R_{BAT} в ланцюзі представлені на рис. 3.6.

У процесі моделювання розгону електромобіля в тяговому режимі на стенді виконувалося дискретне збільшення опору R_{BAT} у ланцюзі підключення високовольтної батареї шляхом введення додаткового опору ΔR_{BAT} . Значення ΔR_{BAT} змінювалися в діапазоні 0–0,4 Ом із кроком 0,05 Ом. Аналіз залежності напруги батареї U_{BAT} від швидкості V_a , що імітується на стенді, показав істотне зниження рівня U_{BAT} у зоні малих швидкостей (3–8 км/год), що пояснюється прагненням силового приводу розвинути максимальний крутний момент M_e на роторі

електродвигуна. При подальшому збільшенні швидкості V_a напруга U_{BAT} зростає, оскільки крутний момент на роторі зменшується. Збільшення додаткового опору ΔR_{BAT} від 0 до 0,4 Ом у режимі розгону призводить до зниження напруги батареї на 44,5 %.

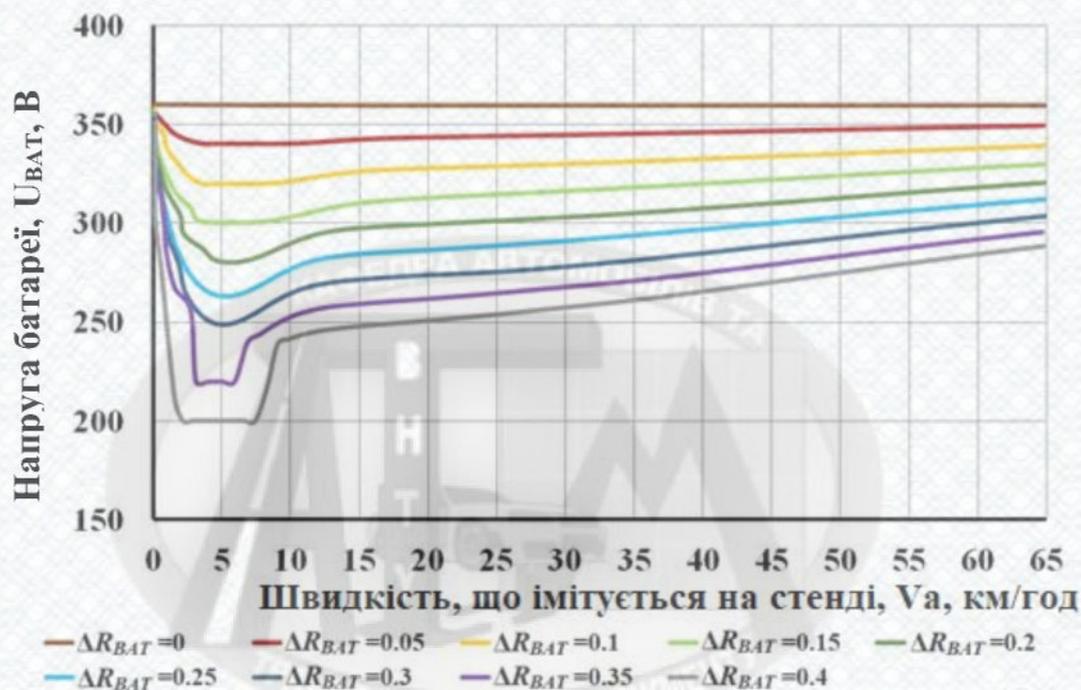


Рисунок 3.6 – Залежність напруги високовольтної батареї U_{BAT} від швидкості V_a , що імітується на стенді, у режимі розгону електромобіля при зміні опору R_{BAT} ланцюга підключення високовольтної батареї

Результати багатоваріантного моделювання роботи електромобіля на стенді з біговими барабанами при зміні параметрів технічного стану дозволили ідентифікувати діагностичні ознаки, що характеризуються високою чутливістю до відхилень у стані систем та агрегатів. Це підтверджує ефективність застосування стендового методу для контролю технічного стану силового приводу електромобіля.

3.3 Визначення діагностичних параметрів, що характеризують технічний стан силового приводу електромобіля

Фізичні величини, що мають інформацію про параметри технічного стану та пов'язані з ними, можуть бути ефективно використані для контролю технічного стану, за умови можливості їх фізичного виміру, називають діагностичними параметрами.

Діагностичні параметри повинні мати ряд властивостей:

1) Чутливість – характеризується відносною зміною діагностичного параметра в межах повного діапазону напруцювання, від номінального значення до моменту переходу в несправний стан.

2) Однозначність – визначається відсутністю екстремальних точок на функції зміни діагностичного параметра, що забезпечує монотонність залежності.

3) Стабільність – оцінюється величиною варіації діагностичного параметра при багаторазових вимірюваннях на об'єктах із однаковим значенням відповідного структурного параметра.

4) Інформативність – відображає рівень достовірності діагностичного висновку, отриманого на основі вимірювання значень діагностичного параметра.

Функціональні зв'язки параметрів технічного стану з діагностичними параметрами описуються рівняннями залежності зміни значень діагностичних параметрів від значень параметрів технічного стану об'єкта діагностування.

За результатами моделювання було прийнято рішення використовувати як діагностичні такі параметри функціонування електромобіля: сила тяги R_x на колесі електромобіля в режимі розгону та руху з постійною швидкістю; сила рекуперативного гальмування R_x в режимі рекуперативного гальмування; сила R_x , що витрачається на обертання трансмісії електромобіля в режимі вільного вибігу; швидкість V_a , що імітується на стенді; сила струму I інвертора силового приводу; сили фазних струмів I_A, I_B, I_C електродвигуна; час розгону t_p ; час t_v вільного вибігу електромобіля.

3.3.1 Функціональний зв'язок потокозчеплення з силою тяги на колесі електромобіля

Виявлення функціонального зв'язку потокозчеплення ψ як параметра технічного стану електродвигуна з силою тяги R_x на колесі електромобіля як діагностичного параметра реалізовано наступним чином. При багатоваріантному аналітичному розрахунку процесу функціонування електромобіля на стенді було встановлено, що при зміні потокозчеплення електродвигуна силового приводу утворюється область локальних діагнозів D_1 , зазначена на рисунку 3.7. В області локальних діагнозів D_1 січна АБ по найбільшому перерізу проведена паралельно осі ординат і відповідає швидкості, що імітується на стенді $V_a = 16$ км/год.

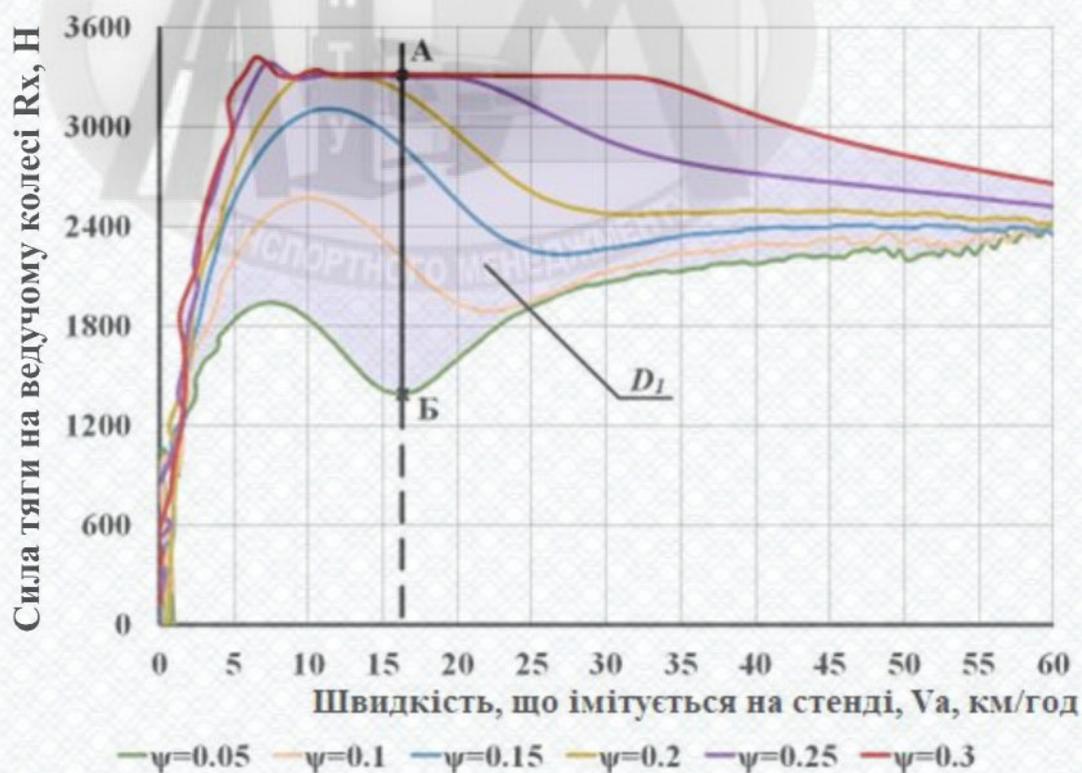


Рисунок 3.7 – Виявлення функціонального зв'язку між потокозчепленням ψ електродвигуна та силою тяги R_x на колесі електромобіля

Січна АБ обмежена крайніми реалізаціями, які є діагностичними ділянками для визначення параметра технічного стану електродвигуна. Цим параметром

прийнято потокозчеплення ψ , що характеризує ступінь електромагнітної взаємодії між ротором та статором електродвигуна.

Функціональний зв'язок ординат точок перетину реалізацій з діагностичною ділянкою січної АБ із силою тяги R_x на колесі електромобіля характеризується залежністю:

$$R_x = -43379\psi^2 + 22858\psi + 351,3. \quad (3.3)$$

При цьому значення коефіцієнта достовірності апроксимації складає $R^2 = 0,9985$.

3.3.2 Функціональний зв'язок струму інвертора з опором обмоток статора електродвигуна

Виявлення функціонального зв'язку струму I на інвертор як параметра технічного стану силового приводу електромобіля з опором R_S обмоток статора електродвигуна як діагностичного параметра реалізовано наступним чином. При моделюванні процесу функціонування електромобіля на стенді було виявлено, що зі збільшенням додаткового опору ΔR_S обмоток статора електродвигуна силового приводу утворюється область локальних діагнозів D_2 , зазначена на рис. 3.8. В області локальних діагнозів D_2 січна АБ по найбільшому перерізу проведена паралельно осі абсцис і відповідає силі тяги на колесі $R_x = 2670$ Н.

Січна АБ обмежена крайніми реалізаціями, які є діагностичними ділянками для визначення параметра технічного стану електричного силового приводу. Цим параметром прийнято опір R_S обмоток статора електродвигуна.

Функціональний зв'язок абсциси точок перетину реалізацій з діагностичною ділянкою січної АБ із силою струму I інвертора електромобіля описується залежністю:

$$I = 239,91 R_S^2 - 391,8 R_S + 231,72. \quad (3.4)$$

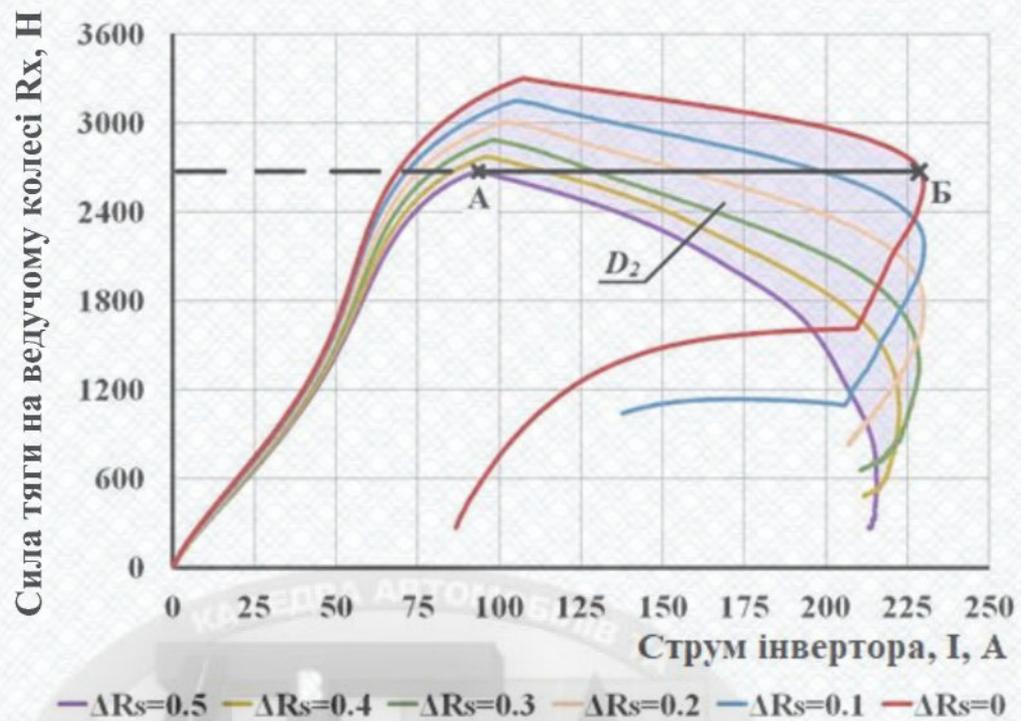


Рисунок 3.8 – Виявлення функціонального зв'язку між опором R_s обмоток статора електродвигуна та силою струму I інвертора електромобіля

При цьому значення коефіцієнта достовірності апроксимації дорівнює $R^2 = 0,9943$.

3.3.3 Функціональний зв'язок дисипації трансмісії електромобіля з силою, що витрачається на обертання трансмісії

Виявлення функціонального зв'язку дисипації d_{mp} як параметра технічного стану трансмісії електромобіля із силою R_x , що витрачається на обертання трансмісії як діагностичного параметра реалізовано в такий спосіб. В результаті моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді було виявлено, що при зміні дисипації d_{mp} трансмісії електромобіля утворюється область локальних діагнозів D_3 , зазначена на рис. 3.9. В області локальних діагнозів D_3 січна АБ по найбільшому перерізу проведена паралельно осі ординат і відповідає швидкості, що імітується на стенді, $V_a = 63$ км/год.

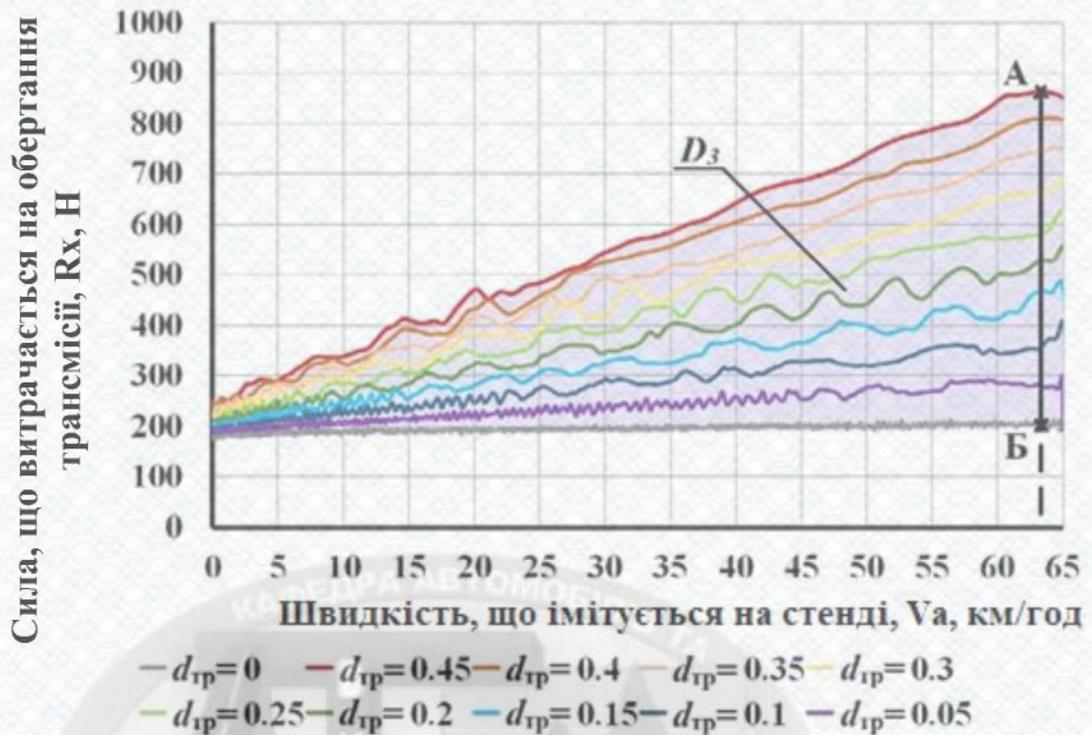


Рисунок 3.9 – Виявлення функціонального зв'язку між дисипацією $d_{тр}$ у трансмісії електромобіля та силою R_x , що витрачається на обертання трансмісії електромобіля

Січна АБ обмежена крайніми реалізаціями, які є діагностичними ділянками для визначення параметра технічного стану трансмісії електромобіля. Цим параметром прийнято дисипацію $d_{тр}$, що характеризує ступінь механічних втрат в елементах трансмісії електромобіля.

Функціональний зв'язок абсцис точок перетину реалізацій з діагностичною ділянкою січної АБ із силою R_x , що витрачається на обертання трансмісії електромобіля, описується залежністю:

$$R_x = -738,76d_{тр}^2 + 1807,2d_{тр} + 197,17. \quad (3.5)$$

При цьому значення коефіцієнта достовірності апроксимації дорівнює $R^2 = 0,9986$.

3.3.4 Функціональний зв'язок опору високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї із її напругою

Виявлення функціонального зв'язку опору R_{BAT} високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї як параметра технічного стану електромобіля з її напругою U_{BAT} як діагностичного параметра реалізовано в такий спосіб. За результатами моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді було виявлено, що зі збільшенням додаткового опору R_{BAT} у високовольтному ланцюгу підключення тягової високовольтної батареї утворюється область локальних діагнозів D_4 , зазначена на рис. 3.10. В області локальних діагнозів D_4 січна АБ по найбільшому перетину проведена паралельно осі ординат і відповідає швидкості, що імітується на стенді, $V_a = 5$ км/год.

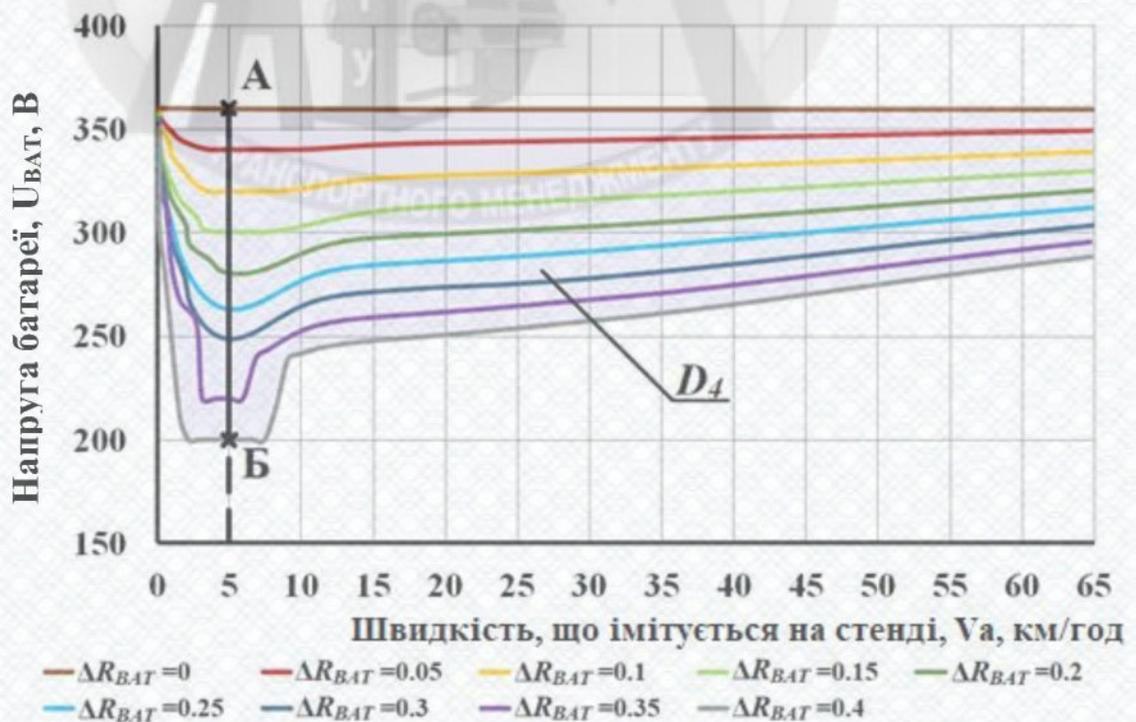


Рисунок 3.10 – Виявлення функціонального зв'язку між опором R_{BAT} високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї та напругою U_{BAT}

Січна АБ обмежена крайніми реалізаціями, які є діагностичними ділянками для визначення параметра технічного стану електромобіля. Цим параметром прийнято опір R_{BAT} , що характеризує стан високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї.

Функціональний зв'язок ординат точок перетину реалізацій з діагностичною ділянкою січної АБ із опором R_{BAT} ланцюга підключення тягової високовольтної батареї описується залежністю:

$$U_{BAT} = -393,01R_{BAT} + 360,31. \quad (3.6)$$

При цьому значення коефіцієнта достовірності апроксимації становило $R^2 = 0,9974$.

3.4 Висновки

1. Обґрунтовано методи, визначення діагностичних параметрів, що дозволяють встановлювати функціональні залежності основних експлуатаційних параметрів силового приводу електромобіля від параметрів технічного стану його агрегатів у процесі контролю на стенді з біговими барабанами.

2. Проведено математичне моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами при зміні параметрів його технічного стану, яке дозволяє виявляти функціональні залежності діагностичних параметрів, чутливих до зміни технічного стану агрегатів електромобіля, його систем та агрегатів, від параметрів функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами, що підтверджує можливість ефективного контролю технічного стану агрегатів електромобілів стендовим методом.

3. Встановлено функціональні залежності діагностичних параметрів і показників, що визначають тягово-швидкісні характеристики електромобіля, від зміни параметрів технічного стану його систем та агрегатів.

4 МЕТОДИКА ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВОГО ПРИВОДУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УМОВАХ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ

4.1 Вимоги до обладнання для діагностування силового приводу електромобіля

Аналізуючи можливості існуючих стендів з біговими барабанами з погляду можливості завдання тестових режимів, описаних у другому розділі, можна дійти висновку у тому, що значна частина сучасного стендового устаткування не здатна одночасно реалізовувати контроль і силових, і інерційних параметрів процесу функціонування електромобілів.

Силові стенди дозволяють вимірювати тягові сили двох ведучих коліс осі одночасно, тобто сумарно для осі загалом. Ця особливість виключає можливість контролю технічного стану агрегатів електромобілів з індивідуальними приводами коліс. Інерційні стенди через їх конструктивні особливостей взагалі не здатні вимірювати сили на колесах автомобілів. Такі методи контролю технічного стану вкрай неефективні для електромобілів.

Найбільш значущим питанням є вибір пристрою, що навантажує, оскільки саме від нього залежить можливість завдання тестових режимів. Для реалізації невстановлених режимів розгону, рекуперативного гальмування та вільного вибігу електромобіля необхідно використовувати інерційні махові маси стенда. У той же час вимірювальні системи стендів з біговими барабанами обов'язково повинні забезпечувати можливість контролю сил на колесах автомобіля, що діагностується. Варто зазначити, що дія сил на ведучих колесах електромобіля при функціонуванні в режимах вільного вибігу та рекуперативного гальмування матиме протилежний напрямок порівняно з тяговим режимом електромобіля. Відповідно системи вимірювання стенда повинні забезпечувати можливість вимірювання різноспрямованих сил, що діють на колесах автомобіля.

У той же час реалізація режимів функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами неможлива без застосування силового навантажувального пристрою. За функціональними та навантажуючими властивостями оптимальним пристроєм вважається електродинамічне гальмо. Сучасні мікроконтролери цілком здатні забезпечувати регулювання його гальмівного моменту M_m з метою забезпечення повною мірою необхідного тестового впливу на агрегати електромобіля.

Таким чином, однією з вимог до конструкції стенда з біговими барабанами для контролю технічного стану агрегатів електромобілів є його універсальність і гібридність, що поєднують у собі основні переваги як силових, так і інерційних стендів.

Для виконання ефективного контролю технічного стану агрегатів електромобіля без впливу з боку інтелектуальних електронних систем автомобіль повинен функціонувати так само, як у реальних дорожніх умовах, тобто всі колеса повинні обертатися з однаковою частотою. Реалізувати такі умови функціонування електромобіля можливо тільки якщо бігові барабани діагностичного стенду обертатимуться завжди синхронно, тобто вони мають бути кінематично жорстко зв'язані між собою. Тому другою вимогою до конструкції стенда з біговими барабанами є забезпечення можливості одночасного функціонування всіх коліс електромобіля так само, як у реальних дорожніх умовах.

Найбільш інформативним діагностичним параметром під час контролю тягово-динамічних властивостей є сила тяги на колесах автомобіля. Вимірюючи тягові сили на кожному колесі, можна дати оцінку роботи електричного силового приводу, у тому числі кожного індивідуального приводу колеса електромобіля, не тільки в тяговому режимі, але і в режимі рекуперації енергії. Знаючи величину сили тяги та частоту обертання коліс, можна обчислити потужність, підведена до коліс від електричного силового приводу для розгону, утримання постійної швидкості або рекуперативного гальмування електромобіля. Щоб дати оцінку якості функціонування електромобіля доцільно вимірювати струм, що віддається тяговою високовольтною батареєю та споживаний електродвигуном. Тому ще однією

вимогою до стенду є можливість виміру всіх перерахованих діагностичних параметрів одночасно при контролі технічного стану агрегатів електромобіля.

На підставі вищевикладеного було сформульовано вимоги до тестових режимів контролю технічного стану агрегатів електромобіля, а також до конструкції стендів з біговими барабанами.

1. Стенд з біговими барабанами повинен забезпечувати такі режими функціонування електромобіля: тяговий режим, тяговий режим із навантаженням, режим руху з постійною швидкістю, режим вільного вибігу та режим рекуперативного гальмування, у тому числі забезпечувати можливість поєднання та комбінування цих режимів.

2. Гібридна конструкція стенда повинна поєднувати переваги силових та інерційних стендів з біговими барабанами з можливістю вимірювання сил на кожному колесі електромобіля індивідуально. В якості навантажувального пристрою в конструкції стенда необхідно використовувати інерційні махові маси для імітації тягових режимів, режимів вільного вибігу і рекуперативного гальмування, так і силовий навантажувальний пристрій (наприклад електрогідравлічне гальмо) для забезпечення режимів руху з постійною швидкістю.

3. Стенд з біговими барабанами повинен забезпечувати можливість функціонування електромобіля аналогічно до режимів, характерних для реальних дорожніх умов.

4. Бігові барабани діагностичного стенду повинні мати жорсткий кінематичний зв'язок, що забезпечує їх обертання з однаковою кутовою швидкістю.

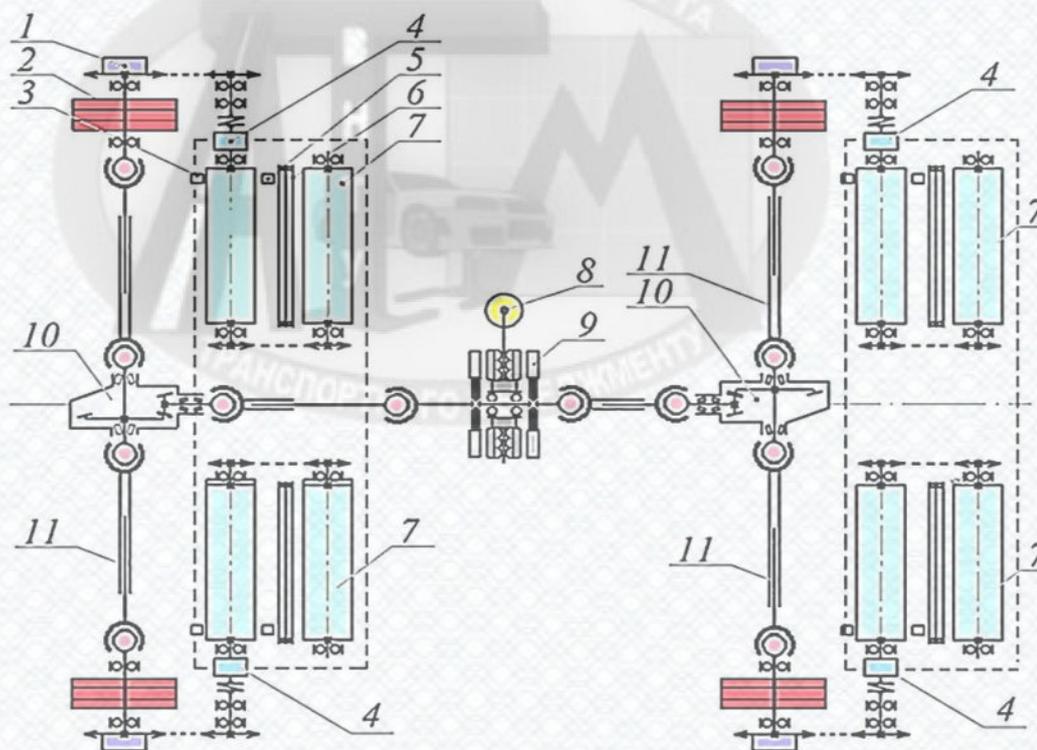
5. Стенд з біговими барабанами повинен забезпечувати можливість вимірювання швидкості обертання кожного колеса електромобіля індивідуально.

6. Стенд з біговими барабанами повинен забезпечувати можливість вимірювання сил, що діють на колесах електромобіля, у тому числі різноспрямованих.

7. Стенд з біговими барабанами повинен забезпечувати можливість вимірювання сили струму, споживаного силовим приводом електромобіля під час його функціонування.

4.2 Обладнання для діагностування силового приводу електромобіля

На основі вимог, описаних в підрозділі 4.1, запропоновано конструкцію гібридного стенда з біговими барабанами, схема якого наведена на рис. 4.1.



1 – муфта; 2 – маховик; 3 – індуктивний перетворювач швидкості барабанів; 4 – силовимірювальний датчик; 5 – індуктивний перетворювач швидкості обертання роликів, що слідкують; 6 - ролик системи що свідкує; 7 – барабани; 8 – тензометричний перетворювач зусилля електродинамічного гальма; 9 - електродинамічний навантажуючий пристрій; 10 – редуктор; 11 – карданна передача

Рисунок 4.1 – Структура діагностичного стенда з біговими барабанами

Запропонований стенд складається з двох автономних та рухомих щодо один одного блоків. У кожному з блоків встановлені бігові барабани 7, які виконують роль опорного пристрою для коліс автомобіля. Задній блок бігових барабанів має можливість поздовжнього переміщення для зміни міжосьової відстані діагностичного стенда відповідно до колісної бази контролюваного автомобіля. Бігові барабани 7 кінематично зв'язані з маховими масами 2 через ланцюгові передачі. У конструкції стенда застосований спосіб розгону коліс та бігових барабанів 7 від силового приводу електромобіля. При цьому махові маси 2 є акумуляторами енергії стенда при імітації режимів розгону і вибігу автомобіля.

Передній і задній блоки бігових барабанів стенда кінематично з'єднані між собою карданними валами 11 і редукторами 10, що дозволяє автомобілю функціонувати також, як в реальних дорожніх умовах. Між блоками бігових барабанів встановлений електродинамічний гальмівний пристрій 9 з датчиком виміру зусилля опору 8. Наявність електродинамічного гальма 9 дозволяє створювати додаткове навантаження на силовий привід електромобіля як у режимі розгону, так і в режимі при незмінній швидкості.

Ключовим моментом для виконання ефективного контролю технічного стану агрегатів електромобіля є можливість вимірювання параметрів функціонування його силового приводу. Для реалізації цієї вимоги запропоновано систему, що дозволяє вимірювати струм, споживаний агрегатами електричного силового приводу.

Струм, що проходить по провіднику, породжує всередині та навколо нього магнітне поле. На основі прямого вимірювання магнітного поля, що виникає, заснований принцип роботи струмовимірювальних датчиків. Конструкція датчика струму являє собою роз'ємний феромагнітний сердечник, що є магнітопроводом, в розрізі якого встановлено датчик Холла. Струм викликає навколишнє магнітне поле у магнітопроводі. Величина цього поля прямо пропорційна струму, що проходить провідником. Роз'ємна конструкція датчика дозволяє вимірювати параметри функціонування електричного силового приводу без вимикання

високовольтних дротів живлення електродвигуна та інших агрегатів електроприводу, тобто без розриву ланцюга живлення.

ЕРС датчика Холла прямо пропорційна полю, відповідно, за вимірами ЕРС датчика Холла можна побічно виміряти струм у провіднику, при цьому форма струму, що протікає в провіднику, не має значення. Вона може бути синусоїдальною, трикутною, прямокутною та прямою. Іншими словами, струмовимірювальний датчик, що працює на ефекті Холла, дозволяє проводити вимірювання постійного струму. Перевагою датчика Холла є те, що його ЕРС змінює знак за зміни напрямку магнітного поля. Це дозволяє використовувати розроблені датчики не тільки для вимірювання величини струму, що проходить у провіднику, але і для визначення напрямку його руху.

Дана особливість робить струмовимірювальні датчики універсальними і дозволяє використовувати їх як для вимірювання фазних струмів I_A , I_B , I_C , що протікають між інвертором та електродвигуном, так і струму I_{BAT} , що протікає між тяговою високовольтною батареєю та інвертором.

4.3 Методика діагностування силового приводу електромобіля

Діагностування технічного стану складного об'єкта, яким є електромобіль, за принципом «справний – несправний» реалізується шляхом використання множини діагностичних параметрів, визначених раніше. Відповідно до теоретичних положень, викладених у другому розділі, розроблено методику стендового контролю технічного стану агрегатів електромобіля на бігових барабанах, що базується на застосуванні діагностичних матриць.

Діагностична матриця використовується для визначення технічного стану агрегатів електромобіля шляхом аналізу взаємозв'язків між виявленими несправностями та відповідними діагностичними параметрами. Її формування здійснюється для найбільш ймовірних станів вузлів силового привода електромобіля [2, 7, 9, 10].

Для кожного можливого стану $X_1 \dots X_n$ в діагностичній матриці формуються стовпці, що містять комбінації нулів та одиниць. Ці комбінації відображають конкретний технічний стан агрегатів силового привода електромобіля. Значення «0» використовується, якщо вимірний діагностичний параметр у даному стані не виходить за межі нормативного діапазону. Значення «1» проставляється у випадку, коли параметр перевищує або виходить за межі встановленого діагностичного нормативу [2, 7, 9, 10].

Для ідентифікації технічного стану агрегатів електромобіля на основі отриманих діагностичних параметрів сформовано діагностичну матрицю, наведено на рис. 4.2.

Тестовий режим	Контрольований параметр	Нормативне значення	ДІАГНОЗ				
			Електричний силовий привід справний	Несправна електрична силова установка	Несправна трансмісія	Несправні високовольтні ланцюги	Несправна тягова високовольтна батарея
Тяговий режим	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $275 < I_i < 300$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$240 < I_{BAT} < 260$	0	1	0	0	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	1
	Час розгону, t_p , с	$t_p < 10,5$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$3400 < R_X < 3700$	0	1	1	1	0
Тяговий режим з навантаженням	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $315 < I_i < 340$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$270 < I_{BAT} < 290$	0	1	0	0	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 345$	0	0	0	0	1
	Час розгону, i_p , с	$t_p < 13,8$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$3900 < R_X < 4200$	0	1	1	1	0
Рух з постійною швидкістю	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $80 < I_i < 105$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	1	0	1	1
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$340 < R_X < 500$	0	1	1	1	0
Рекуперативне гальмування	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $65 < I_i < 80$	0	0	0	0	0
	Сила струму до тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	0	0	1	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	0
	Сила рекуперативного гальмування, R_X , Н	$R_X > 1680$	0	1	0	0	0
Вільний вибіг	Сила, що витрачається на обертання трансмісії, R_X , Н	$R_X < 245$	0	0	1	0	0
	Час вибігу, t_w , с	$t_w > 17$	0	0	1	0	0

Рисунок 4.2 – Приклад діагностичної матриці постановки діагнозу силового привода електромобіля KIA Soul EV на стенді з біговими барабанами

Метод діагностування технічного стану агрегатів електромобіля, що базується на використанні діагностичної матриці, забезпечує фіксацію стану об'єкта відповідно до вимірюваних параметрів його функціонування. Для реалізації контролю на стенді, отримання та аналізу діагностичної інформації, а також внесення даних у матрицю необхідно розробити алгоритм управління процесом діагностики.

Розроблений алгоритм управління процесом діагностування технічного стану агрегатів електромобіля, наведений на рис. 4.3, забезпечує виконання діагностики на стенді з біговими барабанами, включаючи кількісну оцінку стану систем та агрегатів силового привода.

Відповідно до розробленого алгоритму, процес діагностування агрегатів електромобіля включає підготовку стенда з біговими барабанами, що передбачає його запуск та прогрівання вимірювальних систем. Після цього електромобіль встановлюється на стенд, фіксується для забезпечення безпеки під час випробувань та підключається до системи вимірювання параметрів функціонування його електричного силового привода.

Згідно з розробленим алгоритмом, діагностування агрегатів електромобіля передбачає послідовне виконання кількох етапів. Спочатку задаються тестові режими, що імітують певний тестовий режим роботи електромобіля, після чого проводяться випробування. Далі здійснюється вимірювання основних експлуатаційних характеристик, включаючи параметри функціонування електричного силового привода. Отримані дані обробляються, порівнюються з нормативними значеннями, а результати аналізу використовуються для заповнення діагностичної матриці.

Якщо діагностична матриця не заповнена, задається наступний тестовий режим і проводиться черговий етап випробувань. Після заповнення діагностичної матриці здійснюється визначення технічного стану електромобіля, зокрема агрегатів його електричного силового привода, шляхом порівняння отриманих даних із нормативними показниками та встановлення відповідного діагнозу.

Завершальним етапом є виїзд електромобіля зі стенда з біговими барабанами.

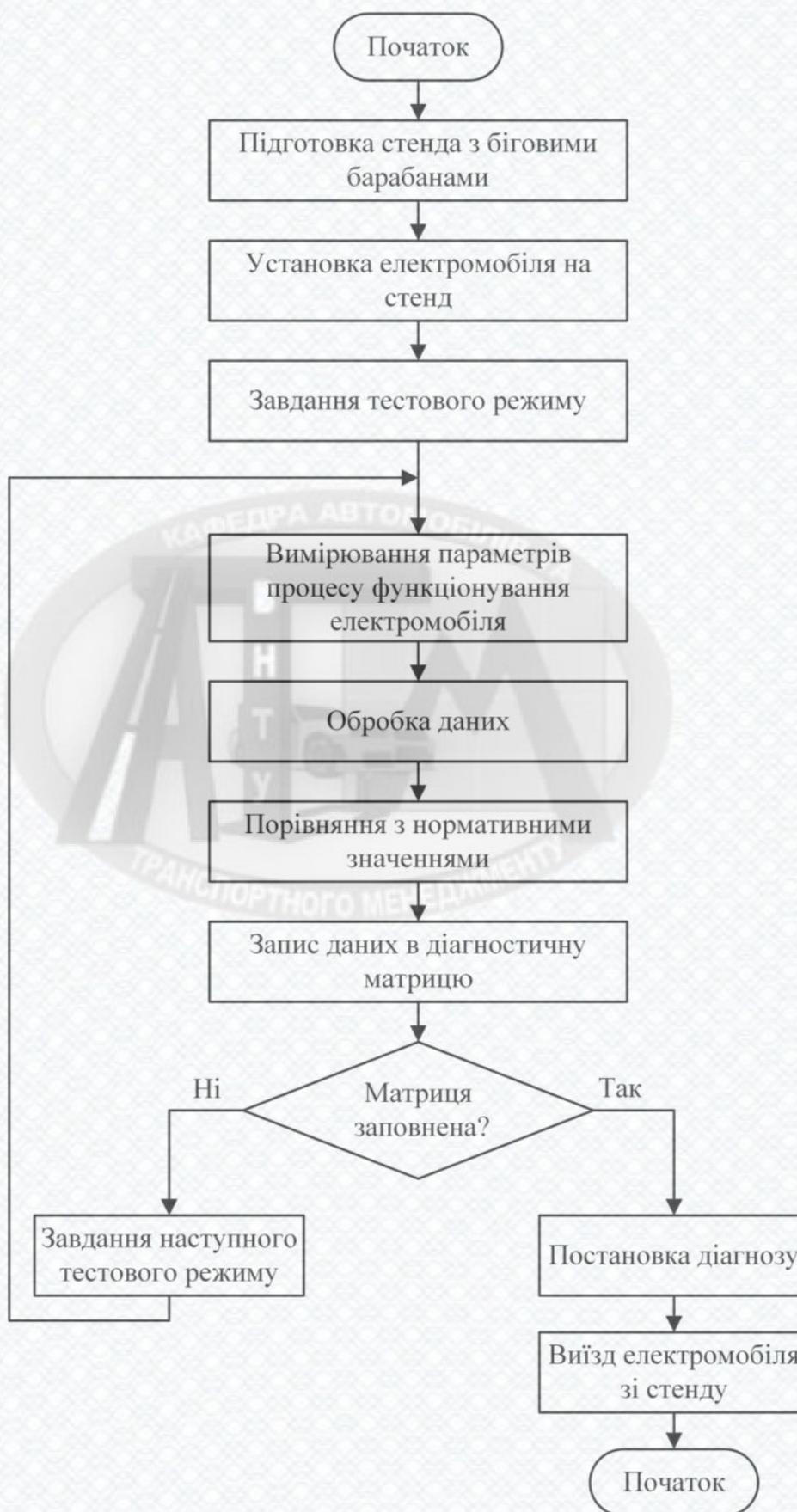


Рисунок 4.3 – Алгоритм діагностування силового приводу електромобіля на стенді з біговими барабанами

Розроблена діагностична матриця разом із алгоритмом управління забезпечує можливість кількісного діагностування технічного стану електромобіля, ґрунтуючись на запропонованих удосконаленнях існуючих методів оцінювання стану агрегатів та систем під час їх функціонування на стенді з біговими барабанами.

4.4 Економічний ефект від впровадження методики

Розрахунок економічного ефекту доцільно проводити за оцінками результатів впровадження розробленої методики діагностування агрегатів силового приводу електромобіля на стенді з біговими барабанами. Розрахунки щодо впровадження методики здійснювались на прикладі СТОА «Master Service Electro» в м. Київ. Дане підприємство на постійній основі удосконалює технологічні процеси з метою скорочення вартості обслуговування та ремонту автомобілів, а також витрат часу виконання цих робіт. Значну увагу мережа автосервісних станцій «Master Service» та «Master Service Electro» приділяє новим методам діагностики та визначення технічного стану як традиційних автомобілів, так і гібридних та електричних автомобілів. У зв'язку з цим річний економічний ефект від впровадження передбачуваної методики діагностування агрегатів електромобіля визначається за формулою:

$$E = \Pi - \Pi_{нов}; \quad (4.1)$$

де Π і $\Pi_{нов}$ - річні витрати що спостерігаються, відповідно, за відсутності та впровадженні нової методики діагностування.

Річні витрати при впровадженні нової методики діагностування:

$$\Pi_{нов} = \frac{t_p}{t_\phi} [(1 - \beta) \cdot A - \beta \cdot C + k \cdot B], \quad (4.2)$$

де t_p – середня величина річного пробігу електромобіля;

t_ϕ - середній, фактично використовуваний ресурс електричного силового приводу;

$(1 - \beta)$ – ймовірність правильного діагностування відмов електричного силового приводу за новою методикою;

A – витрати, пов'язані з усуненням відмов електричного силового приводу;

β - ймовірність діагностування помилкових відмов (помилки першого роду) електричного силового приводу за новою методикою;

C – витрати, пов'язані з усуненням хибних відмов;

B - приведені витрати на проведення однієї елементарної перевірки електричного силового приводу за новою методикою;

k - середня кількість елементарних перевірок електричного силового приводу за новою методикою.

Формула (4.2) є справедливою для випадку, коли стоїть завдання встановити стан електричного силового приводу автомобіля за принципом «працездатний» або «непрацездатний». Середні витрати, пов'язані з усуненням дійсних або «хибних» відмов електричного силового приводу автомобілів, визначаються за виразом:

$$A(C) = C_{np} + C_{an} + C_p + C_{ym}, \quad (4.3)$$

де C_{np} - витрати, пов'язані з втратами від простою електромобіля;

C_{an} - витрати, пов'язані з вартістю справних елементів електричного силового приводу, що використовуються для заміни несправних;

C_p - витрати, пов'язані з вартістю ремонтних комплектів та проведенням ремонтних впливів;

C_{ym} – витрати, пов'язані з утилізацією відбракованих елементів електричного силового приводу, що істотно зростають у разі необґрунтованого вибракування працездатних та ремонтпридатних елементів.

Приведені витрати на контроль технічного стану агрегатів електричного силового приводу автомобілів за новою методикою розраховуються відповідно до виразу:

$$B = C_z + C_a + T_p + E \cdot K, \quad (4.4)$$

де C_z - заробітна плата операторів-діагностів з нарахуваннями;

C_a – відрахування на амортизацію засобів діагностування;

T_p - витрати поточний ремонт засобів діагностування;

E - коефіцієнт нормативної ефективності, $E = 0,12$;

K – питомі капітальні витрати, що припадають на діагностування агрегатів електричного силового приводу автомобілів.

Заробітна плата персоналу, який проводить діагностування агрегатів електромоіблів, може бути обчислена за рівнянням:

$$C_z = (T_{дон} + T_m + T_{вим} + T_{\delta}) C_{год} K_{\delta} K_{відр}, \quad (4.5)$$

де $T_{дон}$ – тривалість допоміжних робіт;

T_m - тривалість тестового впливу;

$T_{вим}$ - тривалість вимірювання та реєстрації діагностичних параметрів;

T_{δ} – тривалість процедури контролю технічного стану;

$C_{год}$ – годинна тарифна ставка оператора-діагноста;

K_{δ} - коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату;

$K_{відр}$ - коефіцієнт, що враховує нарахування на фонд заробітної плати.

Інші складові формули (4.4) розраховуються за виразами:

$$C_a = \frac{B \cdot a}{100 A_n}; \quad (4.6)$$

$$T_p = \frac{B \cdot T_{mp}}{100 A_n}; \quad (4.7)$$

$$K = \frac{B}{A_n}; \quad (4.8)$$

де B - балансова вартість засобів діагностування;

A_n - річне число діагностувань;

a , T_{mp} – норми відрахувань на амортизацію та поточний ремонт, 12 та 11 % відповідно.

Балансова вартість засобів діагностування, необхідні реалізації розробленої методики, а саме – модифікації наявного стенда з біговими барабанами, становить приблизно 800 тис. грн. Однією зі складових величин економічного ефекту по підприємству «Master Service Electro» є повернення працездатних електричних силових приводів в експлуатацію. Розрахунок цієї величини проводиться за такою формулою:

$$E_z = N_1 C_{cp}; \quad (4.9)$$

де N_1 - кількість електричних силових приводів, повернутих в експлуатацію;

C_{cp} - середня вартість працездатного електричного силового приводу.

Економічний ефект можна отримати за рахунок зниження трудомісткості виконання процедури діагностування. Це сприяє зменшенню часу простою автомобіля при контролі технічного стану електричного силового приводу. При контролі технічного стану агрегатів електромобіля дорожнім методом та при використанні сканера час зменшення простою складе:

$$E_{yup} = t_d N_{na}; \quad (4.10)$$

де t_d - зниження витрат часу на діагностування одного агрегату електричного силового приводу;

N_{na} – кількість агрегатів електричного силового приводу, якими знижуються витрати часу діагностування.

Оцінка заходів впровадження методики спеціалістами СТОА «Master Service Electro», що розроблена методика діагностування силових приводів електромобілів дозволяє на 15–20 % знизити тривалість діагностування та на 15–30 % час перебування автомобіля у СТО. При цьому помилки «пропуску відмови» знизяться на 25-30%, а помилки «хибна тривога» знизяться на 15-20%.

Таким чином

$$E = P - P_{нов} = 385000 - 225800 = 159200 \text{ грн}$$

Відповідно термін окупності складе приблизно 5,1 роки.

4.5 Висновки

1. Обґрунтовано вимоги до конструкції стану з біговими барабанами при діагностуванні силового приводу електромобілів. Розроблено принципову схему гібридного повноопорного стану з біговими барабанами, який дозволяє задавати тестові режими, що відповідають типовим режимам функціонування електромобілів, а також визначати діагностичні параметри.

2. Запропонована методика діагностування агрегатів силового привода електромобілів розроблена на основі встановлених залежностей між параметрами, що визначають тягово-швидкісні характеристики електромобілів, та показниками технічного стану їх агрегатів і систем. Реалізація методики здійснюється із застосуванням розробленого алгоритму та діагностичної матриці, що забезпечує виконання діагностики та кількісного контролю технічного стану агрегатів електричного силового привода під час роботи автомобіля на стендах з біговими барабанами.

3. За оцінками можливості впровадження методики в СТОА «Master Service Electro» встановлено, що вона дозволяє на 15–20 % знизити тривалість діагностування та на 15–30 % час перебування автомобіля у СТО. Оціночний термін окупності складе приблизно 5,1 роки.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів при виконанні діагностичних робіт на стенді з біговими барабанами.

1. В першому розділі проведений аналіз методів контролю технічного стану агрегатів автомобілів з електричним силовим приводом. Встановлено, що багато існуючих методів контролю не дозволяють в повній мірі оцінити технічний стан силових приводів електромобілів. Стендовий методом діагностування потребує удосконалення з метою адаптації до процесів функціонування автомобілів з електричним силовим приводом на стендах з біговими барабанами.

2. Аналіз структури і стану ВТБ СТОА «Master Service Electro» м. Київ дозволив встановити, що наявна ВТБ є в цілому здатна виконувати поставлені задачі, а отже вдосконалення ефективності роботи можливе за рахунок вдосконалення процесів діагностування, зокрема діагностування силового приводу електромобілів.

3. Сформовано математичну модель та розроблена структурна схема процесу моделювання функціонування електромобіля при контролі технічного стану агрегатів електричного силового приводу на стендах з біговими барабанами. Модель дозволяє виявляти залежності діагностичних параметрів та показників тягово-динамічних властивостей електромобілів від параметрів технічного стану їх агрегатів та систем у стендових умовах.

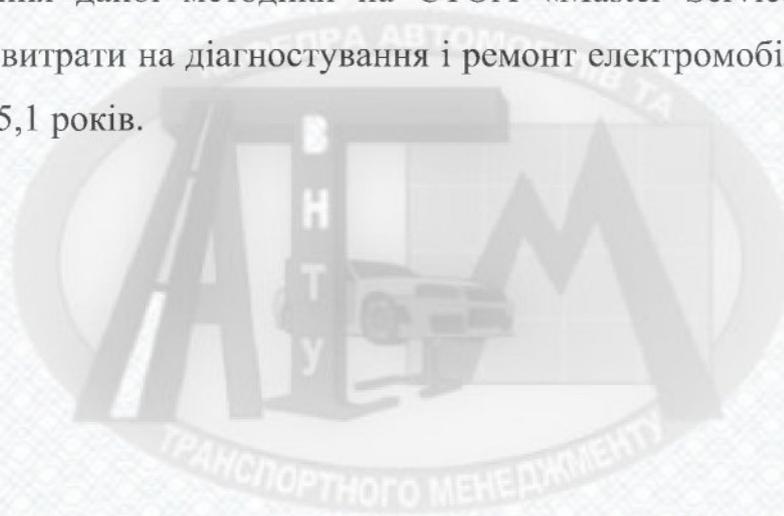
4. В процесі комп'ютерного моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами при зміні параметрів його технічного стану виявлені залежності діагностичних параметрів та показників, що характеризують тягово-швидкісні властивості електромобілів від параметрів технічного стану їх агрегатів та систем.

5. Обґрунтовано вимоги та розроблено принципову схему гібридного повноопорного стенду з біговими барабанами, який дозволяє задавати тестові

режими, що відповідають типовим режимам функціонування електромобілів, а також визначати діагностичні параметри.

6. Розроблена методика діагностування агрегатів електричного силового приводу автомобілів, яка дозволяє виконувати діагностику та кількісний контроль технічного стану агрегатів електричного силового приводу при функціонуванні автомобілів на стендах з біговими барабанами.

7. Запропонована методика дозволяє на 15–20 % знизити тривалість діагностування та на 15–30 % час перебування автомобіля у СТО. Розрахунки впровадження даної методики на СТОА «Master Service Electro» дозволяють скоротити витрати на діагностування і ремонт електромобілів, а термін окупності становить 5,1 років.



СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навчальний посібник / В. В. Біліченко, О. Л. Добровольський, В. О. Огневий, Є. В. Смирнов – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 163 с.
2. Біліченко В. В. Основи технічної діагностики колісних транспортних засобів : навч. посіб. / В. В. Біліченко, В. Л. Крещенський, Ю. Ю. Кукурудзяк, С. В. Цимбал. - Вінниця : ВНТУ, 2012. - 118 с.
3. Васильковський Р.О., Смирнов Є.В. Методи діагностування силового приводу електромобіля // Матеріали міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», [Електронний ресурс], Вінниця: ВНТУ, 2026. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/viewFile/26548/21855>
4. Волков, В. П. Теорія руху автомобіля: підручник / В. П. Волков, Г. Б. Вільський. - Суми : Університетська книга, 2010. - 320 с.
5. Виробничо-технічна база підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник / [В.В. Біліченко, В.Л. Крещенецький, С.О. Романюк, Є.В. Смирнов]. Вінниця, ВНТУ, 2013. Режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua/newauto/5/index.html>.
6. Гібридні автомобілі / Бажинов О.В., Смирнов О.П., Серіков С.А., Гнатов А.В., Колесніков А.В. - Харків, ХНАДУ, 2008. - 327 с.
7. Канарчук В.Є., Лудченко О. А., Чигринець А. Д. Основи технічного обслуговування і ремонту автомобілів. Кн. 1 : Теоретичні основи. Технологія: Підручник. К. : Вища школа, 1994. 384 с.
8. Кошарний М.Ф. Основи механіки та енергетики автомобіля: Навч.посібник / Кошарний М.Ф. К.:Вищащк., 1992. 200 с.
9. Левкович М.Г. Комп'ютерна діагностика : Конспект лекцій з дисципліни / Уклад. Левкович М.Г. Босюк П.В. Тесля В.О. – Тернопіль, 2016. – 130 с.

10. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: Технологія: [підручник для студентів вузів] / О.А. Лудченко. – К.: Вища школа, 2007. – 527с.

11. Мармут І. А. Експериментальне дослідження опору кочення коліс автомобіля на роликовому стенді / І. А. Мармут, В. А. Кашканов, В. О. Зуєв // Вісник машинобудування та транспорту. - 2020. - № 2. - С. 68-75.

12. Мармут І. А. Математичні моделі стендової діагностики гальмівних систем автомобілів / І. А. Мармут // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. - 2018. - № 2. - С. 90-96.

13. Мармут І.А. Розробка методики повірки системи вимірювання потужності на роликовому стенді пересувної діагностичної станції легкових автомобілів. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів». – Х.: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2020. – № 22, с. 19-26. DOI: 10.37700/ts.2020.22.19-26.

14. Мармут І. А. Силова взаємодія коліс автомобіля з повноопорним стендом з біговими барабанами / І. А. Мармут, Е. Х. Рабінович, Т. В. Волкова // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2019. - № 17. - С. 14-24.

15. Мармут І. А. Удосконалення методики визначення нормативів тягових властивостей автомобіля Skoda Fabia при стендовому діагностуванні / І. А. Мармут, В. А. Кашканов, В. О. Зуєв // Вісник машинобудування та транспорту. - 2023. - № 2. - С. 101-109.

16. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів [текст]: Навч. посібн. / М.А. Подригало, В.В. Шелудченко –Суми.: Сумський національний аграрний університет, 2015.– 213с.

17. Роликові стенди для перевірки гальмівних та тягових властивостей автомобілів (теорія, розрахунок та конструювання): монографія. / Говорущенко М.Я., Волков В.П., Рабінович Е.Х., Мармут І.А., Зуєв В.О. Харків: ХНАДУ, 2009, 344 с.

18. Чижик В.В. Фізичні основи автомобільного транспорту: Навчальний посібник / Чижик В.В., Гель П.В. - К.: УМК ВО 1990. – 131 с.
19. A novel intelligent method for fault diagnosis of electric vehicle battery system based on wavelet neural network / L. Yao [et al.] // Journal of Power Sources. – 2020. – Vol. 453.
20. BOSCH: Automotive Handbook, 11th Edition. Robert Bosch GmbH. Wiley, 2022. 2048 p. ISBN: 978-1-119-91191-3.
21. Dynamometer test of a rule-based discharge strategy for plug-in hybrid electric vehicles / V. Larsson [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, Iss. 11. – Pp. 141–146.
22. Ejsmont, J. Engineering method of tire rolling resistance evaluation / J. Ejsmont, W. Owczarzak // Measurement. – 2019. – Vol. 145. – Pp. 144–149.
23. Emadi, A. Advanced Electric Drive Vehicles. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 586 p.
24. Experimental verification of small diameter rollers utilization in construction of roller test stand in evaluation of energy loss due to rolling resistance / M. Pexa [et al.] // Measurement. – 2020. – Vol. 152.
25. Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives, Brakes, Safety Systems / Bosch Professional Automotive Information. Editor: Konrad Reif. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. 277 p.
26. Model based insulation fault diagnosis for lithium-ion battery pack in electric vehicles / Y. Wang [et al.] // Measurement. – 2019. – Vol. 131. – Pp. 443–451.
27. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design / M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi. . CRC Press, 2005. 395 p.
28. Pacejka, H.B., Bakker E., Nyborg L. Tyre modeling for use in vehicle dynamics studies / Pacejka H.B., Bakker E., Nyborg L. – SAE, 1987. – P. 1–12.
29. Pacejka, H.B. Tyre and Vehicle Dynamics / H.B. Pacejka. – 3rd ed. – Elsevier : TU Delft, 2002. – 642 p.

30. Robust Fault Diagnosis of Sensor Faults in Power Converter used in Hybrid Electric Vehicle / I. Kleilat [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – Pp. 326–331.

31. Voltage fault diagnosis and prognosis of battery systems based on entropy and Z-score for electric vehicles / Z. Wang [et al.] // Applied Energy. – 2017. – Vol. 196. – Pp. 289–302.



Додаток А
(обов'язковий)



ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ СИЛОВОГО ПРИВОДУ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В УМОВАХ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
АВТОМОБІЛІВ «MASTER SERVICE ELECTRO» МІСТО КИЇВ

Вінницький національний технічний університет
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Ілюстративний матеріал до
магістерської кваліфікаційної роботи
на тему:

**Удосконалення процесу діагностування силового приводу
електромобілів в умовах станції технічного обслуговування
автомобілів «Master Service Electro» місто Київ**

Розробив: ст. гр. 1АТ-24м
Васильковський Р.О.
Керівник: к.т.н., доцент
Смирнов Є. В.

Мета роботи – підвищення інформативності та оперативності діагностування агрегатів силового приводу електромобілів на стендах із біговими барабанами.

Завдання дослідження

- провести аналіз існуючих методів та наукових підходів діагностування автомобілів та електромобілів зокрема на стендах з біговими барабанами;
- проаналізувати сучасний стан виробничо-технічної бази СТОА «Master Service Electro» м. Київ;
- описати математичну модель функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами, розробити алгоритм моделювання функціонування агрегатів силового приводу електромобіля при діагностуванні на стенді з біговими барабанами;
- виконати моделювання функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами, обґрунтувати діагностичні параметри та отримати функціональні залежності діагностичних параметрів від параметрів технічного стану агрегатів електричного силового приводу;
- удосконалити методику діагностування силового приводу електромобіля на стендах з біговими барабанами, обґрунтувати принципову схему діагностичного обладнання та розрахувати ефективність впровадження методики в СТОА «Master Service Electro».

Об'єкт дослідження – процес функціонування електромобілів при діагностуванні їхнього технічного стану на стендах з біговими барабанами.

Предмет дослідження – функціональні залежності діагностичних параметрів та показників тягово-динамічних властивостей електромобілів від параметрів технічного стану агрегатів електричного силового приводу при діагностуванні на стендах з біговими барабанами.

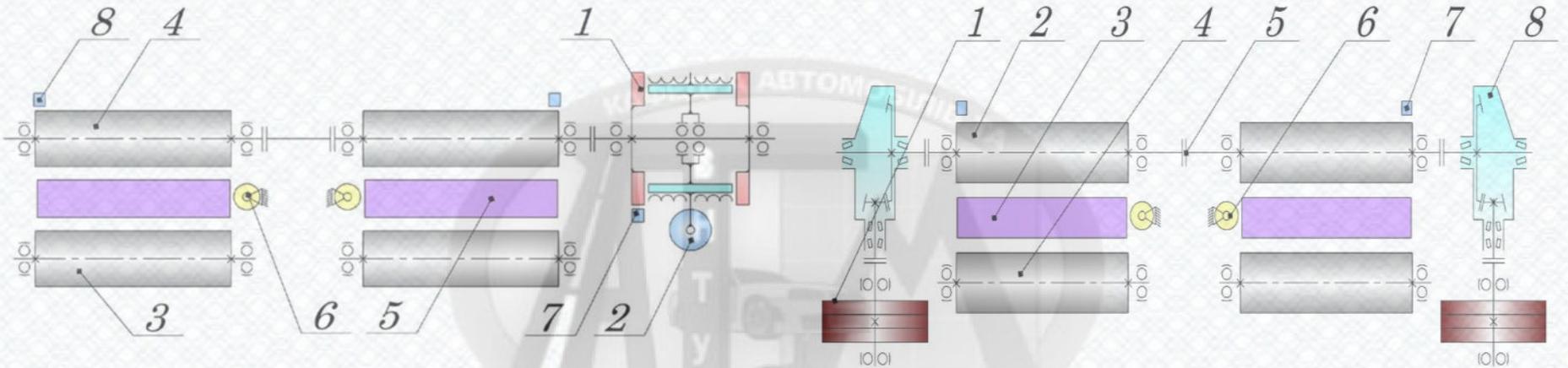
Новизна отриманих результатів

- удосконалено методи діагностики та підходи до проектування обладнання для контролю технічного стану силового приводу електромобіля на стендах з біговими барабанами;
- отримали подальший розвиток математичні моделі, які описують функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами.

Практичне значення отриманих результатів

полягає у підвищенні якості контролю технічного стану агрегатів електричного силового приводу автомобілів в умовах СТОА за рахунок зниження трудомісткості та підвищення оперативності робіт.

Стендові методи діагностування силового приводу автомобіля



1 – електродинамічне гальмо; 2 – датчик зусилля на електродинамічному гальмі; 3 – задній біговий барабан; 4 – передній біговий барабан; 5 – підйомно-виштовхувальний пристрій; 6 – обмежувальний ролик-відбійник; 7 – датчик частоти обертання електродинамічного гальма; 8 – датчик частоти обертання бігового барабана

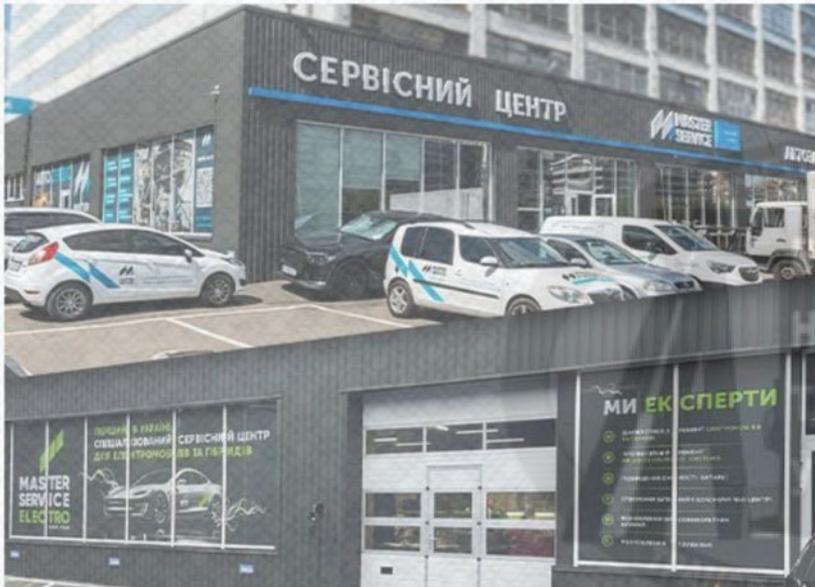
Рисунок 1 – Структура силового стенда з біговими барабанами

1 – інерційна махова маса; 2 – передній біговий барабан; 3 – підйомно-виштовхувальний пристрій; 4 – задній біговий барабан; 5 – муфта; 6 – відбійний ролик; 7 – датчик реєстрації швидкості обертання колеса; 8 – редуктор

Рисунок 2 – Структура інерційного стенда з біговими барабанами

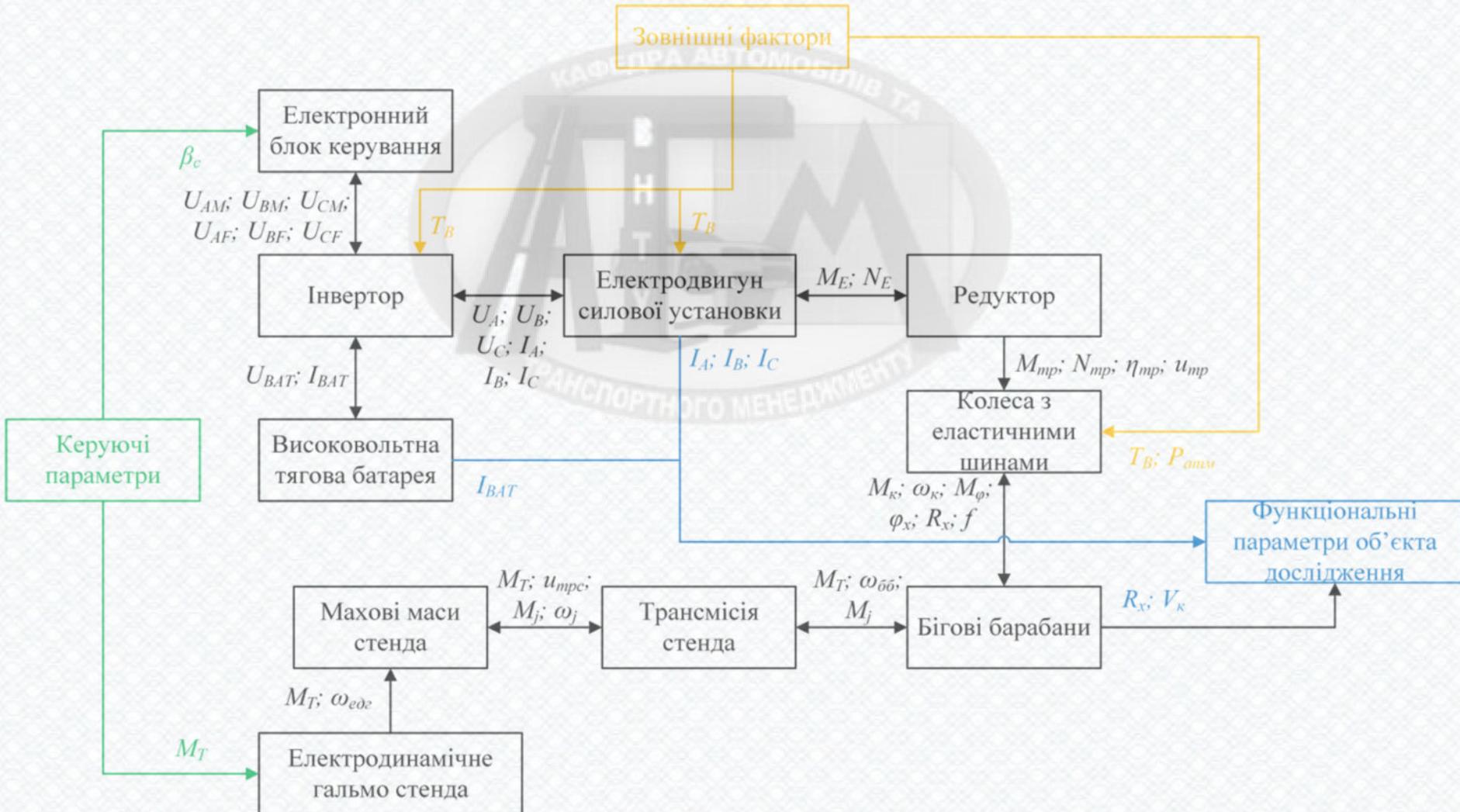
Висновок. Використання гібридних стендів, які поєднують переваги інерційних та силових конструкцій, є найбільш ефективним з точки зору діагностики. Такі стенди дозволяють відтворювати навантаження на автомобіль, максимально наближене до реальних умов експлуатації.

Характеристика ВТБ СТОА «Master Service Electro» м. Київ

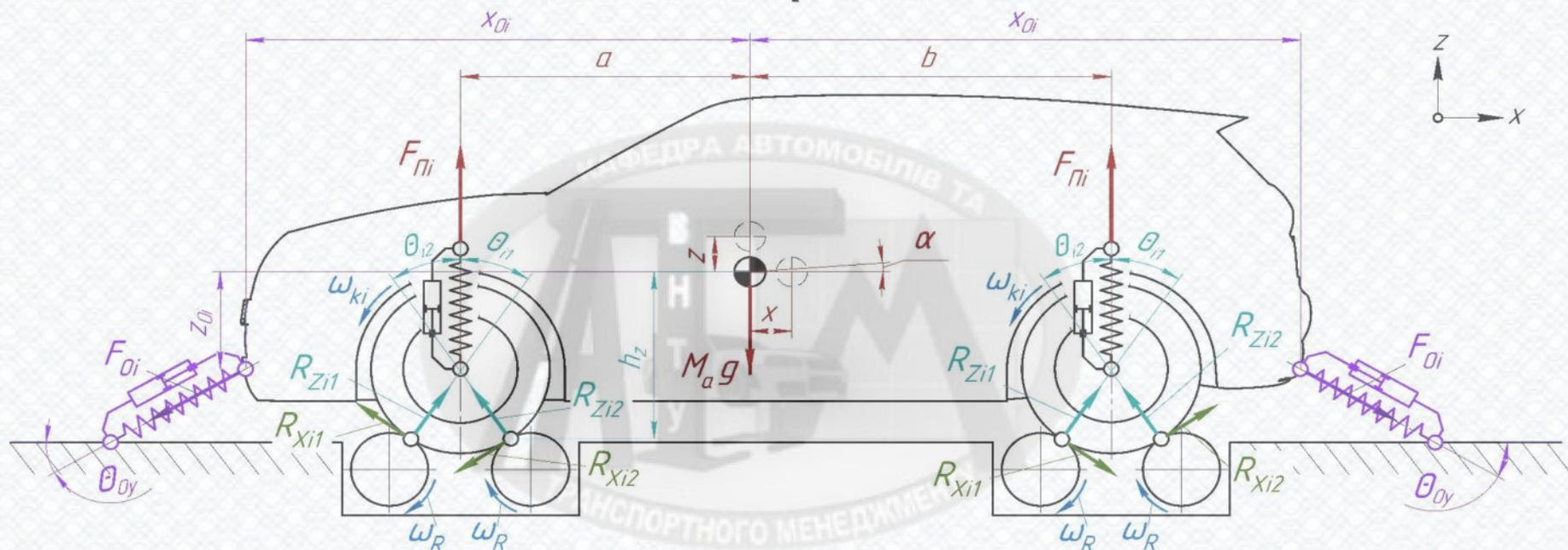


- зона ТО і ПР електромобілів та гібридів на 10 виробничих постів;
- дільниця ремонту високовольтних акумуляторних батарей;
- дільниця ремонту електричного та електронного обладнання електромобілів та гібридів;
- дільниця ремонту силових приводів та електродвигунів;
- склад;
- адміністративні приміщення та приміщення для клієнтів;
- побутовий блок.

Структурна схема процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами



Математична модель системи «силовий привід електромобіля – стенд з біговими барабанами»



Диференціальні рівняння для визначення прискорення поздовжнього переміщення підресореної маси електромобіля вздовж осей OX та OZ :

$$M_a \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum R'_{Xi} + \sum R'_{Zi} + \sum F'_{Oi}; \quad M_a \frac{d^2 z}{dt^2} = \sum R'''_{Xi} + \sum R'''_{Zi} + \sum F'''_{Oi} - M_a g$$

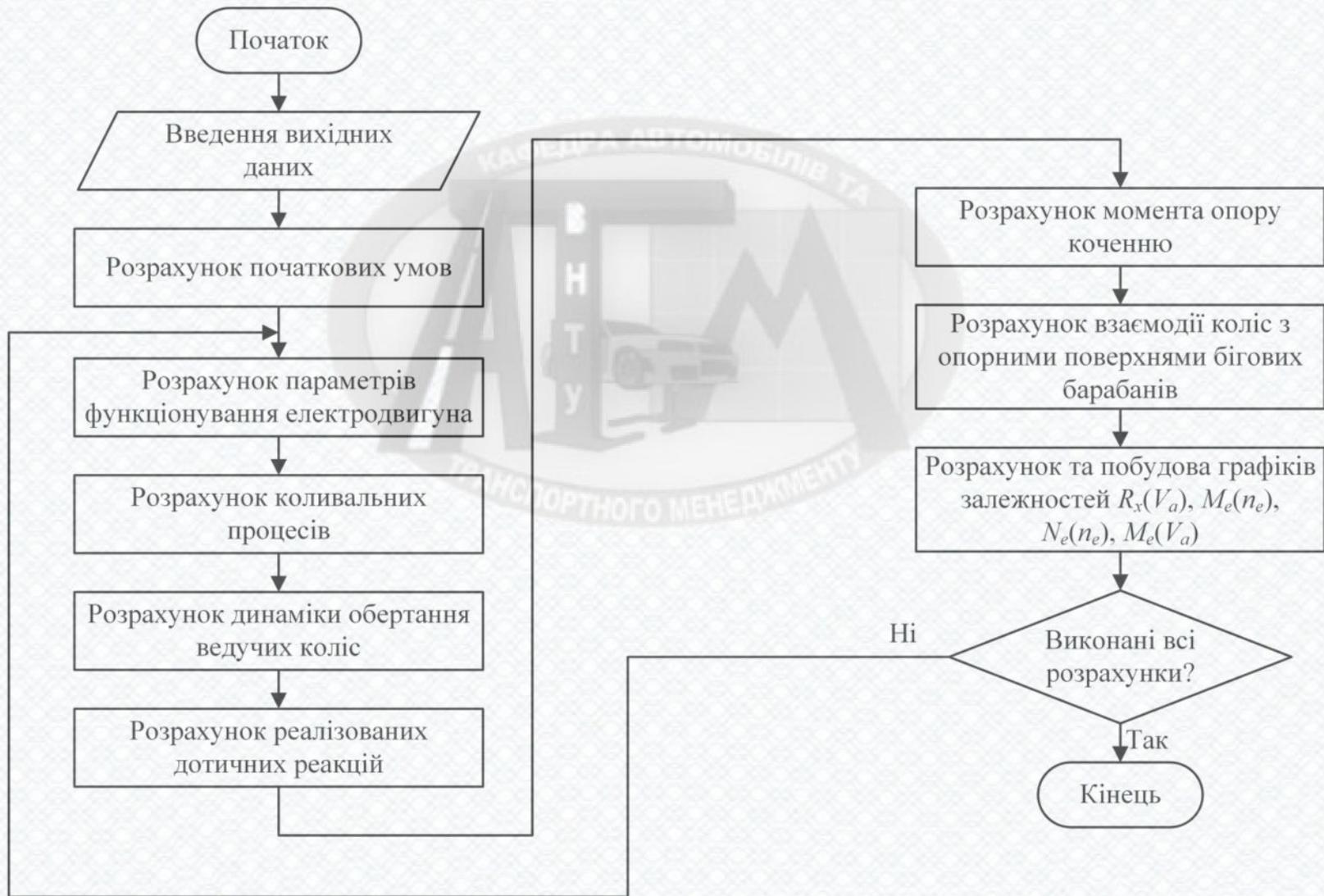
Диференціальні рівняння для визначення кутового переміщення кузова електромобіля у площині XOZ щодо осі OY

$$J_y \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum R'_{Xi} z_i + \sum R'_{Zi} z_i + \sum R'''_{Xi} x_i + \sum R'''_{Zi} x_i + \sum F'_{Oi} z_{Oi} + \sum F'''_{Oi} x_{Oi} + \sum F_{Pi} a + \sum F_{Pi} b$$

Диференціальні рівняння що описують динаміку обертання ведучого колеса електромобіля в тяговому режимі та режимі рекуперативного гальмування:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{M_k - R_{X1} r_{k01} - R_{X2} r_{k02} - M_{jk} - M_{jc} - M_f}{J_k}, \quad \frac{d\omega_k}{dt} = \frac{-M_T + M_{jk} + R_{X1} r_{k01} + R_{X2} r_{k02} + M_{jc} - M_f}{J_k}$$

Алгоритм розрахунку параметрів функціонування системи



Результати моделювання функціонування електромобіля на стенді (1)

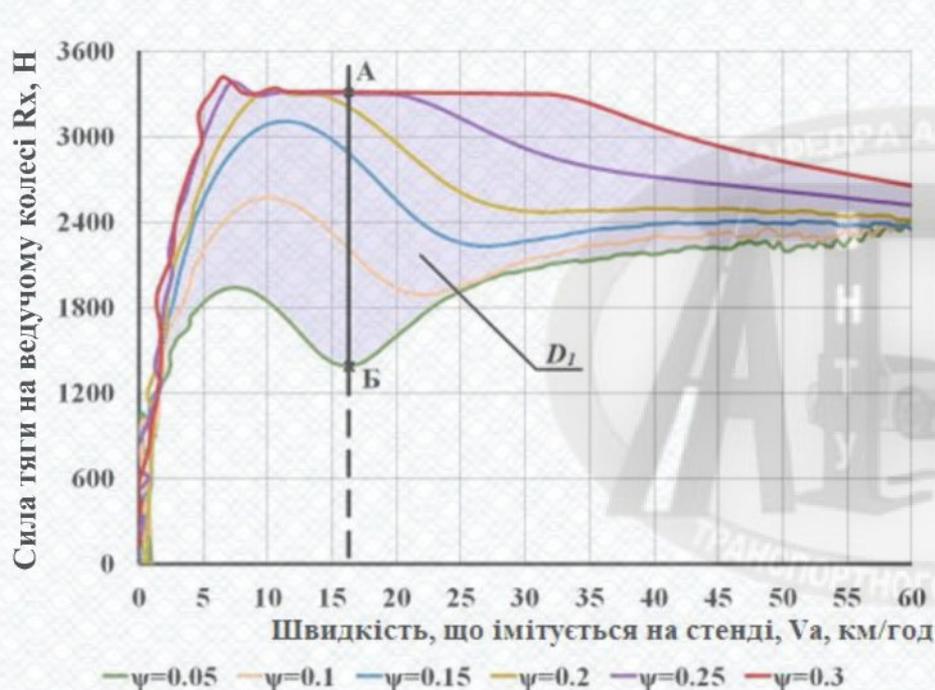


Рисунок 1 – Виявлення функціонального зв'язку між потокозчепленням ψ електродвигуна та силою тяги R_x на колесі електромобіля

$$R_x = -43379\psi^2 + 22858\psi + 351,3$$

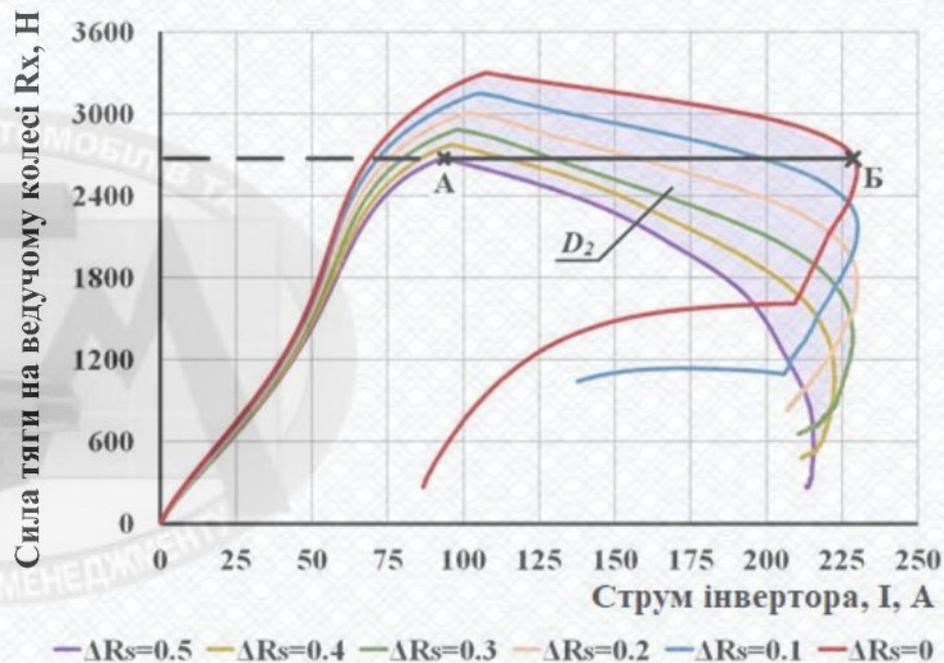


Рисунок 2 – Виявлення функціонального зв'язку між опором R_s обмоток статора електродвигуна та силою струму I інвертора електромобіля

$$I = 239,91 R_s^2 - 391,8 R_s + 231,72$$

Результати моделювання функціонування електромобіля на стенді (2)

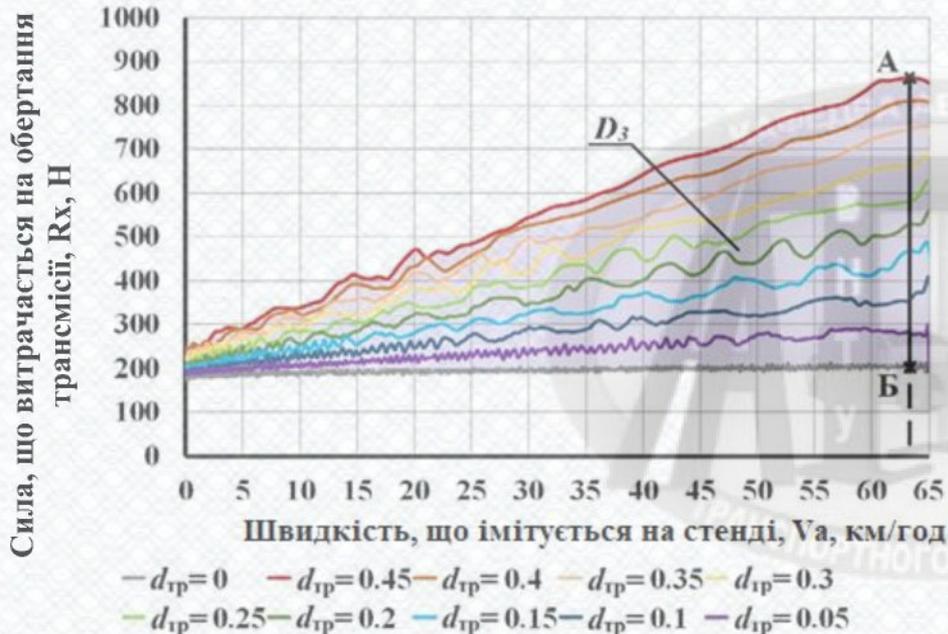


Рисунок 3 – Виявлення функціонального зв'язку між дисипацією d_{mp} у трансмісії електромобіля та силою R_x , що витрачається на обертання трансмісії електромобіля

$$R_x = -738,76d_{mp}^2 + 1807,2d_{mp} + 197,17$$

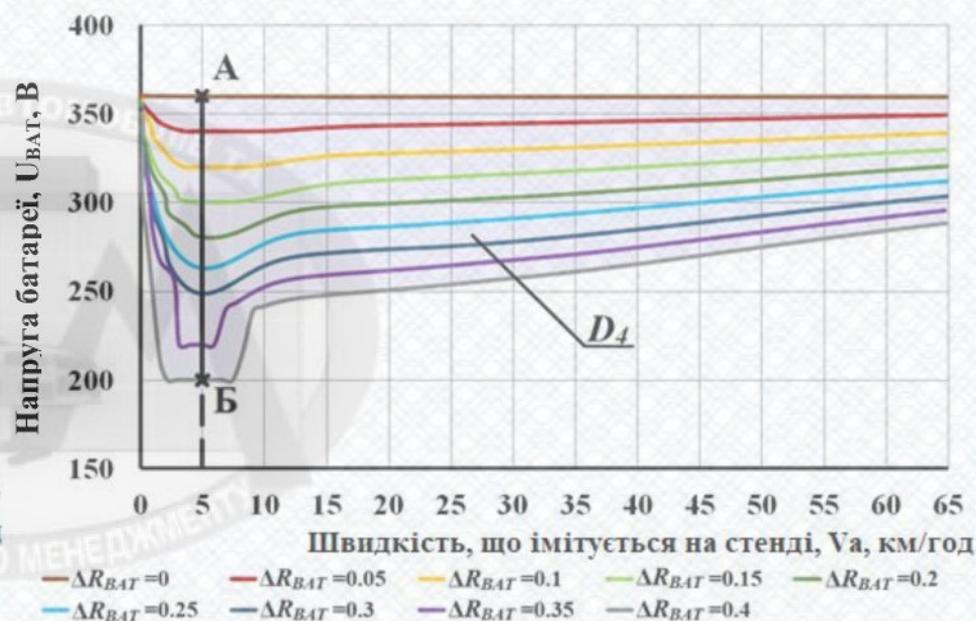
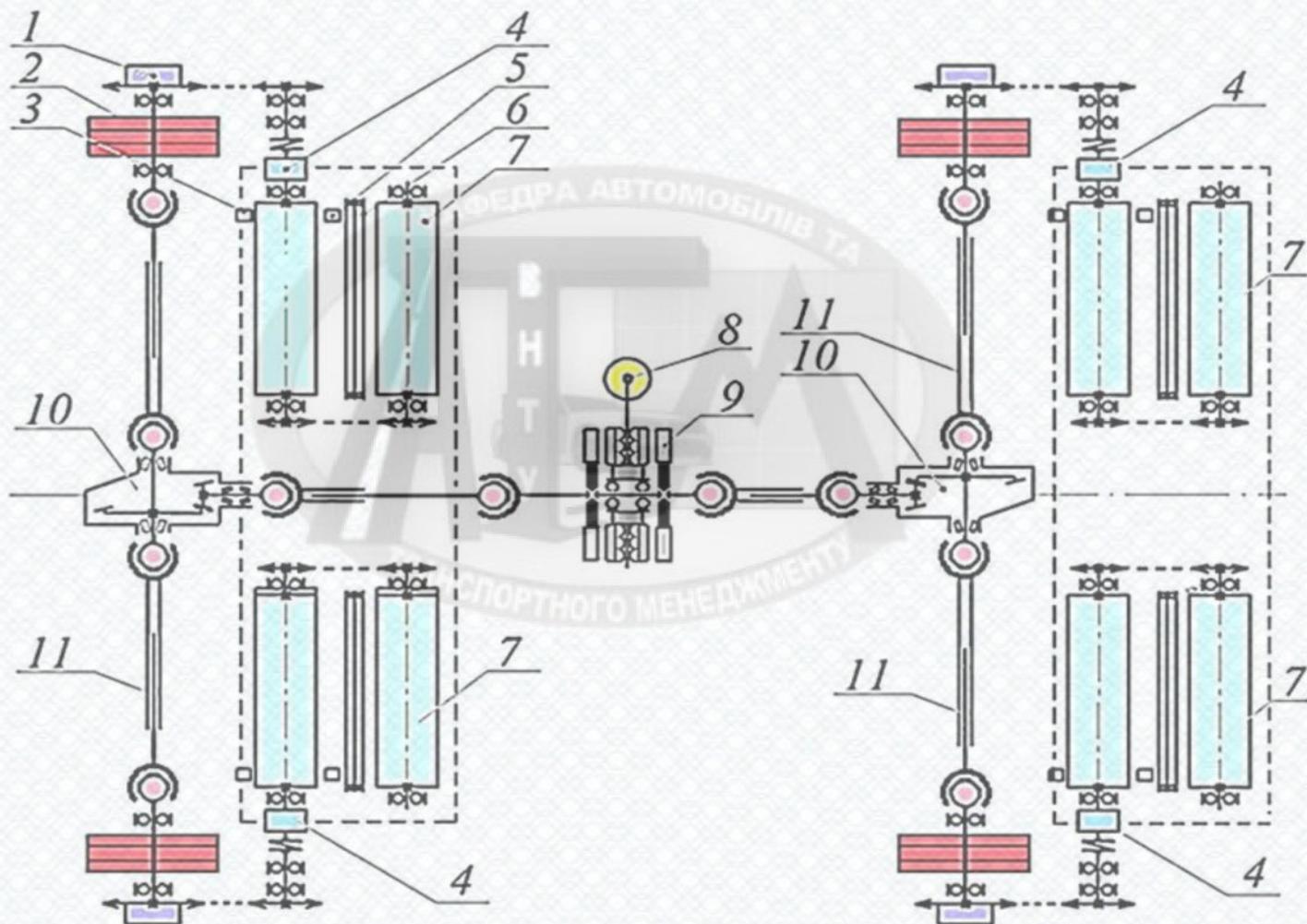


Рисунок 4 – Виявлення функціонального зв'язку між опором R_{BAT} високовольтного ланцюга підключення тягової високовольтної батареї та напругою U_{BAT}

$$U_{BAT} = -393,01R_{BAT} + 360,31$$

Структура діагностичного стенда з біговими барабанами



1 – муфта; 2 – маховик; 3 – індуктивний перетворювач швидкості барабанів; 4 – силівимірювальний датчик; 5 – індуктивний перетворювач швидкості обертання роликів, що слідкують; 6 - ролик системи що свідкує; 7 – барабани; 8 – тензометричний перетворювач зусилля електродинамічного гальма; 9 - електродинамічний навантажуючий пристрій; 10 – редуктор; 11 – карданна передача

Діагностична матриця постановки діагнозу силового приводу електромобіля

Тестовий режим	Контрольований параметр	Нормативне значення	ДІАГНОЗ				
			Електричний силовий привід справний	Несправна електрична силова установка	Несправна трансмісія	Несправні високовольтні ланцюги	Несправна тягова високовольтна батарея
Тяговий режим	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $275 < I_i < 300$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$240 < I_{BAT} < 260$	0	1	0	0	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	1
	Час розгону, t_p , с	$t_p < 10,5$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$3400 < R_X < 3700$	0	1	1	1	0
Тяговий режим з навантаженням	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $315 < I_i < 340$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$270 < I_{BAT} < 290$	0	1	0	0	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 345$	0	0	0	0	1
	Час розгону, t_p , с	$t_p < 13,8$	0	1	1	1	0
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$3900 < R_X < 4200$	0	1	1	1	0
Рух з постійною швидкістю	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $80 < I_i < 105$	0	1	1	1	0
	Сила струму від тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	1	0	1	1
	Сила тяги на ведучих колесах, R_X , Н	$340 < R_X < 500$	0	1	1	1	0
Рекуперативне гальмування	Сила фазних струмів, I_A, I_B, I_C , А	$I_A = I_B = I_C$ $65 < I_i < 80$	0	0	0	0	0
	Сила струму до тягової високовольтної батареї, I_{BAT} , А	$50 < I_{BAT} < 60$	0	0	0	1	1
	Напруга тягової високовольтної батареї U_{BAT} , В	$U_{BAT} > 350$	0	0	0	0	0
	Сила рекуперативного гальмування, R_X , Н	$R_X > 1680$	0	1	0	0	0
Вільний вибіг	Сила, що витрачається на обертання трансмісії, R_X , Н	$R_X < 245$	0	0	1	0	0
	Час вибігу, t_e , с	$t_e > 17$	0	0	1	0	0

Алгоритм діагностування силового приводу електромобіля



Тестові режими:

- Розгін
- Рух із постійною швидкістю під навантаженням
- Вибіг
- Режим рекуперації енергії

Висновки

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було вирішено питання удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів при виконанні діагностичних робіт на стенді з біговими барабанами.

1. В першому розділі проведений аналіз методів контролю технічного стану агрегатів автомобілів з електричним силовим приводом. Встановлено, що багато існуючих методів контролю не дозволяють в повній мірі оцінити технічний стан силових приводів електромобілів. Стендовий методом діагностування потребує удосконалення з метою адаптації до процесів функціонування автомобілів з електричним силовим приводом на стендах з біговими барабанами.

2. Аналіз структури і стану ВТБ СТОА «Master Service Electro» м. Київ дозволив встановити, що наявна ВТБ є в цілому здатна виконувати поставлені задачі, а отже вдосконалення ефективності роботи можливе за рахунок вдосконалення процесів діагностування, зокрема діагностування силового приводу електромобілів.

3. Сформовано математичну модель та розроблена структурна схема процесу моделювання функціонування електромобіля при контролі технічного стану агрегатів електричного силового приводу на стендах з біговими барабанами. Модель дозволяє виявляти залежності діагностичних параметрів та показників тягово-динамічних властивостей електромобілів від параметрів технічного стану їх агрегатів та систем у стендових умовах.

4. В процесі комп'ютерного моделювання процесу функціонування електромобіля на стенді з біговими барабанами при зміні параметрів його технічного стану виявлені залежності діагностичних параметрів та показників, що характеризують тягово-швидкісні властивості електромобілів від параметрів технічного стану їх агрегатів та систем.

5. Обґрунтовано вимоги та розроблено принципову схему гібридного повноопорного стенду з біговими барабанами, який дозволяє задавати тестові режими, що відповідають типовим режимам функціонування електромобілів, а також визначати діагностичні параметри.

6. Розроблена методика діагностування агрегатів електричного силового приводу автомобілів, яка дозволяє виконувати діагностику та кількісний контроль технічного стану агрегатів електричного силового приводу при функціонуванні автомобілів на стендах з біговими барабанами.

7. Запропонована методика дозволяє на 15–20 % знизити тривалість діагностування та на 15–30 % час перебування автомобіля у СТО. Розрахунки впровадження даної методики на СТОА «Master Service Electro» дозволяють скоротити витрати на діагностування і ремонт електромобілів, а термін окупності становить 5,1 років.

Додаток Б
(обов'язковий)

**Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових
запозичень**



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Удосконалення процесу діагностування силового приводу електромобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів «Master Service Electro» місто Київ

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 25,8 %

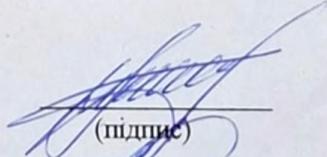
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

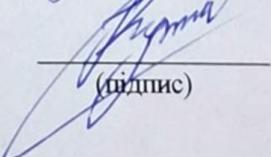
Цимбал С.В., завідувач кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

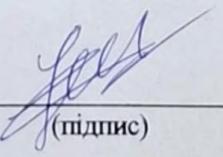

(підпис)

Кужель В.П., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

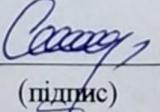
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Цимбал О.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

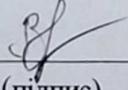
Керівник


(підпис)

Смирнов Є.В., доцент кафедри АТМ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Васильковський Р.О.

(прізвище, ініціали)