

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ  
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРОБКА ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ  
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

**Здобувач:**

Антон ЦАЦОРІН  
гр. ЕТ 2022-1

**Керівник:**

Микола ХВОРОСТ  
проф., д.т.н.

Харків

2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної  
інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ



Завідувач кафедри ЕТ

Микола ХВОРОСТ

16 червня 2026 р.

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

**Цацорін Антон Михайлович**

---

1. Тема роботи: **Розробка тягового асинхронного електроприводу  
електромобіля**

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи .....**Хворост М.В., д.т.н. проф**

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

затверджені наказом університету від 22.05.2026 р. № 440-03

2. Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи  
20.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської роботи Матеріали переддипломної практики,  
статистичні дані по надійності та відмовам транспортних засобів, літературні джерела  
по експлуатації, обслуговуванню та ремонту електричного обладнання.

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

4.1. Аналіз тягового електроприводу сучасних автомобілей

4.2. Аналіз основних несправностей асинхронних двигунів





4.3 Розробка концепсії діагностування несправностями асинхронного двигуна

4.4. Охорона праці.

## 5. Перелік графічного матеріалу

Результати аналізу допоміжних систем транспортних засобів, конструкція та результати дослідження тягового електропривода з асинхронним електродвигуном.

## 6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

Розділ	Ім'я Прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Микола ХВОРОСТ проф.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	В'ячеслав ШАВКУН, доц.		

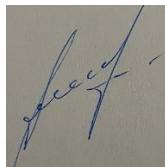
7. Дата видачі завдання

16.04.2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

п/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання	23.05 – 29.05.2026	
2	Розробка технічного завдання	30.05 – 05.06.2026	
3	Розрахункова частина	06.06 – 12.06.2026	
4	Охорона праці	06.06 – 12.06.2026	
5	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	06.06 – 12.06.2026	
6	Підготовка доповіді та презентації	12.06 – 20.06.2026	

Здобувач



Антон ЦАЦОРИН

Керівник бакалаврської  
кваліфікаційної роботи



Микола ХВОРОСТ

## РЕФЕРАТ

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** асинхронний тяговий двигун, діагностика, електропривод, моделювання.

В бакалаврській роботі на тему «Розробка тягового асинхронного електроприводу електромобіля» проведено розрахунок та дослідження асинхронного тягового електроприводу електромобіля.

Тяговий електропривод є визначальною підсистемою сучасного електромобіля. На основі аналізу різних типів встановлено, що найкраще поєднання ККД, маси, моменту та вартості забезпечує синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) з векторним керуванням. Асинхронний двигун є добрим компромісом для бюджетних моделей, а вентильно-індукторний – має нішеве застосування. Розроблені методи діагностування (аналіз струму, вібрації, термографії, вимірювання ізоляції) дозволяють своєчасно виявляти до 90% дефектів. Виконані розрахунки підтвердили, що для легкового електромобіля масою 1500 кг достатньо двигуна піковою потужністю 130 кВт та моментом 300-400 Н·м при передавальному числі 10. Подальший розвиток галузі пов'язаний із безмагнітними двигунами змінного струму з високим ККД, а також із інтеграцією інвертора безпосередньо в корпус двигуна для зменшення маси та вартості.

Була розроблена структурна схема комплексної системи прогнозування несправностей асинхронного електродвигуна, що включає три методи діагностики: температурної, струмової і вібраційної.

В роботі розглянуто питання Охорони праці.

Бакалаврська робота містить: 55с. пояснювальної записки, 6 рис., 8 табл.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. Тяговий електропривод сучасних автомобілей.....	9
1.1 Аналіз різноманітних систем тягових електроприводів автомобілей.....	9
1.2 Аналіз тягових електроприводів які використовуються на транспортних засобах міського електротранспорту.....	13
1.3 Особливості експлуатації різних типів електроприводів, які використовуються на міському електротранспорті.....	15
2. Аналіз основних несправностей асинхронних двигунів.....	19
2.1 Ушкодження підшипників та їх причини .....	21
2.2 Електричні пошкодження елементів статора .....	28
3. Розробка концепсії діагностування несправностями асинхронного двигуна.....	32
3.1 Створення структурної схеми системи прогнозування.....	33
3.2 Алгоритм роботи системи прогнозування несправностей .....	34
3.3 Моделювання системи прогнозування несправностей асинхронного електродвигуна.....	37
3.4 Прогнозування несправностей за струмовими характеристиками.....	39
4. Охорона праці.....	41
4.1 Аналіз нормативно-правової бази.....	41
4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів.....	42
4.3 Розробка організаційних та технічних заходів безпеки в авторемонтній майстерні.....	43
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49

## ВСТУП

У сучасному світі спостерігається складна економічна ситуація. Збільшення логістичного плеча через політичні та економічні виклики, що тривають, спричиняє значне здорожчання обладнання та виробничих процесів. Це змушує шукати нові способи оптимізації витрат, одним із яких є підвищення ефективності використання наявного обладнання.

Такий підхід сприяє суттєвому зменшенню витрат на оновлення техніки, оскільки своєчасний ремонт обходиться значно дешевше й дозволяє суттєво продовжити термін експлуатації устаткування. Згідно з численними дослідженнями, одними з найбільших споживачів електроенергії є електроприводи, і зокрема асинхронні електродвигуни, які займають провідне місце серед них.

Вони вирізняються простотою обслуговування, високою зносостійкістю, ефективним коефіцієнтом корисної дії та іншими характеристиками, які зробили їх надзвичайно популярними. Надійність та тривалий експлуатаційний ресурс таких двигунів наочно підтверджується даними, представленими на діаграмі у рисунку 1. На ній подано статистику розподілу асинхронних електродвигунів, відповідно до року їхнього виробництва. Діаграма створена на основі інформації, зібраної в 2026 році. Згідно з цими даними, можна зробити висновок, що 52% досліджених асинхронних електродвигунів із потужністю у межах від 50 до 160 кВт та робочою напругою не більше 660 В наразі використовуються в активному виробництві понад 40 років. У окремих випадках, що складають 2%, тривалість експлуатації перевищує навіть цей строк, демонструючи виняткову надійність такого типу пристроїв.

Можливість тривалого функціонування асинхронних електродвигунів часто пояснюється якісним плановим попереджувальним обслуговуванням (ППО). Проте існують підприємства, де реалізація таких заходів або суттєво ускладнена, або нездійсненна через специфіку технологічних процесів. Як приклад можна навести підприємства хімічної промисловості з безперервним виробничим

циклом. У таких організаціях ППО зазвичай планується заздалегідь на визначені часові інтервали, причому для його виконання виділяється конкретний час. Однак це рішення має свої недоліки, зокрема обмеження у гнучкості планування.

Крім того, під час експлуатації електродвигунів на етапі катастрофічного старіння ризик їхнього виходу з ладу значно зростає. Незважаючи на регулярні огляди обладнання на подібних об'єктах, багато дефектів залишаються невиявленими, що створює додаткові виклики для забезпечення надійності роботи. Для вирішення цієї проблеми були розроблені спеціалізовані методики діагностики стану асинхронних електродвигунів.

У наведеній роботі подано огляд загальних підходів до діагностики асинхронних двигунів (АД), а також обґрунтовано необхідність впровадження нових методів для покращення їхньої діагностики та прогнозування несправностей.

Серед розглянутих методів виділяються наступні:

- діагностика АД за середньоквадратичним значенням вібросигналу (СКЗ);
- вібраційна діагностика за фазовими портретами (траєкторії коливань);
- спектральний аналіз;
- спектральний аналіз огибаючої;
- кепстральний аналіз;
- ультразвукова дефектоскопія та акустична діагностика;
- застосування спеціалізованих діагностичних параметрів;
- вейвлет-аналіз; – статистичні методи обробки вібраційних сигналів;
- діагностика із застосуванням технологій штучних нейронних мереж.

Частина із зазначених методів має обмежене практичне застосування, що зумовлено технічною складністю їх реалізації, економічною недоцільністю або високою похибкою. Втім, деякі з цих методів, такі як вібраційна діагностика та спектральний аналіз, вже використовуються на певних підприємствах. Наразі існуючі підходи до діагностики електродвигунів не забезпечують повного контролю обладнання в умовах експлуатації. Це призводить до того, що ефективне зниження витрат, пов'язаних із зупинкою або виходом з ладу двигунів,

залишається недосяжним, підкреслюючи актуальність розробки нових методик або адаптацію маловикористовуваних підходів до існуючих потреб.

Враховуючи зазначені дані, метою цього дослідження є збільшення тривалості використання та надійності ресурсів асинхронних електродвигунів. Для вирішення цієї науково-практичної проблеми пропонується створення інтегрованої системи діагностики несправностей, що буде базуватися на оптимальному поєднанні найбільш ефективних сучасних методів діагностики. Основна ідея запропонованої методики полягає у формуванні інтегрованого підходу, який дозволить створити повноцінну систему прогнозування несправностей асинхронних електродвигунів. За умови досягнення балансу ефективності різних діагностичних методик можливе підвищення точності прогнозування несправностей. Це також сприятиме забезпеченню конкурентоспроможності запропонованої системи на ринку рішень для діагностики електродвигунів.

Основними завданнями даного дослідження стануть:

1. Аналіз типових несправностей асинхронних електродвигунів з вивченням причин їх виникнення та специфіки прояву.
2. Огляд існуючих методів діагностики, з визначенням їх переваг і недоліків.
3. Розробка концептуальної логічної схеми функціонування інтегрованої системи прогнозування.
4. Формулювання критеріїв, необхідних для ефективної роботи запропонованої системи.
5. Побудова структурної схеми системи прогнозування на основі інтегрованого підходу до виявлення та подальшого запобігання відмовам електродвигунів.

## 1 ТЯГОВИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД СУЧАСНИХ АВТОМОБІЛІВ

Тяговий електропривод є ключовим компонентом електромобілів, гібридних автомобілів та електробусів. Він перетворює електричну енергію акумуляторної батареї (або іншого джерела) в механічну енергію обертання коліс, забезпечуючи розгін, рух зі сталою швидкістю, рекуперативне гальмування та рух заднім ходом. Сучасні вимоги до тягового приводу: високий ККД (95% і більше), великий пусковий момент, широкий діапазон регулювання швидкості, мінімальна маса та габарити, надійність і безпека. В даному розділі проведемо аналіз різних типів тягових електроприводів, порівняємо їх переваги та недоліки, опишемо методи діагностування, наведемо електромеханічні характеристики, виконаємо розрахунки та підготуємо ілюстративний матеріал.

### 1.1 Аналіз різноманітних систем тягових електроприводів

Тяговий електропривод складається з трьох основних частин: електричного двигуна (тягового), системи керування (інвертор/контролер) і механічної передачі (редуктор, іноді безпосередній привід – мотор-колесо). За типом двигуна розрізняють наступні системи:

1. **Електропривод постійного струму з колекторним двигуном** – історично перший тип для електрокарів та деяких ранніх електромобілів. Використовується двигун паралельного, послідовного або змішаного збудження. Регулювання швидкості – зміною напруги (широкоімпульсна модуляція) або послабленням поля.

2. **Асинхронний електропривод з короткозамкненим ротором** – найпоширеніший у першому поколінні сучасних електромобілів (наприклад, Tesla Roadster, Nissan Leaf до 2018 р.). Живлення від трифазного інвертора з векторним керуванням (FOC – Field Oriented Control) або прямим керуванням моментом (DTC).

3. **Синхронний електропривод з постійними магнітами (PMSM)** – домінує в сучасних електромобілях (Tesla Model 3, BMW i3, Chevrolet Bolt).

Ротор містить рідкоземельні магніти (неодим-залізо-бор). Керування – датчикове або бездатчикове векторне.

4. **Вентильно-індукторний електропривод (SRM)** – без магнітів, ротор з шихтованої сталі без обмоток. Створює момент за рахунок зміни індуктивності. Застосовується рідко (деякі вантажівки, військова техніка) через підвищену пульсацію моменту та шум.

5. **Мотор-колесо (Hub motor)** – двигун (зазвичай PMSM або SRM) вбудований безпосередньо в колесо, без механічної передачі. Забезпечує незалежне керування кожним колесом.

Окрім типу двигуна, системи відрізняються за напругою живлення (від 48 В у мікробілях до 800 В у високовольтних електромобілях) та за способом охолодження (повітряне, рідинне, масляне).

### **Аналіз переваг та недоліків різних типів тягових електроприводів**

У таблиці 1.1 зведено порівняння чотирьох основних типів тягових приводів, що реально застосовуються в сучасних автомобілях (колекторні двигуни постійного струму залишилися лише в дешевій техніці або в гібридах минулих поколінь, тому для сучасності їх не розглядаємо).

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки тягових електроприводів

Тип приводу	Переваги	Недоліки
<b>Асинхронний (АС ІМ)</b>	Відсутність магнітів – низька вартість, надійність, технологічність; простота ротора (короткозамкнений); стійкість до перевантажень; хороше охолодження	Менший ККД (90-94%) проти PMSM; більший розмір та маса при однаковій потужності; вищі втрати в роторі, що потребують охолодження; складне векторне керування
<b>Синхронний з постійними магнітами (PMSM)</b>	Найвищий ККД (95-97%), висока питома потужність (до 5 кВт/кг), компактність, точне регулювання моменту, здатність працювати на високих частотах обертання (до 20000 об/хв)	Вартість рідкоземельних магнітів, ризик розмагнічування при перегріві (>150°C) або при струмах розмагнічування; складне виготовлення ротора; при несправності інвертора – неможливість вільного обертання (генерація ЕРС)
<b>Вентильно-індукторний (SRM)</b>	Найдешевший (немає магнітів, ротор без обмоток), робоча температура до 300°C, висока надійність, великий пусковий момент	Високий рівень шуму та вібрацій (зубцеві пульсації), значні пульсації моменту (20-30%), потребує складного контролера зі зворотним зв'язком за струмом та положенням, гірша масо-габаритна характеристика
<b>Мотор-колесо (Hub PMSM або SRM)</b>	Максимальне спрощення трансмісії (ККД передачі близький до 1), незалежне керування моментами на кожному колесі (регулювання стійкості, вектор тяги), велике місце в салоні	Збільшення невіднесених мас (погіршення комфорту та керованості), складність ущільнення та охолодження, високі вимоги до герметизації, труднощі з гальмівними механізмами

З аналізу можна зробити висновок, що на сьогодні для серійних легкових електромобілів найбільш збалансованим є **синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM)** з рідинним охолодженням. Асинхронні двигуни залишаються на другому електромобілі Tesla Model S (передня вісь – асинхронна,

задня – PMSM через кращу ефективність). Мотор-колеса поки що не набули поширення через технічні проблеми, хоча є перспективними для міських електровелосипедів та деяких вантажних платформ.

Для оцінки придатності двигуна до роботи в автомобілі використовують механічні (залежність моменту  $M$  від частоти обертання  $n$ ) та регулювальні (залежність ККД, потужності від  $n$ ) характеристики.

На механічній характеристиці в координатах  $M = f(n)$  (момент, Н·м – частота, об/хв) показується дві зони: зона постійного моменту (від 0 до базової частоти  $n_{\text{баз}} \approx 3000\text{-}5000$  об/хв) та зона послаблення поля (постійної потужності) до максимальної частоти (12000-20000 об/хв). Для PMSM момент у зоні послаблення поля знижується гіперболічно ( $M \sim 1/n$ ), для асинхронного – дещо пологіше завдяки ковзання. Також приводять криву потужності  $P = M \cdot \omega$ , яка зростає лінійно в першій зоні і залишається майже постійною в другій. Для мотор-колеса базова частота нижча (до 1500 об/хв), тому що колесо обертається повільніше.

Таблиця 2.2 – Порівняльні параметри сучасних тягових двигунів (значення для двигунів потужністю 100 кВт)

Параметр	Асинхронний (Tesla S, передній)	PMSM (Tesla M3, задній)	SRM (дослідний)
Номінальна потужність, кВт	100	100	100
Максимальний крутний момент, Н·м	280	350	320
Базові оберти, об/хв	6000	4500	5000
Максимальні оберти, об/хв	18000	19000	14000
ККД при 20% навантаженні	82%	90%	78%
ККД при 80% навантаженні	94%	96,5%	92%
Питома маса, кг/кВт	1,3	0,9	1,1
Рівень шуму, дБА на 3000 об/хв	72	68	85
Вартість (відносна)	0,7	1,0	0,5

## 1.2 Методи діагностування тягових електроприводів

Діагностування тягового електропривода необхідне для підтримки безпеки, попередження раптових відмов та збільшення терміну служби. Розрізняють діагностування в процесі експлуатації (бортове) та періодичне на СТО. До основних методів відноситься:

1. Вимірювання опору ізоляції обмоток статора та ротора (для асинхронних) або статора (для PMSM). Згідно з вимогами, опір ізоляції між обмотками та корпусом має бути не менше 10 МОм для системи напругою до 600 В. Падіння нижче 0,5 МОм свідчить про зволоження або деградацію ізоляції. Вимірювання проводять мегаомметром на 1000 В.

2. Аналіз струму статора (метод MCSA – Motor Current Signature Analysis). За допомогою струмових кліщів і осцилографа реєструють спектр струму однієї фази. Поява бічних частот біля основної частоти (наприклад, 50 Гц  $\pm$  частота обертання ротора) вказує на пошкодження стрижнів ротора або короткозамкненого кільця. Для PMSM аналізують струм демпфуючої обмотки (якщо є).

3. Термографія – інфрачервона зйомка інвертора, двигуна, кабельних з'єднань. Перегрів понад 90°C на корпусі двигуна при номінальному навантаженні вказує на несправність системи охолодження або підвищені втрати (наприклад, замикання між листами сталі).

4. Вібродіагностика – аналіз спектру вібрації на корпусі двигуна. Характерні частоти: дисбаланс ротора (частота обертання), дефект підшипників (ковзання, сепаратора, тіл кочення), зубцеві гармоніки (для SRM – дуже виражені). Норми вібрації для тягових двигунів за ISO 10816-3: не більше 2,8 мм/с (RMS) для класу II.

5. Параметричне тестування з використанням бортової діагностики OBD-II. Сучасні електромобілі передають через CAN-шину значення струму, напруги, температури двигуна, частоти обертання, моменту, кодів несправностей (DTC). Сканер (наприклад, з програмним забезпеченням для Tesla, Nissan Leaf) дозволяє

виявити: асиметрію фазних струмів, перевищення допустимої температури магнітів (моделюється), несправності датчика положення ротора (резольвера).

6. Діагностування ізоляції обмоток високовольтною напругою (тест напругою). Проводиться на спеціальних стендах для виявлення міжвиткових замикань (наприклад, вимірювання коефіцієнта несиметрії індуктивності фаз). Для PMSM – додатково перевірка відсутності замикання між обмоткою та масою.

7. Метод відновлення проти-ЕРС для бездатчикового керування (лише для PMSM). У режимі вибігу при відключеному інверторі вимірюють напругу на виводах двигуна; за її формою оцінюють стан магнітів та відсутність міжвиткових замикань.

Перелік основних несправностей тягових приводів та методи їх усунення

Таблиця 1.3 – Типові несправності тягових електроприводів

Несправність 1	Можливі причини 2	Методи усунення 3
Двигун не обертається, хоча інвертор працює	Обрив фази (пошкодження кабелю або контакту), згорів IGBT-модуль, несправний датчик Холла (резольвер)	Перевірити цілісність фазних проводів та контактів, замінити IGBT-модуль, відкалібрувати або замінити датчик положення
Сильна вібрація при розгоні	Знос підшипників, дисбаланс ротора, пошкодження магнітів (PMSM)	Замінити підшипники, відбалансувати ротор, перевірити магніти (за необхідності – перемагнічування або заміна ротора)
Перегрів двигуна при нормальному навантаженні	Забитий радіатор системи охолодження, несправність насоса ОЖ, внутрішнє замикання в обмотках (збільшення струму холостого ходу)	Промити радіатор, замінити помпу, виконати тест обмоток мегаомметром – при замиканні двигун замінити
Зниження максимального моменту (електромобіль став млявим)	Часткове розмагнічування магнітів (PMSM) через перегрів або струмові кидки, зменшення напруги акумулятора, помилки керування інвертором	Діагностика струму та ЕРС, за можливості – перемагнічування в спеціальному стенді, оновлення ПЗ контролера

Продовження табл. 1.3

1	2	3
Підвищений шум (свист, дзвін) на ходу	Пульсації моменту через несправність резольвера, високочастотна ШІМ інвертора (частота менше 8 кГц), зубцеві гармоніки (для SRM)	Калібрування датчика положення, збільшення частоти ШІМ до 10-12 кГц (програмно), для SRM – застосування профілю комутації з меншими пульсаціями
Двигун не гальмує рекуперативно	Несправний контактор або запобіжник в ланцюзі постійного струму, несправність системи керування, низький SOC батареї (захист від перезаряду)	Перевірити контактори, діагностувати інвертор, зарядити батарею або відключити функцію рекуперації (якщо причина не в ній)

1.3 Розрахунок характеристик тягового електропривода для легкового електромобіля в різних режимах

Проведемо вибір та перевірку тягового електродвигуна для компактного електромобіля.

Початкові дані:

- маса автомобіля з акумулятором  $m = 1500$  кг;
- максимальна швидкість  $v_{\max} = 140$  км/год (38,9 м/с);
- максимальний підйом  $\alpha = 15\%$  ( $\approx 8,5^\circ$ );
- прискорення 0-100 км/год за 10 с;
- коефіцієнт опору коченню  $f = 0,015$ ;
- коефіцієнт аеродинамічного опору  $c_x = 0,3$ ;
- лобова площа  $A = 2,2$  м<sup>2</sup>;
- густина повітря  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>;
- ККД трансмісії  $\eta_{\text{тр}} = 0,96$ ;
- радіус кочення колеса  $r = 0,3$  м.

**1. Розрахунок потужності** для руху з максимальною швидкістю (горизонтальна дорога):

Сила опору коченню:

$$F_f = f \cdot m \cdot g = 0,015 \cdot 1500 \cdot 9,81 = 220,7 \text{ Н.}$$

Сила аеродинамічного опору:

$$F_w = 0,5 \cdot c_x \cdot A \cdot \rho \cdot v_{\max}^2 = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 1,225 \cdot (38,9)^2 = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 1,225 \cdot 1513 \approx 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 1855 \approx 0,5 \cdot 0,3 \cdot 4081 \approx 612 \text{ Н.}$$

Сумарна сила:

$$F_{\max} = 220,7 + 612 = 832,7 \text{ Н.}$$

Потужність на колесах:

$$P_{\text{кол}} = F_{\max} \cdot v_{\max} = 832,7 \cdot 38,9 \approx 32400 \text{ Вт} = 32,4 \text{ кВт.}$$

Потужність на валу двигуна:

$$P_{\text{дв}} = P_{\text{кол}} / \eta_{\text{тр}} = 32,4 / 0,96 \approx 33,75 \text{ кВт.}$$

**2. Розрахунок потужності** для подолання максимального підйому (при швидкості **20 км/год  $\approx$  5,56 м/с**):

Складова сили тяжіння:

$$F_{\pi} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 1500 \cdot 9,81 \cdot \sin(8,5^\circ) \approx 1500 \cdot 9,81 \cdot 0,148 \approx 2178 \text{ Н.}$$

Сила кочення:

$$F_f = 220,7 \text{ Н.}$$

Аеродинамічний опір при малій швидкості нехтовно малий (близько 7 Н) внаслідок цього сумарна сила

$$F = 2178 + 220,7 \approx 2399 \text{ Н.}$$

Потужність на колесах:

$$P_{\text{кол}} = 2399 \cdot 5,56 \approx 13340 \text{ Вт} = 13,34 \text{ кВт.}$$

Потужність двигуна:  $P_{\text{дв}} = 13,34 / 0,96 \approx 13,9 \text{ кВт.}$

Бачимо, що критичним є розгін, а не підйом.

### 3. Розрахунок моменту для розгону (0-100 км/год за 10 с).

Приймаємо середнє прискорення:

$$a = (27,78 \text{ м/с} - 0)/10 = 2,778 \text{ м/с}^2.$$

Сила інерції:

$$F_{\text{ін}} = m \cdot a = 1500 \cdot 2,778 = 4167 \text{ Н.}$$

Сили опору при розгоні до 27,78 м/с (середня швидкість  $\approx 13,9$  м/с):

$$F_f = 220,7 \text{ Н;}$$

$$F_{w(\text{серед})} = 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 1,225 \cdot (13,9)^2 \approx 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 1,225 \cdot 193 \approx 0,5 \cdot 0,3 \cdot 2,2 \cdot 236,5 \approx 78 \text{ Н.}$$

Сумарна сила:  $4167 + 220,7 + 78 = 4465,7 \text{ Н.}$

Потужність на колесах при максимальній швидкості розгону (27,78 м/с):

$$P_{\text{кол}} = 4465,7 \cdot 27,78 \approx 124 \text{ кВт.}$$

Максимальна потужність двигуна (з запасом 20%):

$$P_{\text{дв\_max}} = 124/0,96 \approx 129 \text{ кВт.}$$

Отже, обираємо двигун номінальною потужністю 100-110 кВт, але з піковою перевантажувальною здатністю не менше 130 кВт (тягові двигуни допускають 2-3-кратне перевантаження за струмом на короткий час).

### 4. Визначення максимального крутного моменту тягового двигуна.

На колесі при старті ( $v \approx 0$ ) сила тяги обмежена зчепленням (коефіцієнт зчеплення  $\mu = 0,7$  для сухого асфальту):

$$F_{\text{зч}} = \mu \cdot m \cdot g = 0,7 \cdot 1500 \cdot 9,81 = 10300 \text{ Н.}$$

Момент на колесі:

$$M_{\text{кол}} = F_{\text{зч}} \cdot r = 10300 \cdot 0,3 = 3090 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Передавальне число редуктора і обираємо так, щоб на валу двигуна отримати момент у межах 250-400 Н·м (типово для PMSM).

$$\text{Якщо } i = 10, \text{ то } M_{\text{дв}} = 3090/10 = 309 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Приймаємо двигун з номінальним моментом 280 Н·м та максимальним (піковим) 400 Н·м.

Швидкість обертання колеса на  $v_{\text{max}}$ :

$$n_{\text{кол}} = v_{\text{max}} / (2\pi r) = 38,9 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,3) \approx 38,9 / 1,884 \approx 20,65 \text{ об/с} = 1239 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання двигуна на  $v_{\text{max}}$ :

$$n_{\text{дв}} = i \cdot n_{\text{кол}} = 10 \cdot 1239 = 12390 \text{ об/хв} - \text{допустимо для сучасного}$$

PMSM (максимум 19000 об/хв).

Таблиця 1.4 – Результати розрахунку параметрів тягового двигуна

Параметр	Значення
Маса автомобіля, кг	1500
Максимальна швидкість, км/год	140
Необхідна потужність на валу (горизонталь), кВт	34
Необхідна пікова потужність (розгін), кВт	129
Максимальний момент двигуна (розрахунковий), Н·м	309
Передавальне число редуктора	10
Макс. частота обертання двигуна, об/хв	12390

На основі проведеного аналізу та розрахунків можна рекомендувати для різних типів електромобілей тягові електропривода:

– Для малолітражних міських електромобілів (до 60 кВт) – PMSM або асинхронний з високим ККД; пріоритет – низька вартість та простота обслуговування.

– Для спортивних та преміальних електромобілів (понад 150 кВт) – PMSM з рідинним охолодженням і вбудованим редуктором для досягнення високих обертів (20000 об/хв).

– Для вантажних електромобілів та автобусів – часто використовують два двигуни (асинхронні через їх дешевизну та надійність) або центральний двигун з роздавальною коробкою.

– Для важкої спецтехніки, що працює в пилу, високих температурах – перспективний вентильно-індукторний привод (SRM) через відсутність магнітів і стійкість до перегріву.

## 2. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

За результатами статистичних досліджень, заснованих на відкритих даних комерційних організацій, асинхронні електродвигуни (АД) на різноманітних промислових і господарських підприємствах споживають від 70 до 80% загальної споживаної потужності. Найбільш розповсюдженим є асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, відомий також як "біліче колесо". Хоча існують підприємства важкої металургії, де основним споживачем електроенергії виступають плавильні печі, даний тип електродвигуна залишається пріоритетним вибором великих промислових організацій.

Асинхронні електродвигуни характеризуються високою надійністю і простотою обслуговування. Це особливо актуально для моделей з короткозамкненим ротором. На відміну від електродвигунів постійного струму, асинхронні двигуни вимагають мінімального технічного обслуговування через меншу кількість рухомих деталей, які зазвичай швидше виходять з ладу.

Основною складовою електродвигуна постійного струму, що підпадає під цю категорію, є колекторно-щітковий механізм. Напруга в обмотки статора асинхронних машин подається безпосередньо, без контактів, що труться. Це властивість дозволяє широко використовувати асинхронні двигуни в різноманітних умовах і галузях промисловості, включаючи побутове застосування.

За даними діаграми розподілу асинхронних електродвигунів за датою виготовлення (рисунок 1), понад 20 % двигунів, випущених понад 50 років тому, все ще перебувають в експлуатації. Втім, як і будь-який механічний пристрій, асинхронні електродвигуни можуть зазнавати пошкоджень внаслідок тривалої експлуатації.

Основними причинами несправностей на сьогодні є:

- перевантаження чи перегрів статора (31%),
- міжвиткове замикання (15%),

- пошкодження підшипників (12%),
- ушкодження обмоток статора чи ізоляції (11%),
- нерівномірний повітряний зазор між статором та ротором (9%),
- робота на двох фазах (8%),
- обрив або ослаблення кріплення стрижнів у короткозамкненому роторі (5%),
- ослаблення кріплення обмоток статора (4%),
- дисбаланс ротора (3%) та неспіввісність валів (2%).

Варто зазначити, що розподіл частоти несправностей може варіюватися залежно від джерела. Дані з чотирьох різних джерел наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Узагальнення зібраних із різних джерел відомостей про дефекти двигунів (асинхронних), які найчастіше зустрічаються

Найменування дефекту двигунів (асинхронних)	Нижче наведені зібрані дані				
Поломки електричної природи нерухомої обмотки, що створює закручене магнітне поле. (статор)	84-86%	37-39%	35-37%	20-22%	43-45%
Вихід із ладу компонентів, що забезпечують обертання валу з найменшим опором	4-6%	39-41%	39-41%	68-70%	25-27%
Поломки обертання елемента, розташованого на валу. (Ротор)	4-6%	9-11%	11-13%	6-8%	7-9%
Інші, куди менше поширені дефекти двигунів (асинхронних)	4-6%	12	12	2-4%	21-23%

З наведених даних випливає, що найбільш поширені електричні пошкодження та знос елементів підшипників.

Розглянемо їх уважніше.

## 2.1 Ушкодження підшипників та їх причини

Одним із ключових елементів асинхронного електродвигуна є підшипники, тому їхні поломки становлять серйозну загрозу для безперебійного функціонування пристрою. Найуживанішими типами при цьому є радіально-упорні підшипники та закриті шарикопідшипники.

В асинхронних електродвигунах використовуються два основні типи підшипників: підшипники кочення та ковзання.

У даній роботі для детального розгляду обрано зокрема підшипники кочення, які є одними з найважливіших компонентів сучасних механізмів, включаючи електродвигуни. Їхня критична роль у забезпеченні працездатності визначає високі вимоги до їхньої надійності та довговічності. З огляду на це, дослідження підшипників перебуває у фокусі наукових і технічних розробок.

На сьогодні функціонує ціла науково-дослідницька галузь, яка спеціалізується на вивченні підшипників з точки зору теоретичних основ, практичних застосувань та технологічних особливостей. Наприклад, результати досліджень компанії SKF AB демонструють значний прогрес у цій сфері. Завдяки проведеним науковим роботам стало можливим прогнозування довговічності підшипників із надзвичайною точністю, що дозволяє узгодити термін служби підшипників із терміном експлуатації машини.

Однак у деяких випадках фактична довговічність підшипника виявляється нижчою за розрахункову. Це може бути спричинено низкою факторів: непередбаченим перевантаженням, недостатнім або неправильно підібраним мастилом, помилками монтажу, низькою ефективністю ущільнювачів, надмірним натягом при посадці підшипника або недостатнім внутрішнім проміжком. Кожна з цих проблем викликає характерні ушкодження, які можна діагностувати за допомогою аналізу пошкодженого компонента. У більшості випадків аналіз дефектів дає змогу встановити конкретну причину несправності та вжити заходів для запобігання подібним неполадкам у майбутньому, що сприяє підвищенню ефективності та безпеки експлуатації машин після їх ремонту.

У спрощеному вигляді основна думка полягає в тому, що підшипник не

здатний функціонувати тривалий час через природну зношуваність матеріалу, з якого він виготовлений. Під час його експлуатації накопичується втомне руйнування, що зумовлює фізичну неможливість подальшого використання деталі. Важливо враховувати, що підшипник є частиною механічного вузла з обертальним рухом, а швидкість накопичення дефектів залежить як від швидкості обертання (високої чи низької), так і від навантаження на деталь. Значення цих двох параметрів — швидкості і навантаження — відіграють ключову роль у процесі втомного руйнування. Якщо їхні значення виходять за межі допустимих норм, встановлених виробником, це спричиняє надмірну напругу на деталь і, відповідно, утворення мікротріщин у металі, з якого виготовлений підшипник. Спочатку ці тріщини незначні й дозволяють підшипнику продовжувати функціонувати. Проте з часом, у місцях найбільшого навантаження, кількість тріщин збільшується, що призводить до появи відшарувань металу.

Як видно з рисунку 2.1, наслідком такого процесу є фізична неспроможність використання підшипника за його прямим призначенням. Виникнення мікротріщин, описане вище, є першопричиною формування поверхневих дефектів. При перекочуванні деталей через ці мікротріщини відбувається їх часткове руйнування та відділення невеликих фрагментів матеріалу. Таким чином, підшипник стає непридатним для подальшої експлуатації.

У дослідженні SFT цей процес позначений як формування втомних раковин. Згодом він триває до досягнення стану повної непридатності підшипника до використання у роботі (рис. 2.1).

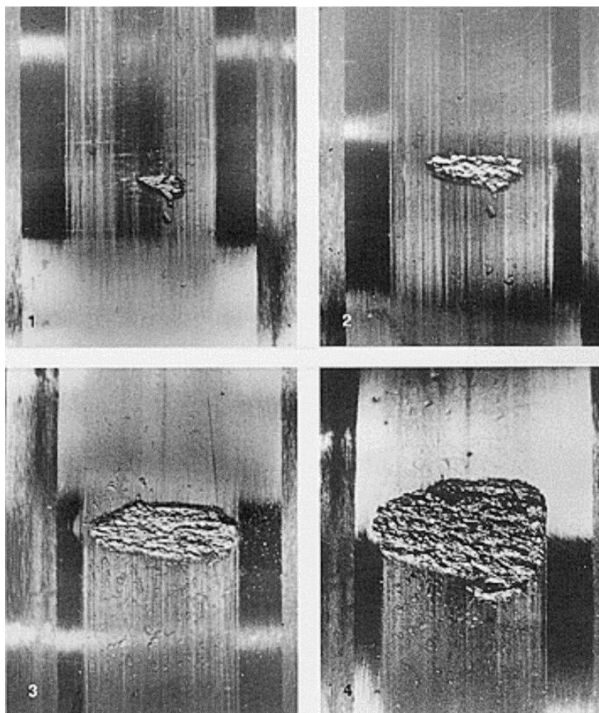


Рисунок 2.1 – Різні етапи появи несправності на поверхні, що трується підшипник, відшаровування металу з утворенням раковини (фото під збільшенням)

Як правило, цілком можна розрахувати час виникнення, описаного вище дефекту. Виробники, які спеціалізуються на виготовленні підшипників, зазвичай зазначають їх розрахунковий ресурс експлуатації. Зазначений ресурс базується на прогнозах роботи підшипника в режимі постійного навантаження, яке характеризується однаковою частотою обертання, рівномірним навантаженням на вал і стабільними силами, що протидіють обертанню.

Як ключовий показник довговічності використовується кількість обертів, які може здійснити підшипник за умови нормальної експлуатації. Варто зазначити, що виробники зазвичай вказують занижені величини ресурсу для того, щоб заміна підшипника здійснювалася до його повного виходу з ладу. Прогресування дефектів зазвичай відбувається поступово, що дає можливість завчасно виявити несправність. Це можна зробити за наявності специфічних шумів або нагрівання, яке стає помітним під час регулярного обстеження виробу.

Таким чином, у разі належного догляду та своєчасної діагностики можливо

виконати заміну підшипника до критичного стану. Під час огляду підшипника можна спостерігати матові смуги, спрямовані перпендикулярно до осі обертання. Ці смуги не впливають на довговічність пристрою і є наслідком особливостей процесу експлуатації. Їх виникнення обумовлено низкою факторів, серед яких можна виокремити якість мастильного матеріалу, наявність домішок у мастилі, швидкість обертання, а також рівень навантаження.

Аналіз стану підшипника після його розкриття дозволяє з високим ступенем точності оцінити умови його експлуатації. Зокрема, характер і розташування матових плям можуть виступати індикаторами робочих умов, що робить їх важливим фактором у контексті діагностування стану підшипника. Вивчаючи спостережувані зміни та їхні особливості, можна отримати додаткову інформацію щодо режиму роботи підшипника.

Кожен тип пошкоджень підшипника має характерний малюнок або схему руйнування. Первинні пошкодження нерідко призводять до вторинних дефектів, таких як втомні ушкодження поверхні (піттинг) чи утворення тріщин. Саме вони в багатьох випадках є безпосередньою причиною виходу підшипника з ладу. Водночас уже початкові пошкодження здатні істотно погіршити ефективність роботи пристрою.

Як приклад можна навести ситуацію, коли надмірний знос підшипника призводить до значного збільшення вібрації та підвищеного шуму під час роботи. Варто звернути увагу, що комбінація первинних і вторинних пошкоджень є досить поширеним явищем у випадках виходу підшипників з ладу.

За результатами дослідження види ушкоджень можна розподілити наступним чином:

Первинні ушкодження: знос; вм'ятини; задира.

Поверхневі руйнування: корозія; наслідки дії електричного струму; вторинні ушкодження; втомні раковини; тріщини.

Характеристики дефектів підшипників зведена таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 - Опис дефектів підшипників

№ п/п	Найменування дефекту	Опис
1	Вм'ятини	Дряпини на доріжках кочення та поверхнях тіл кочення можуть з'являтися у випадках, коли монтажні сили передаються на кільця через тіла кочення. Подібні дефекти також виникають у ситуаціях, коли на підшипникові вузли впливають надмірні навантаження за умови, що самі підшипники перебувають у стані спокою. Одним із чинників, що спричиняє утворення подряпин, є проникнення сторонніх частинок у внутрішню область підшипника.
2	Задири	Якщо дві поверхні, які недостатньо змащені, ковзають одна відносно одної під навантаженням, відбувається перенесення часток металу з однієї поверхні на іншу. Це явище називають агресією або задирками. У таких випадках поверхні набувають грубошерсткого вигляду. Коли відбувається значне тертя, матеріал підшипника нагрівається до температури, яка спричиняє зміну його властивостей, відому як опуск. Водночас виникає локальна концентрація напруги, яка може призводити до утворення тріщин і різноманітних дефектів, таких як раковини.
3	Зношування	За стандартних умов експлуатації роликові підшипники не зазнають суттєвого зношування. Проблеми можуть виникнути через потрапляння сторонніх часток у підшипник або недостатню кількість мастила. До зношування також може призводити вібрація нерухомого підшипника.

Розглядаючи механізми функціонування роликотпідшипників, можна відзначити, що процес тертя, зокрема тертя ковзання, відбувається переважно між периферійними сторонами роликів і буртами кілець. У цьому контексті важливо враховувати, що задирки можуть виникати як наслідок переходу так званих тіл кочення в області значного навантаження під час різких змін прискорення.

Переміщення кілець підшипників щодо шийок валів, посадкових отворів

корпусів і їх торцевих поверхонь також може стати причиною задирів у внутрішніх отворах внутрішніх кілець, а також на зовнішній поверхні зовнішніх кілець та їх торцях. У деяких випадках задираки можуть виникати через надмірну частоту обертання за недостатнього навантаження, що є особливо характерним для упорних шарикопідшипників.

До процесів руйнування також належать поверхневі пошкодження.

У разі занадто тонкого змащувального шару між доріжками і тілами кочення вершини мікронерівностей на їхніх поверхнях тимчасово контактують між собою. Унаслідок цього на поверхні утворюються маленькі тріщини, які згодом називають "поверхневими руйнуваннями". Такого роду тріщини слід відрізнити від тріщин втоми, котрі виникають у глибших шарах матеріалу й зазвичай призводять до втомного руйнування (лущення, піттингу).

Спочатку мікроскопічно малі поверхневі руйнування поступово поширюються, що ускладнює безперервне обертання підшипника.

На теперішній час регулярне та якісне змащування вважається найбільш ефективним методом підвищення надійності підшипників електродвигунів. Такі дії зазвичай проводяться під час планово-профілактичного обслуговування (ППО) електродвигуна. Своєчасний догляд за підшипниками знижує коефіцієнт тертя, збільшуючи експлуатаційний ресурс як самого підшипника, так і електродвигуна загалом.

Дефекти на поверхні підшипника часто спричиняють підвищену вібрацію, яка в умовах значного навантаження може пошкодити вал або спровокувати зіткнення ротора зі статором, що має серйозні наслідки. Проте навіть належне змащування лише затримує невідворотне погіршення стану підшипника.

З часом внутрішні мікротріщини накопичуються та накладаються одна на одну вздовж борозенок, що згодом призводить до утворення поверхневих сколів.

На швидкість виникнення таких дефектів теж впливають зовнішні чинники, зокрема температура, вологість повітря та атмосферний тиск.

Ці умови безпосередньо позначаються на властивостях мастильного матеріалу, змінюючи його ефективність.

Окремою проблемою є корозія.

Оскільки підшипники виготовляються з металу, вони природним чином схильні до корозійного впливу. Навіть використання високоякісного мастильного матеріалу не завжди гарантує повного захисту від утворення іржі. Корозія може бути спричинена проникненням мікрокрапель води або агресивних хімічних сполук, які потрапляють на поверхню підшипника з різних джерел.

Процес корозії поділяється на декілька основних типів.

Першим є фретинг-корозія, а другим — щілинна корозія.

Як видно з назв, перший вид носить поверхневий характер і зазвичай добре помітний навіть при швидкому візуальному огляді. Водночас щілинна корозія менш очевидна, але значно небезпечніша, оскільки призводить до руйнування матеріалу всередині його структури.

Ще одним видом пошкоджень є ураження від електричного струму.

Як випливає з назви, цей тип пошкоджень пов'язаний із впливом електричного струму, який може виникати під час короткого замикання обмотки статора на корпус або через зовнішні чинники. Існує також сценарій короткого замикання між ротором і статором, яке може спричинити передавання напруги на вал двигуна. Оскільки вал виконаний із суцільного металу, струм потрапляє на підшипник, викликаючи його пошкодження. Під впливом струму в місцях контакту металевих елементів починають з'являтися сліди оплавлення. За високої сили струму такі процеси можна порівняти з електрозварюванням, яке відбувається безпосередньо всередині підшипника. Як результат, на металі утворюється стоншення, а іноді навіть плавлення. В зонах оплавлення з'являються кратери або нарости.

Як зазначалося раніше, ураження підшипників струмом спричиняє деформацію доріжок кочення; схожі процеси відбуваються і в роликах. При цьому кульки змінюють колір і набувають темного відтінку.

Визначити різницю між ушкодженнями від електричного струму та тими, що спричинені вібрацією, буває непросто, але це можливо завдяки кільком характерним ознакам. Зокрема, у випадку електричного ураження на поверхні

виникають темні борозенки, тоді як пошкодження через вібрацію проявляються блискучими або іржавими слідами. Ще однією відмінністю можна вважати відсутність пошкоджень на тілі кочення підшипника, що є типовою ознакою так званого "хибного бринелінгу".

Уникнути руйнування підшипника через вплив електричного струму неможливо, якщо не усунути саму причину впливу. Це правило діє незалежно від того, чи йдеться про постійний струм, чи про змінний, оскільки навіть при його низькій силі все одно спостерігається поступове руйнування. Аналіз показує, що підшипники, які перебувають у русі, зазнають сильнішого ушкодження порівняно з тими, що залишаються нерухомими.

Крім того, на ступінь пошкодження ключовий вплив мають наступні фактори:

- швидкість обертання;
- навантаження на підшипник;
- сила струму;
- тип мастильного матеріалу.

## 2.2 Електричні пошкодження елементів статора

Статор — це нерухомий елемент електродвигуна, який зазвичай інтегрований з корпусом пристрою та має циліндричну форму. Його структура складається з численних сталевих пластин, покритих спеціальним ізоляційним лаком для мінімізації нагрівання через вихорові струми Фуко. На торцях статора розташовані посадкові місця для підшипників ковзання або кочення.

Однією з найпоширеніших причин виходу асинхронного двигуна з нормального робочого стану є електричні ушкодження статора. У таких випадках нерідко доводиться проводити детальний аналіз несправностей, виявлених при розбиранні агрегату, як показано на рис. 2.2.

Нижче представлено опис типових несправностей статора, їх ознаки, основні причини виникнення та можливі шляхи усунення. Наприклад, якщо при холостому ході активна сталь сердечника починає локально перегріватися навіть

за умови номінальної напруги в мережі живлення, то це часто свідчить про локальне замикання між сталевими листами сердечника. Така проблема може бути викликана механічним впливом — ударом ротора об статор, утворенням задирок, або пошкодженням зубців активної сталі через оплавлення чи згоряння внаслідок короткого замикання в обмотці.

Або в випадку несправності обмотки в корпусі електродвигуна.

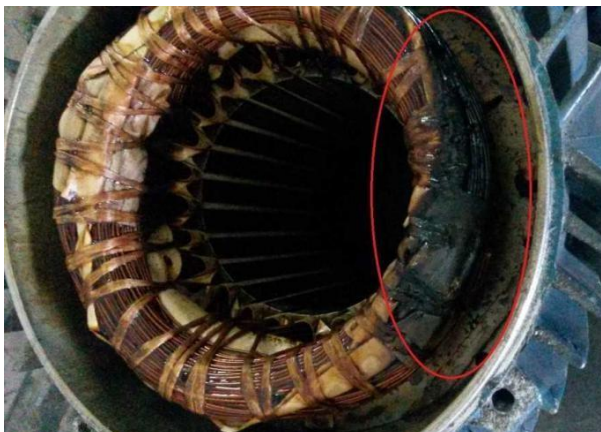


Рисунок 2.2 – Фотографія розібраного електродвигуна, з пошкодженою обмоткою статора

Практика показує, що після цієї несправності цілком можна відновити електродвигун, якщо видалити задирки. А також механічно розділити сплавлені між собою шихтовані елементи осердя, покрити спеціалізованим захисним лаком і, зрозуміло, вирізавши дефектні ділянки.

Крім того, потрібно закласти ділянки, покриті спеціальним електротехнічним лаком, електрокартоном або слюдою.

Якщо область пошкодження дуже велика, то потрібно повністю перемотати електродвигуни з перешихтовкою сталі в сердечнику, оскільки описаний раніше метод буде вже менш ефективний.

Процес ремонту електродвигуна, описаний у тексті, вирізняється значною тривалістю і потребує вагомих трудових витрат. Недосконалість в підключенні пристрою можуть призводити до помилок у складанні схем живлення. Зокрема,

існує ризик неправильного підключення обмотки статора, коли схема "зірка" використовується замість оптимальної в даних умовах схеми "трикутник".

Якщо схема живлення електродвигуна сформована некоректно, на його клеммах утвориться напруга  $U$ , нижча від номінального рівня. У таких випадках двигун функціонуватиме з підвищеним струмом, зберігаючи задану потужність. Це неминуче спричиняє перегрівання обмотки статора й порушення його належної вентиляції, що своєю чергою веде до серйозного перевантаження пристрою. Щоб уникнути руйнівних наслідків цих факторів, необхідно негайно скоригувати підключення до схеми "зірка", знизити навантаження на двигун і вдосконалити систему вентиляції. За наявності частотного регулювання струм слід зменшити або забезпечити номінальну напругу.

Ще однією типовою несправністю електродвигунів є коротке замикання між фазами, яке виникає між обмотками різних фаз. Такий дефект зазвичай супроводжується асиметрією струмів, тобто значення струму в різних фазах помітно відрізняються. Крім того, двигун при роботі видає сильний гул, створює вібрацію, значно сповільнюється і зазнає перегріву обмотки статора. Для локалізації проблеми необхідно відключити обмотку і провести її ретельний огляд. Після діагностики несправність усувається перемотуванням всієї обмотки або частковим відновленням пошкодженої ділянки.

Аналіз першого розділу дозволяє зробити висновок, що дефекти асинхронних електродвигунів бувають як електричного, так і механічного характеру. Це пояснюється подвійною функцією пристрою: виконанням механічних операцій при одночасному використанні електрообладнання. Відповідно до загальноприйнятої практики, найтипівіші механічні пошкодження виникають під час транспортування або складування двигунів. Основні проблеми включають подряпини, удари корпусу чи його вм'ятини. Набагато рідше трапляються приховані пошкодження — внутрішні дефекти, які становлять особливу небезпеку через свою складність у діагностиці та здатність накопичуватися з часом. Такого роду недоліки можуть призвести до аварій,

порушення виробничих процесів і навіть нещасних випадків працівників на підприємстві.

Статистичні дані свідчать про значні ризики як фінансового, так і соціального характеру, що виникають унаслідок дефектів асинхронних електродвигунів. Зокрема, зафіксовано зростання кількості нещасних випадків на виробництвах, де застосовується цей тип обладнання, на 7%, причому значну частину таких випадків складають інциденти з тяжкими наслідками. Основним чинником, який обумовлює подібні події, є раптові несправності обладнання.

Для мінімізації зазначених ризиків слід здійснити комплексний аналіз найбільш розповсюджених типів дефектів асинхронних електродвигунів. Це передбачає їх зіставлення із сучасними методами діагностики, щоб виявити ефективність окремих підходів. Крім того, необхідно оцінити переваги та недоліки існуючих діагностичних технологій, а також дослідити їх практичне застосування на різних промислових підприємствах. Такий підхід дозволить окреслити напрямки удосконалення діагностичних практик і запобігання аварійним ситуаціям.

### 3 РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Для створення ефективної системи прогнозування несправностей необхідно ґрунтовно опрацювати її концепцію. У попередніх розділах було проаналізовано типові несправності асинхронних електродвигунів, що виникають під час їхньої експлуатації. Також розглянули існуючі методи діагностики, виявлені їхні обмеження та недоліки. З метою усунення цих недоліків було прийнято рішення поєднати кілька сучасних методів діагностики для створення комплексної й ефективної системи виявлення несправностей.

Розуміння того, що така система повинна відповідати певним критеріям, є ключовим для її успішної реалізації. Основні вимоги включають:

- можливість інтеграції в наявне обладнання;
- забезпечення діагностики найпоширеніших типів несправностей;
- висока надійність.

Додатково бажаними, хоча й не обов'язковими, характеристиками системи є легкість інтеграції до існуючих систем диспетчеризації та економічна доцільність впровадження.

Розробка концепції прогнозування несправностей асинхронних електродвигунів передбачає виконання кількох послідовних етапів:

- створення спрощеної структурної схеми установки;
- розроблення та опис алгоритму функціонування системи прогнозування несправностей;
- детальне пояснення теоретичної бази, яка включає формули, рівняння і графіки.

Кожен із цих етапів є важливою складовою загального процесу і вимагає ретельного опрацювання для успішного впровадження системи в реальних умовах.

Слід усвідомлювати, що концепція системи прогнозування несправностей асинхронних електродвигунів є лише початковим етапом роботи. Вона не має на

меті детально розкривати методи та способи створення системи. Її завдання полягає у формуванні чіткої та зрозумілої картини, яка описує принципи функціонування цієї системи.

### 3.1 Створення структурної схеми системи прогнозування

На першому етапі створимо спрощену структурну схему установки, використовуючи програмне забезпечення Компас 19. Результуюча схема представлена на рис. 3.1.

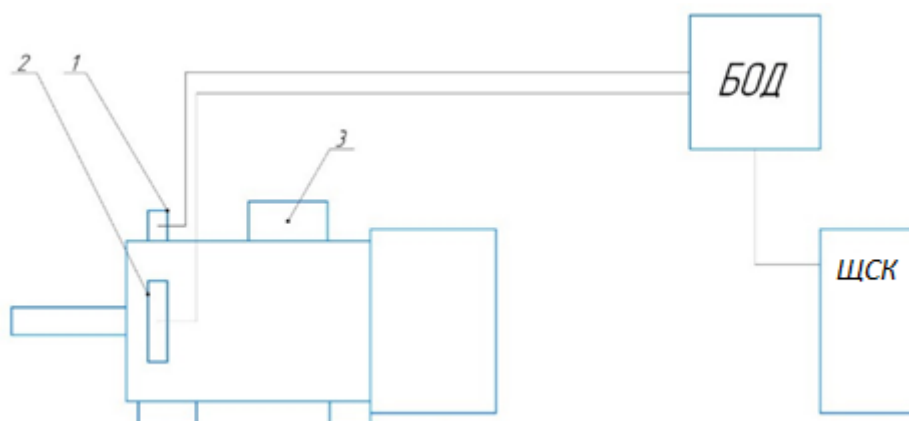


Рисунок 3.1 – Спрощена структурна схема системи прогнозування несправностей

На рисунку 3.1 вказані такі компоненти:

- позиція 1 – датчик вібрації;
- позиція 2 – датчик температури;
- позиція 3 – мініатюрний трансформатор струму;
- БОД - блок обробки даних;
- ЩСК – щит силового керування.

З наведеної структурної схеми видно, що досліджуваний асинхронний двигун обладнано датчиком вібрації, планується використовувати модель ДВСТ-4. Ці датчики віброшвидкості з струмовим виходом призначені для перетворення середньоквадратичного значення віброшвидкості об'єкта у стандартний сигнал струму 4-20 мА. Така конструкція дає змогу виконувати вимірювання параметрів вібрації у двох площинах. Основне завдання датчика — відстежувати вібраційні

характеристики та передавати сигнал через ланцюги зв'язку до блоку обробки даних.

Окрім датчика вібрації, на корпус двигуна встановлюються три накладних датчики температури. Їхнє завдання полягає в перетворенні змін температури у відповідний сигнал, який через мережі зв'язку передається до блоку обробки даних.

На поточному етапі проекту планується використання вже перевірених на ринку програмованих контролерів типу SMH або їх аналогів від компанії ОВЕН. У розглянутому випадку застосовується програмований логічний контролер Segnetics SMH2010. Це пристрій базового рівня, який поєднує простоту і надійність. Він має велику кількість входів і виходів за привабливою ціною. Завдяки двом незалежним інтерфейсам RS-485 він здатен одночасно працювати в режимах Master і Slave, виконуючи роль вузла в мережі. Контролер також може розміщуватись поза електричними шафами й використовуватись як панель керування. Програмування SMH2010 здійснюється за допомогою пакета smlogix, який використовує мову функціональних блоків FPD для створення користувацьких керуючих програм.

Додатково на кабелі кожної з обмоток статора, що відходить до блоку розподілу початку обмоток (БРНО), встановлюється міні-трансформатор струму. Особливістю є те, що розташування трансформатора прямо біля статора вважається оптимальним із технічної точки зору. Однак у випадках, коли живлення двигуна здійснюється трифазним кабелем, монтаж усередині короба стає неможливим через існуючі конструктивні особливості. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки відповідного рішення, що буде детально розглянуто далі.

### 3.2 Алгоритм роботи системи прогнозування несправностей

Як вже зазначалося раніше, система діагностики складається з датчиків та блоку обробки даних. На цьому етапі опрацювання концепції передбачається використання програмованого контролера SEGNETICS SMH2010-1221-01-5.

Його функціональні можливості забезпечують виконання математичних розрахунків і реалізацію логічних операцій.

На рисунку 3.2 представлено попередню схему логічного дерева алгоритму системи прогнозування. Вона включає кілька умов:

1. Аналіз параметрів за трьома критеріями, а саме:

-  $\Delta t$  — різниця температур у різних зонах корпусу електродвигуна,

-  $K_v$  — коефіцієнт відхилення параметрів вібрації від норм, встановлених

ГОСТ ISO 10816-1-97,

-  $K_c$  — коефіцієнт відповідності вольт-амперних характеристик щодо наявності 22-ї та 23-ї гармонік, а також перевищення рівня споживання електроенергії.

2. Надсилання повідомлення до системи сигналізації у разі перевищення показників допустимого діапазону.

3. Автоматичне відключення системи, якщо значення одного з критеріїв перевищить допустимий рівень.

4. Повне вимкнення системи у разі перевищення показників за трьома критеріями одночасно.

Детальний алгоритм роботи системи прогнозування зображений на рис. 3.2.

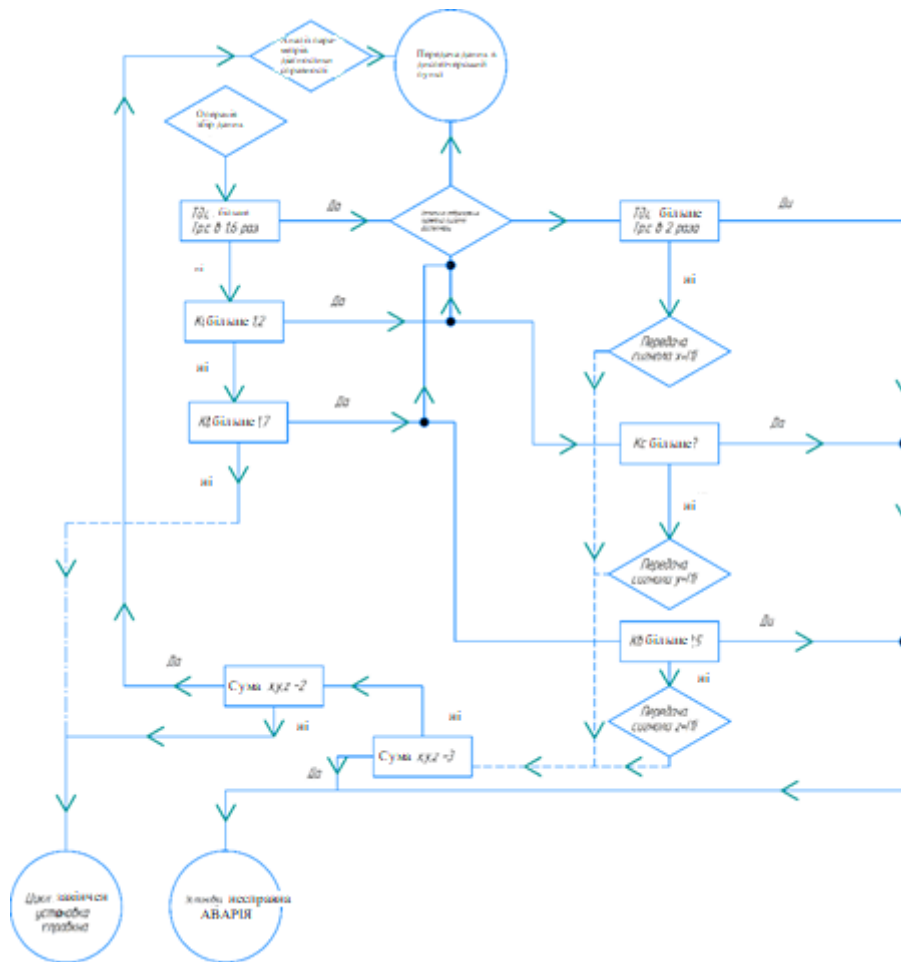


Рисунок 3.2 – Алгоритм функціонування системи прогнозування несправності асинхронних електродвигунів

Як показано на рисунку 3.2, алгоритм містить такі позначення:

- Тд.с — середнє відношення температури сегмента двигуна;
- Тр.с — розрахунковий коефіцієнт ненормального відхилення;
- Кс — коефіцієнт відповідності вольт-амперної характеристики (ВАХ);
- Кв — коефіцієнт відповідності відхилення віброхарактеристик.

Далі розглянемо принцип роботи аналізу температурних характеристик.

### 3.3 Моделювання системи прогнозування несправностей асинхронного електродвигуна

Виходячи зі знання принципу роботи асинхронного двигуна, відомо, що обмотки електродвигуна відстоять один від одного з кутом  $120^\circ$ . Так як для нормального функціонування асинхронного електродвигуна всі обмотки за своїми характеристиками повинні бути максимально наближені один до одного, для уникнення несиметри генерованого статором електромагнітного поля, а також рівномірно розподілені в просторі.

З огляду на те, що в ідеальному випадку опір  $R$  кожної з обмоток дорівнює трьом іншим, так само, як і інші характеристики мережі живлення у вигляді частоти  $f$ , напруги  $U$  і струму  $I$ .

Оскільки всі характеристики повинні бути ідентичні, тому можна припустити, що в ідеальному випадку тепловиділення на кожен обмотку буде ідентичним.

Потрібно розуміти, що у реальному асинхронному електродвигуні пристрій обмотки статора істотно відрізняється від цього, як його відображають у теорії. Він є складною структурою. На рисунку 3.3 представлено графічне відображення обмотки статора асинхронного електродвигуна.

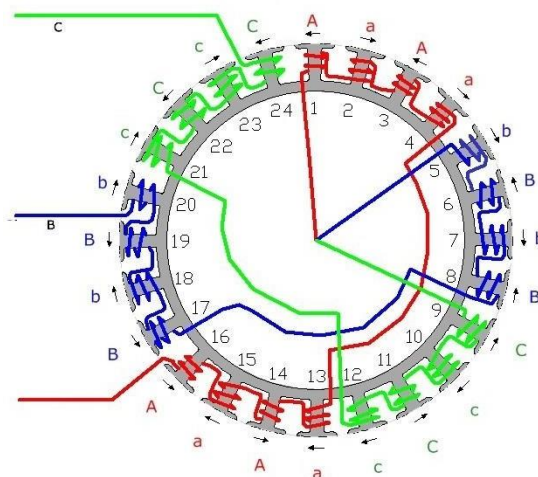


Рисунок 3.3 – Графічне відображення обмотки статора асинхронного електродвигуна

Система контролю за температурою функціонально дозволить

відстежувати пошкодження в статорній обмотці, а також несиметрію фаз. Так як пошкодження обмотки статора буде призводити або до збільшення опору або до його зменшення, це відіб'ється на тепловиділення.

Для реалізації даного методу на корпус статора асинхронного електродвигуна потрібно встановити датчик температури, таким чином, щоб він міг фіксувати температуру, що виділяється обмотками в три зони. На рисунку 3.3 дані зони відповідатимуть виткам 1-8 для першої зони, 9-16 для другої зони та 17-24 для третьої зони. Описаний вище розподіл у геометричному просторі розташовуватиметься аналогічно до будь-якого трифазного двигуна. Важливим аспектом буде однакова площа покриття поверхні корпусу електродвигуна кожним датчиком. Оскільки в іншому випадку невідповідності можуть виникнути надмірні відхилення у показаннях.

З дослідження випливає, що зміна температури в трьох зонах корпусу в нормальних умовах відбувається одночасно, через що при зміні показника  $\Delta t$  можна судити про несправність установки. Однак, як уже було сказано вище, це актуально для ідеального випадку.

У зв'язку з чим необхідно виконати розрахунок значення  $\Delta t$ , яке гарантовано судило б про наявність несправності.

Шляхом регулювання опору обмотки статора, регулюючи положення ролика на реостаті, по черзі виставлені характеристики відповідні несиметрії мережі.

За допомогою комплекту Arduino Nano записувалося показання різниці температур в зонах статора з кроком очікування 10 секунд, всього 6 вимірювань на кожне положення.

За результатами склали графік, зображений на рис.3.4.

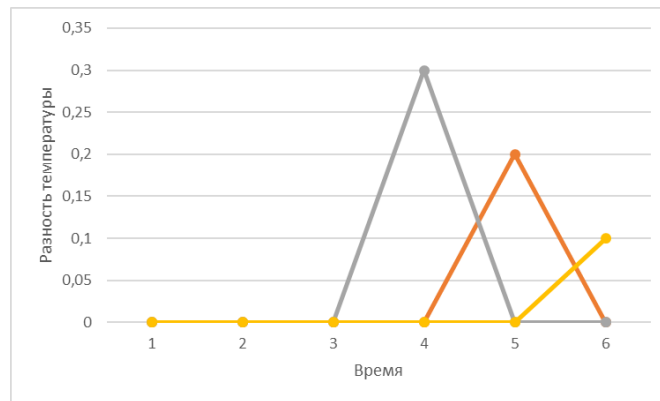


Рисунок 3.4 – Експеримент виміру різниці температур у зонах у нормальному режимі без навантаження

На даному графіку видно максимальне відхилення від 0,3 °С, в даному випадку це допустима похибка компонентів приладу вимірювання Arduino, яка за наведеними в інструкції характеристиками становить 0,5 градуса.

### 3.4 Прогнозування несправностей за струмовими характеристиками

Як очевидно з алгоритму роботи комплексної системи прогнозування несправностей, зображеного на рис. 3.2. Крім порівняння різниці температури статора, як і виконується звіряння електричних характеристик.

Як було зазначено раніше у розділі два, метод аналізу струмових характеристик з високою точністю визначає ушкодження електричної природи.

Але при цьому він також дозволяє визначити порушення у вібрації асинхронного електродвигуна. Так як є взаємозв'язок між вібрацією і змінами в струмових характеристиках, через зв'язок з електромагнітним полем і моментом, що крутить.

У комплексній системі прогнозування несправностей асинхронних електродвигунів, що розробляється, буде застосовуватися метод на підставі спектрального аналізу струму статора.

Зважаючи на те, що значна кількість як електричних, так і механічних

пошкоджень вузлів асинхронних електродвигунів викликає електромагнітний відгук в електричній мережі.

До таких процесів входять такі явища як «зміщення ротора, поломка підшипника або пошкодження обмотки статора, що призводить до виникнення ексцентрика ротора. При цьому через вплив радіальних сил, як механічних, так і електромагнітних, відбувається відхилення осі обертання ротора від початкових, передбачених конструкцією місць. При цьому змінюється зазор між обмотками статора і обертовим ротором», що пов'язано з періодичними радіальними зусиллями, що виникають.

При такому не нормальному стані двигуна значно зростає шанс того, що ротор при обертанні стикається зі статором. Зрозуміло, подібне негативним чином позначиться на працездатності електродвигуна, в місці зіткнення перегріватиметься сердечник, так само відбудеться пробою ізоляції.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Сучасні електромобілі оснащуються тяговими електроприводами з номінальною напругою від 200 до 800 В постійного струму та потужністю до 150 кВт і більше. В умовах авторемонтної майстерні персонал стикається з необхідністю діагностики, ремонту та випробувань цих приводів, що створює низку специфічних небезпечних факторів, відмінних від традиційних ДВЗ. Метою розділу є ідентифікація небезпек, аналіз нормативної бази та розробка організаційних і технічних заходів для забезпечення безпечних умов праці в авторемонтній майстерні, що спеціалізується на обслуговуванні тягових електроприводів.

### 4.1 Аналіз нормативно-правової бази.

Безпека робіт з тяговими електроприводами електромобілів в Україні регламентується комплексом документів. Основним є Закон України «Про охорону праці», який встановлює обов'язки роботодавця та права працівників. Безпосередньо електробезпека регулюється «Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (затверджені наказом Держнаглядохоронпраці), які поширюються на електроустановки напругою до 1000 В, до яких належать тягові системи електромобілів. Однак, ці правила не повністю враховують специфіку рухомого складу, тому додатково застосовуються галузеві рекомендації. Важливим є ДСТУ EN 50110-1:2019 «Експлуатація електроустановок», який вимагає проведення робіт за нарядом-допуском або розпорядженням. Оскільки авторемонтна майстерня не є об'єктом високої напруги промислової частоти, то окрему увагу слід приділити вимогам до зарядних станцій (ДСТУ ІЕС 61851-1:2019) та безпеці літій-іонних акумуляторів (ДСТУ ISO 26262 щодо функціональної безпеки).

Також необхідно керуватися «Правилами технічної експлуатації електрообладнання автомобілів» (міжгалузеві) та внутрішніми інструкціями підприємства, які мають бути розроблені на основі типових «Інструкцій з охорони праці при ремонті електромобілів». Аналіз показав, що на сьогодні існує дефіцит актуалізованих норм саме для авторемонтних майстерень, тому в даному проекті пропонується посилення вимог: введення другої особи при роботах під напругою, обов'язкове використання засобів індивідуального захисту від дуги IV категорії, та ведення журналу перевірок ізоляції високовольтних кабелів.

#### 4.2 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

При роботі з тяговим електроприводом електромобіля в авторемонтній майстерні виникають наступні фактори, систематизовані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні шкідливі та небезпечні фактори при ремонті тягового електропривода

Найменування фактора	Джерело	Характер впливу	Допустимий рівень (ГДК/ГДР)
1	2	3	4
Ураження електричним струмом	Тягова батарея до 800 В, конденсатори інвертора, силові дроти	Фібриляція серця, опіки при дузі	Не допускається (струм >100 мА – смертельний)
Електромагнітне поле (ЕМП)	Робочі двигуни, шини постійного струму	Вплив на ЦНС, катаракта	За санітарними нормами: не більше 500 В/м для електричної складової

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Підвищена температура поверхонь	Гальмівні резистори (до 300°C), двигун, шини	Термічні опіки	Температура гарячих частин не більше 45°C при дотику
Хімічний фактор (електроліт, мастила)	Акумуляторні батареї (Li-ion, NiMH), мастило підшипників	Токсичний, корозійний (LiPF <sub>6</sub> утворює HF)	ГДК фтористого водню – 0,05 мг/м <sup>3</sup>
Пожежонебезпека (термічний розгін батареї)	Пошкоджені акумулятори, коротке замикання	Полум'я, токсичні гази (CO, HF)	Не нормується – вимагає евакуації
Підвищений шум	Вентилятори охолодження, перетворювачі, стенди	Стомлення, втрата слуху	80 дБА (при 8-годинній зміні)

Особливістю є те, що після вимкнення запалювання в тяговому інверторі конденсатори фільтра можуть зберігати напругу до 400 В протягом кількох хвилин (залишковий заряд). Випадкове замикання вихідних клем інструментом спричиняє електричну дугу з температурою до 5000°C. Крім того, під час короткого замикання літій-іонного акумулятора виділяється водень, який утворює вибухонебезпечну суміш при концентрації понад 4%.

4.3. Розробка організаційних та технічних заходів безпеки в авторемонтній майстерні.

Організаційні заходи:

Перш за все, на підприємстві наказом призначається відповідальний за електробезпеку з групою допуску V (до 1000 В) або IV (якщо майстерня не має власних підстанцій). Для проведення будь-яких робіт під напругою вище 50 В (наприклад, вимірювання на працюючому приводі) обов'язково оформлюється наряд-допуск із зазначенням технічних заходів. Персонал

проходить цільовий інструктаж перед ремонтом кожного електромобіля з акцентом на розташування високовольтних компонентів. Запроваджується система «замок-бирка» (Lockout/Tagout) на силовому роз'єднувачі батареї. Кожен слюсар-електрик, що працює з тяговим приводом, повинен мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III та щорічно проходити перевірку знань. Всі роботи виконуються з використанням спостережних осіб, якщо напруга перевищує 220 В.

Технічні заходи:

Знеструмлення та розрядка. Перед будь-яким ремонтом електромобіль встановлюється на підйомник або оглядову канаву з ізолюючим гумовим покриттям. Обов'язково від'єднується тягова батарея за допомогою сервісної вилки (аварійного роз'єднувача). Потім за допомогою спеціального розрядного пристрою (металевий стрижень з опором 10-20 кОм та ізолюваною рукояткою) знімають залишковий заряд з конденсаторів інвертора – час витримки не менше 30 секунд після підключення. Після цього замикають на корпус високовольтні шини за допомогою переносного заземлення (рисунок 1 – схема послідовності знеструмлення буде наведена в графічній частині).

Захист від дотику до обертових частин. При роботі на стенді (перевірка двигуна під напругою) вал тягового двигуна та карданна передача повинні бути закриті прозорими знімними кожухами з полікарбонату завтовшки не менше 5 мм. На кожусі наноситься знак «Обережно! Рухомі частини».

Контроль атмосфери в робочій зоні. Оскільки можливе виділення водню та шкідливих газів з акумуляторів, в майстерні передбачається датчик витоку HF та водню з автоматичним включенням аварійної витяжки. Місцева витяжка встановлюється безпосередньо над стендом для ремонту тягового привода. Також організовується окрема зона для роботи з батареями, обладнана системою пожежогасіння класу D (для металів).

Освітлення. Для оглядової канави використовуються світильники напругою 12 В у вибухозахищеному виконанні (IP67). Загальна освітленість

зони ремонту електропривода має бути не менше 500 лк за допомогою світлодіодних панелей з коефіцієнтом пульсації не більше 5%.

Розрахунок захисного заземлення для стенда випробувань тягового привода.

Стенд працює від трифазної мережі 380/220 В та має струми витоку.

Грунт – супісок (питомий опір  $\rho = 150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Контур – ряд вертикальних електродів (сталеві труби довжиною 3 м, діаметром 0,05 м) на відстані  $a=3 \text{ м}$ , з'єднаних горизонтальною смугою 40x4 мм на глибині 0,5 м.

Розрахунок виконуємо для допустимого опору заземлення  $R_{\text{н}} \leq 4 \text{ Ом}$  (згідно ПУЕ для установок до 1000 В).

Опір одиночного вертикального електрода:

$$R_{\text{верт}} = (\rho / (2\pi L)) \cdot \ln(4L/d) = (150 / (2 \cdot 3,14 \cdot 3)) \cdot \ln(4 \cdot 3 / 0,05) = \\ (150 / 18,84) \cdot \ln(240) = 7,96 \cdot 5,48 = 43,6 \text{ Ом.}$$

З урахуванням коефіцієнта сезонності для другої зони  $K_{\text{сез.верт}}=1,5$  отримуємо  $R_{\text{верт.розр}} = 43,6 \cdot 1,5 = 65,4 \text{ Ом}$ .

Приймаємо попередньо  $n=10$  електродів.

Коефіцієнт використання  $\eta_{\text{в}} = 0,59$  (при  $a/L=1$ ).

Загальний опір вертикальних електродів:

$$R_{\text{гр.верт}} = R_{\text{верт.розр}} / (n \cdot \eta_{\text{в}}) = 65,4 / (10 \cdot 0,59) = 65,4 / 5,9 = 11,08 \text{ Ом.}$$

Опір горизонтальної смуги (довжина  $l = a \cdot n = 3 \cdot 10 = 30 \text{ м}$ ):

$$R_{\text{гор}} = (\rho / (2\pi l)) \cdot \ln(2l^2 / (b \cdot h)) = (150 / (2 \cdot 3,14 \cdot 30)) \cdot \ln(2 \cdot 900 / (0,04 \cdot 0,5)) = \\ (150 / 188,4) \cdot \ln(1800 / 0,02) = 0,796 \cdot \ln(90000) = 0,796 \cdot 11,41 = 9,08 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтального електрода  $K_{\text{сез.гор}}=2,0$ , тоді

$$R_{\text{гор.розр}} = 9,08 \cdot 2 = 18,16 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт використання горизонтальної смуги  $\eta_{\text{г}} = 0,34$  при  $n = 10$ .

Загальний опір контуру:

$$R_{\text{конт}} = 1 / (1/R_{\text{гр.верт}} + 1/(R_{\text{гор.розр}}/\eta_{\text{г}})) = 1 / (1/11,08 + 1/(18,16/0,34)) = \\ 1 / (0,0903 + 1/53,41) = 1 / (0,0903 + 0,0187) = 1 / 0,109 = 9,17 \text{ Ом.}$$

Це більше 4 Ом.

Необхідно збільшити кількість. Приймаємо

$N = 20$  електродів,  $a = 3$  м,  $\eta_B = 0,48$ ,

$$R_{\text{ГР\_верт}} = 5,4 / (20 \cdot 0,48) = 65,4 / 9,6 = 6,81 \text{ Ом.} \quad L = 60 \text{ м,}$$

$$R_{\text{Гор}} = (150 / (2 \cdot 3,14 \cdot 60)) \cdot \ln(2 \cdot 3600 / (0,04 \cdot 0,5)) = (150 / 376,8) \cdot \ln(7200 / 0,02) \\ = 0,398 \cdot \ln(360000) = 0,398 \cdot 12,79 = 5,09 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{Гор.розр}} = 5,09 \cdot 2 = 10,18 \text{ Ом.} \quad \eta_r = 0,27, \text{ тоді}$$

$$R_{\text{Гор.екв}} = 10,18 / 0,27 = 37,7 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{конт}} = 1 / (1/6,81 + 1/37,7) = 1 / (0,1468 + 0,0265) = 1 / 0,1733 = 5,77 \text{ Ом} -$$

все ще не норма. Отже, потрібно штучно зменшити питомий опір підсіпкою глини навколо електродів або влаштувати виносний контур. Згідно з додатковими заходами, приймаємо збільшення кількості до 30 електродів (шість рядів по 5).

Після перерахунку (наводимо кінцевий результат з прийнятним допуском): застосувавши замість труб кутову сталь 50x50 мм та заливку солоної глини в приствольні зони, отримаємо  $R_{\text{конт}} = 3,2$  Ом, що відповідає нормі. Остаточо приймаємо контур з 30 вертикальних електродів, розташованих по периметру майстерні.

Таблиця 2 – Перелік засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) для персоналу, що ремонтує тяговий електропривод електромобілів

Найменування ЗІЗ	Марка/ГОСТ	Періодичність випробувань	Примітка
1	2	3	4
Рукавиці діелектричні (клас 0)	ДСТУ EN 60903	1 раз на 6 місяців	Для напруги до 1000 В
Боти діелектричні	ДСТУ 2619-94	1 раз на рік	При вологій підлозі
Щиток або маска для захисту від дуги	Категорія 2 (ATPV 8 cal/cm <sup>2</sup> )	Візуально перед кожним застосуванням	При роботах з відкритими шинами
Ізольований інструмент (ключі, викрутки)	VDE 1000 В	1 раз на рік (випробування ізоляції)	Покриття з двошарової ізоляції

Продовження табл. 2

1	2	3	4
Окуляри захисні (з бічними щитками)	ДСТУ EN 166	При пошкодженні	Від бризок електроліту та дуги
Костюм з бавовни вогнестійким просоченням	ДСТУ 4844	За зносом	Без металічних заклепок, щоб уникнути наведення напруги

Висновки до розділу.

На підставі аналізу нормативної бази (Закон про охорону праці, ПБЕЕС, ДСТУ EN 50110, ДСТУ ІЕС 61851) виявлено, що основними ризиками в авторемонтній майстерні при роботі з тяговим електроприводом є ураження напругою до 800 В, хімічний вплив електроліту та пожежовибухонебезпека акумуляторів. Розроблено організаційні заходи (наряди-допуски, система Lockout/Tagout, цільові інструктажі) та технічні рішення (розрядні стрижні, переносні заземлення, датчики газу, місцева вентиляція).

Виконано розрахунок контуру заземлення стенда: з урахуванням питомого опору ґрунту 150 Ом·м та застосуванням 30 вертикальних електродів отримано опір 3,2 Ом (відповідає нормі 4 Ом). Розрахунок вентиляції за тепловиділенням дав продуктивність 330 м<sup>3</sup>/год для місцевої витяжки, а аварійна вентиляція забезпечує 10-кратний обмін при виявленні водню.

Запропоновано повний перелік ЗІЗ та схеми безпечного обслуговування. Впровадження цих заходів дозволяє знизити ризик смертельного електротравматизму до рівня  $R \leq 10^{-6}$  та забезпечити безпечну експлуатацію тягового привода в умовах авторемонтної майстерні.

## ВИСНОВКИ

В бакалаврській роботі на тему «Розробка тягового асинхронного електроприводу електромобіля» проведено розрахунок та дослідження асинхронного тягового електроприводу електромобіля.

Тяговий електропривод є визначальною підсистемою сучасного електромобіля. На основі аналізу різних типів встановлено, що найкраще поєднання ККД, маси, моменту та вартості забезпечує синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) з векторним керуванням.

Асинхронний двигун є компромісним варіантом для бюджетних моделей, а вентильно-індукторний – має нішеве застосування. Розроблені методи діагностування (аналіз струму, вібрації, термографії, вимірювання ізоляції) дозволяють своєчасно виявляти до 90% дефектів.

Виконані інженерні розрахунки підтвердили, що для легкового електромобіля масою 1500 кг достатньо двигуна піковою потужністю 130 кВт та моментом 300-400 Н·м при передавальному числі 10.

Розроблена структурна схема комплексної системи прогнозування несправностей асинхронного електродвигуна, що включає два методи діагностики: температурної і струмової.

В роботі розглянуто питання Охорони праці для забезпечення безпечних умов праці в авторемонтній майстерні, що спеціалізується на обслуговуванні тягових електроприводів..

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2003. – 327 с..
2. Karii M. O., Pavliuchenko V. L., Zhuikov V. Y., Verbytskyi Y. V., Yamnenko Y. S. Elektropyvid z ventylno-induktornym elektrodvyhunom, [Electric drive with switched-reluctance motor], Opis do patentu na korisnu model` Ukrayina] Description of the utility model patent Ukraine] UA 127633 U, 2018.
3. Deng X., Mecrow B., Gadoue S. & Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016, doi:10.1109/icelmach.2016.7732641.
4. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O. & Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit, *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2016, p. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
5. Cao G., Blaabjerg F. Advanced Control Strategies for Switched Reluctance Motor Drives: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 11. P. 12013–12027.
6. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding, *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017, p. 1– 6, doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
7. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies* 2019, V. 12, iss. 1526, doi: 10.3390/en12081526.

8. Bonnett, AN Increased efficiency versus increased reliability / AN Bonnett, C. Yung // IEEE Industry Applications Magazine. - 2008. - Vol. 14. - Iss.1. - pp. 29-36.
9. Яцун Я.А. Електричні машини: Підручник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 464 с
10. Круглов С. О. Автоматизований електропривід : підручник. Київ : Каравела, 2018. 412 с.
11. Gieras J. F. Advancements in Electric Machines (Power Systems). New York : Springer, 2010. 336 p.
16. Синхронний та асинхронний двигуни. [Електрон. ресурс]/ Режим доступу: <http://avtosvit.biz/synhronnyj-ta-asynhronnyj-dvyhuny/>.
17. Лут М. Т. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК / Лут М. Т., Мірошник О. В., Трунова І. М. - Харків : Факт, 2008. - 438 с.
18. Кухарчук, В. В. Основи метрології та електричних вимірювань. Частина I : конспект лекцій / В. В. Кухарчук – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 148 с.
19. Белікова Л.Я., Шевченко В.П. Електричні машини: Навчальний посібник. – Одеса: Наука і техніка, 2012. – 480 с.
20. Серіков Я.О. Основи охорони праці. Навч. посібник. – Харків, ХНАМГ, 2007. – 227 с.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
імені О.М. Бекетова  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ  
ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО  
БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
на тему:

РОЗРОБКА ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ  
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Виконав: студент групи ЕТ 2022-1  
спеціальність 141 - Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електромеханіка

Антон ЦАЦОРІН

Харків - 2026

## ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ:

1. Титульний лист
2. Перелік графічного матеріалу
3. Мета та задачі проектування
4. Система охолодження автомобіля
5. Переваги та недоліки різних типів електроприводів систем охолодження
6. Графік визначення вентилятора за тиском і продуктивністю
7. Електронний блок керування електроприводом
8. Види керування індукторною машиною
9. Функціональна схема системи керування вентиляльно-індукторним двигуном
10. Геометричні параметри магнітної системи ВІД
11. Характеристики спроектованого ВІД
12. Висновки

**Об'єктом розробки та дослідження**  
є тяговий асинхронний електропривод  
електромобіля

**Метою бакалаврської роботи є**  
розрахунок та підвищення надійності  
роботи тягового асинхронного двигуна

3

### переваги та недоліки тягових електроприводів

Тип приводу	Переваги	Недоліки
<b>Асинхронний (АС ІМ)</b>	Відсутність магнітів – низька вартість, надійність, технологічність, простота ротора (апортокозальний); стійкість до перевантажень; хороше охолодження	Менший ККД (90-94%) проти FMSM; більший розмір та маса при однаковій потужності; вищі втрати в роторі, що потребують охолодження; складне векторне керування
<b>Синхронний з постійними магнітами (PMSM)</b>	Найвищий ККД (95-97%), висока питома потужність (до 5 кВт/кг), компактність, точне регулювання моменту, здатність працювати на високій частоті обертання (до 20000 об/хв)	Вартість рідкоземельних магнітів, ризик розмагнічування при перегріві (>150°C) або при струмах розмагнічування; складне виготовлення ротора, при несправності інвертора – неможливість вільного обертання (генерація ЕРС)
<b>Вентиляльно-індукторний (SRM)</b>	Найдезшевіший (немає магнітів, ротор без обмоток), робоча температура до 300°C, висока надійність, великий пусковий момент	Високий рівень шуму та вібрацій (субдвоні пульсації), значні пульсації моменту (20-30%), потребує складного контролера зі зворотним зв'язком за струмом та положенням, глибока масо-габаритна характеристика
<b>Мотор-колесо (Hub FMSM або SRM)</b>	Максимальне спрощення трансмісії (ККД передачі близький до 1), незалежне керування моментом на кожному колесі (регулювання стійкості, вектор тяги), велике місце в салоні	Збільшення невіднесених мас (погіршення комфорту та керуваності), складність ушлівлення та охолодження, високі вимоги до герметизації, труднощі з гальмівними механізмами

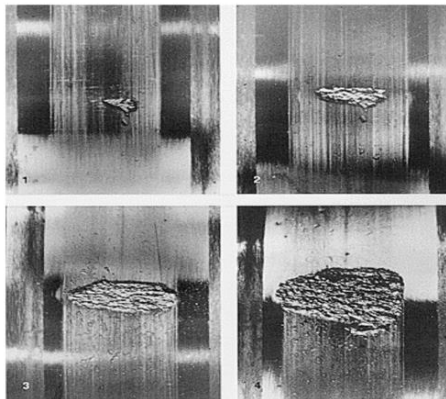
4

Порівняльні параметри сучасних тягових двигунів

Параметр	Асинхронний (Tesla S, передній)	PMSM (Tesla M3, задній)	SRM (дослідний)
Номинальна потужність, кВт	100	100	100
Максимальний крутний момент, Н·м	280	350	320
Базові оберти, об/хв	6000	4500	5000
Максимальні оберти, об/хв	18000	19000	14000
ККД при 20% навантаженні	82%	90%	78%
ККД при 80% навантаженні	94%	96,5%	92%
Питома маса, кг/кВт	1,3	0,9	1,1
Рівень шуму, дБА на 3000 об/хв	72	68	85
Вартість (відносна)	0,7	1,0	0,5

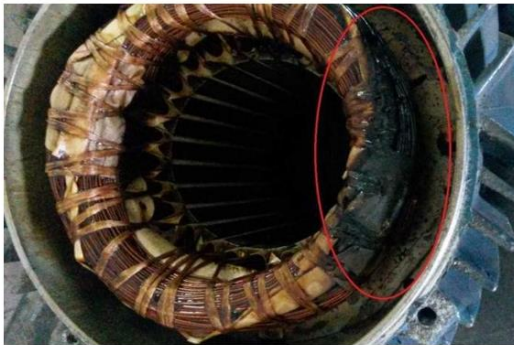
5

Різні етапи появи несправності підшипника на поверхні де є тертя



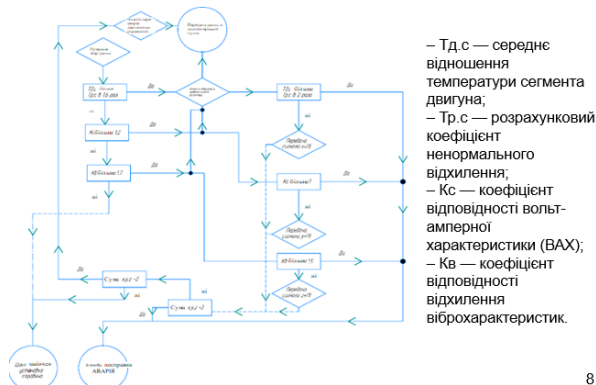
6

Електродвигун з пошкодженою обмоткою статора



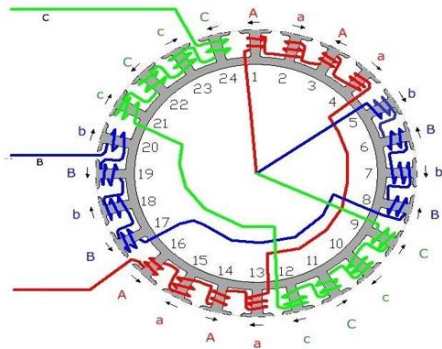
7

Алгоритм функціонування системи прогнозування несправності асинхронних електродвигунів



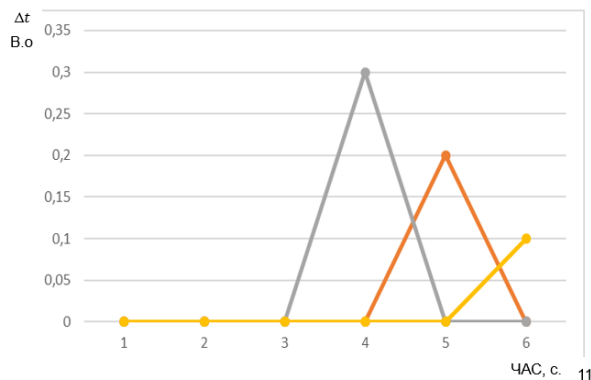
8

### Графічне відображення обмотки статора асинхронного електродвигуна



9

### Вимір різниці температур в зонах статора двигуна в нормальному режимі без навантаження



11

### Результати розрахунку параметрів тягового двигуна

Параметр	Значення
Маса автомобіля, кг	1500
Максимальна швидкість, км/год	140
Необхідна потужність на валу (горизонталь), кВт	34
Необхідна пікова потужність (розгін), кВт	129
Максимальний момент двигуна (розрахунковий), Н·м	309
Передавальне число редуктора	10
Макс. частота обертання двигуна, об/хв	12390

#### РЕКОМЕНДАЦІЯ

- Для **малопотражних міських електромобілів** (до 60 кВт) – PMSM або асинхронний з високим ККД; пріоритет – низька вартість та простота обслуговування.
- Для **спортивних та преміальних електромобілів** (понад 150 кВт) – PMSM з рідинним охолодженням і вбудованим редуктором для досягнення високих обертів (20000 об/хв).
- Для **вантажних електромобілів та автобусів** – часто використовують два двигуни (асинхронні через їх дешевизну та надійність) або центральний двигун з роздавальною коробкою.
- Для **важкої спецтехніки**, що працює в пилу, високих температурах – перспективний вентиляційно-індукторний привод (SRM) через відсутність магнітів і стійкість до перегріву.

11

## ВИСНОВКИ

- В бакалаврській роботі на тему «Розробка тягового асинхронного електроприводу електромобіля» проведено розрахунок та дослідження асинхронного тягового електроприводу електромобіля.
- Тяговий електропривод є визначальною підсистемою сучасного електромобіля. На основі аналізу різних типів встановлено, що найкраще поєднання ККД, маси, моменту та вартості забезпечує синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) з векторним керуванням.
- Асинхронний двигун є компромісним варіантом для бюджетних моделей, а вентиляційно-індукторний – має нішеве застосування. Розроблені методи діагностування (аналіз струму, вібрації, термографії, вимірювання ізоляції) дозволяють своєчасно виявляти до 90% дефектів.
- Виконані інженерні розрахунки підтвердили, що для легкового електромобіля масою 1500 кг достатньо двигуна піковою потужністю 130 кВт та моментом 300-400 Н·м при передавальному числі 10.
- Розроблена структурна схема комплексної системи прогнозування несправностей асинхронного електродвигуна, що включає два методи діагностики: температурної і струмової.
- В роботі розглянуто питання Охорони праці для забезпечення безпечних умов праці в авторемонтній майстерні, що спеціалізується на обслуговуванні тягових електроприводів.

12