

**Мигаль В. Д.,  
Шевченко І. О.**

Державний  
біотехнологічний  
університет,  
м. Харків, Україна

**E-mail:**

prof.myhal@gmail.com,  
igorshvchnk@gmail.com

**СТАН РОЗВИТКУ ТЯГОВИХ  
ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПІДВИЩЕНОЇ  
НАДІЙНОСТІ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-137-148>

УДК 631.333

*Мигаль В.Д., Шевченко І.О. Стан розвитку тягових електродвигунів підвищеної надійності.*

**Анотація.** Розвиток тягових електродвигунів є важливим напрямком удосконалення транспортних машин. Тягові електродвигуни постійно покращуються з погляду споживання електроенергії і надійності та діагностування, а також зменшення витрат на експлуатацію. В цій статті особлива увага приділяється методам вибору типу тягового двигуна, оцінці якості тягових електродвигунів при проектуванні, виготовленні та експлуатації за їх вібраційними характеристиками.

**Ключові слова:** тяговий електродвигун, підвищення надійності, електромобіль, гібридний автомобіль, якість, вібраційні характеристики.

*Mygal V.D., Shevchenko I.O. State of development of traction electric motors of increased reliability.*

**Abstract.** The development of traction motors is an important direction in the improvement of transport vehicles. Traction motors are constantly improving in terms of electricity consumption and reliability and diagnostics, as well as reducing operating costs. This article pays special attention to methods for selecting the type of traction motor, assessing the quality of traction motors during design, manufacture and operation based on their vibration characteristics.

**Key words:** traction motor, increasing reliability, electric vehicle, hybrid vehicle, quality, vibration characteristics.

### **Постановка проблеми**

Автомобіль є одним із найбільш ефективним, доступним і затребуваним транспортним засобом. Ефективне використання автомобілів залежить від проектної якості, якості виготовлення і експлуатації. При створенні автомобіля відбувається постійний пошук засобів підвищення їх продуктивності, зменшення витрат палива, автоматизації робочих процесів, швидкості, навантаження, забезпечення високого рівня економічності і екологічності, підвищення керованості і комфортабельності автомобілів, ефективною експлуатації, безпеки функціонування, підвищення тягово-швидкісних якостей, витрат на технічне обслуговування, ремонт та експлуатаційних матеріалів.



Використання електричної тяги стало пріоритетним напрямком розвитку якісної структури АТЗ завдяки ряду переваг електродвигунів (ЕД) перед ДВЗ в транспортних режимах:

- високий коефіцієнт корисної дії (до 95 %);
- висока питома потужність і низька ціна;
- простота використання і керування;
- екологічність при експлуатації;
- надійність і довговічність;
- переважно повітряне охолодження;
- мінімальна вага трансмісії (не вимагає КПП);
- можливість рекуперації енергії в режимі генератора;
- максимальні показники обертаючого моменту  $M$  і потужності  $N$  в широкому

діапазоні швидкостей обертання.

В електромобілях, у якості тягових можуть використовуватися різні типи електродвигунів. Широке застосування знайшли оборотні машини постійного і змінного (синхронні, асинхронні) струму з вентильним керуванням [10].

## 2. Типи використовуваних тягових електродвигунів, їх переваги і недоліки.

Аналіз існуючих розробок показав, що найбільш практичне застосування в електроприводі електромобілів і гібридних автомобілів отримали тягові електродвигуни таких типів:

- вентильні електродвигуни з постійними магнітами (ВЕДПМ) (permanent magnet motors (PMM));
- вентильні електродвигуни з електромагнітним збудженням (ВЕДЕМ) (permanent magnet motors with electromagnetic excitation (PMMEE));
- асинхронні частотно-керовані електродвигуни (АЧКЕД) (asynchronous frequency-controlled motors (AFCM)).

Дещо раніше широко застосовувалися тягові колекторні електродвигуни постійного струму (permanent-magnet synchronous motor). На сьогодні вони не можуть успішно конкурувати зі згаданими електродвигунами. Порівняння достоїнств і недоліків цих двигунів з урахуванням експлуатаційних вимог дає описані далі результати. Найвищий ККД мають ВЕДПМ. ВЕДЕМ і АЧКЕД мають дещо менший ККД, їх вагогабаритні параметри гірші ніж у ВЕДПМ, однак, низка достоїнств ВЕДЕМ і АЧКЕД робить їх застосування обґрунтованим і конкурентоздатним [10, 11, 12].

Відносно недорогими і широко розповсюдженими є синхронні електричні машини з електромагнітним збудженням, оскільки вони застосовуються як генератори змінного струму, в тому числі і як автомобільні генератори. Вони застосовуються у якості тяговий у сучасних електромобілях (наприклад, електромобілі Renault).

У якості тягових ЕД на транспортних засобах знайшли застосування вентильні електродвигуни наступних типів:

- асинхронний з короткозамкненим ротором АДКР;
- синхронний з поверхневими постійними магнітами СДППП;
- синхронний із вбудованими постійними магнітами СДПМВ;
- синхронний реактивний з постійними магнітами СРД-ПМ;
- синхронний двигун з обмоткою збудження СДОЗ.

ВЕД це синхронна електрична машина, у якої є датчики положення ротора. Вона живиться через інвертор на основі сучасних силових ключів й управляється за допомогою мікроконтролера з використанням мінімум двох ACS: по положенню ротора та по граничному фазному струму. Інколи додають ACS по кутовій швидкості (круїз-контроль). Синхронні електричні машини бувають із збудженням від постійних

магнітів і з електромагнітним збуренням. Найбільш широко застосовують ВЕД на основі синхронної електричної машини з висококоерцитивними постійними магнітами на роторі. Такі ВЕД мають більш високий ККД і кращі електричні характеристики. Однак, вони мають високу вартість. Крім того, недоліком таких ВЕД є малий діапазон швидкостей обертання ротора. Оскільки швидкість ідеального холостого ходу пропорційна напрузі живлення якоря та зворотно пропорційна магнітному потоку збурення ротора, для розширення швидкісного діапазону, при неможливості управляти магнітним потоком, потрібне збільшення напруги живлення. У деяких, відносно невеликим межах, векторне управління може послабити потік збурення в таких електродвигунах, що дає можливість розширити діапазон робочих обертів, але це призводить до нераціонального використання електроенергії і зниження ККД.

Відносно недорогими і широко розповсюдженими є синхронні електричні машини з електромагнітним збуренням, оскільки вони застосовуються як генератори змінного струму в тому числі і як автомобільні генератори. Також вони застосовуються як тягові у сучасних електромобілях. Саме це тип електричних машин був вибраний для виготовлення ВЕД тягового електроприводу базового автомобіля, переобладнаного в гібридний. Незважаючи на дещо гірші значення ККД, ВЕД на основі синхронної електричної машини з електромагнітним збуренням, окрім невисокої вартості, має низку інших важливих переваг:

- можливість організувати регулювання обертів у другій зоні електродвигуна шляхом управління потоком збурення. Це дає можливість розширити робочий діапазон швидкостей обертання ротора при фіксованій напрузі живлення. А значить, дасть можливість збільшити передатне число від ВЕД до ведучих коліс. У результаті вдається підвищити пусковий крутильний момент і зберегти потрібну максимальну швидкість;
- забезпечує суттєво менший гальмівний момент у знеструмленому стані, що покращує накат електромобіля або гібридного автомобіля;
- можливість простого й ефективного управління ВЕД в режимі генератора при рекуперації шляхом регулювання порівняно невеликого струму збурення;
- можливість роботи без перенапруження силової електроніки при кутовій швидкості, що набагато перевищує кутову швидкість ідеального холостого ходу. Такий режим необхідний у гібридних автомобілях під час примусового холостого ходу ВЕД при русі автомобіля з допомогою ДВЗ на високій швидкості. ВЕД з постійними магнітами має ЕРС обертання пропорційну кутовій швидкості, і, значить, повинен мати силові ключі з робочою напругою у 3-4 рази більшою, ніж напруга тягової батареї. Це призводить до суттєвого збільшення вартості інвертора і зниження його ККД. У ВЕД з електромагнітним збуренням при вимкненні струму обмотки збурення перенапруги не виникає, тому робоча напруга ключів повинна бути тільки на 20 % вищою за робочу напругу тягової батареї.

Усі переваги ВЕДЕМ перед ВЕДПМ мають і АЧКЕД. При цьому і асинхронна електрична машина має більш просту і технологічну конструкцію, крім того необхідний датчик кутової швидкості тягового АЧКЕД простіший і дешевший за датчик абсолютного положення ротора, який необхідний для тягових ВЕДПМ і ВЕДЕМ. Більш складний алгоритм векторного регулювання АЧКЕД ускладнює мікропроцесорне управління, але сьогодні це не призводить до суттєвого підвищення ціни електроприводу. Перераховані аргументи роблять АЧКЕД одним з найбільш привабливих для застосування в якості тягового електродвигуна електромобілів та гібридних автомобілів.

У зв'язку зі складними умовами експлуатації тягового електродвигуна важливим завданням є забезпечення мінімальних шумів і вібрації. Тому різні дослідники займаються вивченням причин виникнення і пошуку способів мінімізації даної

проблеми: розробки способів зменшення електромагнітних вібрацій трифазових асинхронних двигунів. Досліджується вплив вібрації та шуму на асинхронних двигун з короткозамкнутим ротором з подвійним похилим ротором (of Squirrel-Cage Induction Machine With Double Skewed Rotor). Визначено, що двигун працює безшумно, коли частота вібрації і частота електромагнітних силових хвиль знаходяться далі від власної частоти сердечника статора.

Розроблені трансмісії на основі синхронного двигуна з постійними магнітами (PMSM) з векторним управлінням. Для покращення зворотного зв'язку щодо швидкості та надійності контролера двигуна був розроблений нечіткий самоналаштовуваний ПІД-регулятор (A fuzzy self-tuning PID controller). Це дає можливість зменшити пульсації крутного моменту, спричинені зміною навантаження та зміною сигналу управління.

Залежно від призначення електроприводу регулювання швидкості обертання і зміна навантаження АЧКЕД виконується векторним або скалярним управлінням. У статичному (усталеному) режимі роботи електроприводу обидва цих варіанти регулювання практично еквівалентні. Але векторне регулювання забезпечує оптимальний режим роботи електродвигуна не тільки в стаціонарних режимах, але і в перехідних (динамічних) режимах. Таким чином попереджається затягування переходу на новий оптимальний режим при різких змінах навантаження або кутової швидкості, та, крім того, захищаються силові електронні ключі від перенапружень і перенавантажень по струму. У тяговому електроприводі електромобіля або гібридного автомобіля тривалість перехідних електромагнітних процесів, як правило, набагато менша, ніж тривалість перехідних процесів режиму руху транспортного засобу. Це дає можливість у більшості випадків розглядати тяговий електропривод як статичний об'єкт.

Тяговий асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором в електромобілі навіть під час роботи у скалярному режимі контролера частоти-напруги поєднує в собі низку переваг. А саме: він є найпростішою електричною машиною змінного струму; має хороші пускові та регульовальні властивості двигуна постійного струму. Але, так як в асинхронному двигуні при векторному регулюванні є можливість роздільного управління моментом і полем, то це дає можливість гнучко адаптувати механічну характеристику під умови руху. Тому векторне управління більш перспективне саме в асинхронному тяговому електроприводі.

Значення компонентів вектора напруги статора в нерухомій трифазовій системі координат (фазних напруг) формуються при допомозі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Частота ШІМ вибирається з мінімуму втрат у феромагнітному матеріалі та силових електронних ключах. Алгоритм ШІМ (векторна ШІМ) у сучасних АЧКЕД забезпечує максимальне використання напруги джерела постійного струму, що дає можливість зменшити фазні струми, а, значить, і теплові втрати у фазних обмотках. При векторній ШІМ реалізація вектора фазних напруг здійснюється за допомогою базових векторів у трифазній системі координат

Поряд з цим важливими критеріями вибору електродвигуна є мінімальна вартість, мінімальна маса, мінімум провідникових і феромагнітних матеріалів. Цього можна досягти, підвищуючи робочі оберти електродвигуна. В електромобілях і гібридних автомобілях робота електродвигуна, як правило, відбувається в широкому діапазоні обертів електродвигуна. Асинхронна електрична машина має просту і міцну конструкцію ротора, що дає можливість розширити робочий діапазон в область високих обертів і тим самим оптимізувати АЧКЕД за вказаними критеріями. Оскільки у зв'язку зі складними умовами експлуатації з підвищенням обертів тягового електродвигуна ускладнюється завдання забезпечення мінімальних вібрації та шумів.

Асинхронна електрична машина має просту й міцну конструкцію ротора, що дає можливість розширити робочий діапазон в область високих обертів і тим самим оптимізувати АЧКЕД за вказаними критеріями.

### 3. Вибір електродвигуна для тягового електроприводу.

Правильний вибір тягового електроприводу електромобіля або гібридного транспортного засобу дає можливість отримати необхідні технічні, екологічні та експлуатаційні.

При проектуванні тягових електродвигунів використовують різні критерії оптимальності. Для тягового двигуна електромобіля або гібридного автомобіля основним критерієм оптимальності можуть бути мінімальні втрати або максимум ККД. Це пов'язано з тим, що збільшення ККД напряду впливає на збільшення пробігу електромобіля протягом одного циклу розряду акумуляторної батареї (АБ). При цьому відбувається найбільш повне використання енергії АБ для корисної роботи. Досягненню цієї мети також служить здатність електродвигуна забезпечити рекуперативне гальмування і забезпечити мінімальний опір обертанню у знеструмленому стані. Цим критерієм достатньо добре задовольняє АЧКЕД.

Слід відмітити, що ККД у ВЕДПМ дещо вищий, ніж у АЧКЕД, однак, опір обертанню у знеструмленому стані в АЧКЕД суттєво менший. Електричне гальмування з рекуперацією енергії в АБ найбільш просто й ефективно досягається у ВЕДЕМ. В АЧКЕД здійснення цього режиму вимагає більш складних алгоритмів управління.

На рис. 2 представлені порівняльні характеристики, перерахованих типів вентильних двигунів при обмеженому струмі статора [10].

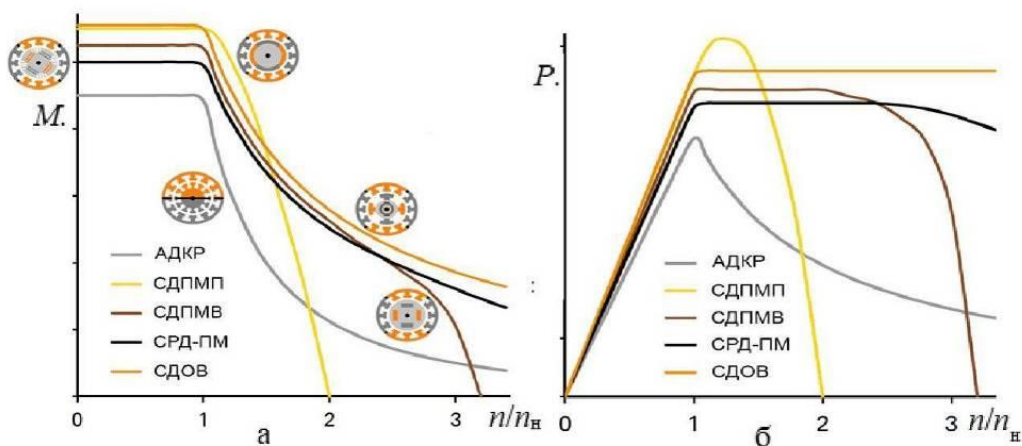


Рис. 2. Механічні характеристики електродвигунів різних типів:  
а – моментні; б – потужнісні

Вентильні системи синхронних і асинхронних двигунів відрізняються за ознакою напруги живлення – постійного струму BLDC і змінного РМАС струму.

Згідно наведеним характеристикам, найбільш придатними для застосування у якості тягових агрегатів на автомобілі є електродвигуни типу СРД-ПМ і СДОВ. Такі двигуни забезпечують високий ККД в широкому робочому діапазоні.

### 4. Розробка рекомендацій по створенню електродвигунів підвищеної надійності і ресурсу.

Незважаючи на переваги використання тягових електродвигунів в автомобілях їх ресурс не задовольняє вимогам надійності, забезпечення мінімальних шуму і вібрації.

Тяговий електродвигун автомобілів експлуатується з довільним чергуванням розгону, гальмування і руху з усталеною швидкістю, подоланням підйомів і спусків, короткочасний паркування на зупинках, заторах, світлофорах, перехрестях і «випадкового» механічного і електричного навантаження на систему тягового електроприводу [13]. Така динаміка роботи тягового електродвигуна у перехідних режимах призводить до збурення високих рівнів вібрації. В результаті, частка втомних поломок автомобільних деталей електродвигуна, викликаних вібрацією, становить від 60 % до 88 % від загальної кількості поломок.

Тому підвищення надійності і ресурсу автомобілів на електричній тязі залежить від створення тягових електродвигунів з рівнями вібрації, які не впливають шкідливо на технічний стан електродвигуна.

Джерела вібрації електромагнітного, механічного та аеродинамічного походження асинхронних двигунів детально розглянуті в роботах [14, 15], рис. 3. Вібрація електродвигуна є природною реакцією на дію внутрішніх і зовнішніх збурюючих сил. Висока універсальність, чутливість та вибірковість сигналів вібрації дає можливість діагностувати окремі дефекти і несправності та взаємозв'язок механічних, магнітних та електричних системах на холостому ходу при різних швидкостях і навантаженнях.

У вібраційному сигналі міститься інформація про стан компонентів структурних, функціональних і динамічних властивостей електродвигуна, що визначають його технічний стан, показником досконалості конструкції і технології виробництва [15, 16].

За вібраційними характеристиками електродвигунів при проектуванні визначають технічний рівень прийнятих рішень в виробництві, технічний рівень технологій виготовлення і складання електродвигуна. В експлуатації за допустимими рівнями прирощення вібрації [15, 17].

Відомі складні теоретичні методи розрахунків допустимих і заданих рівнів вібрації. Вони мають недостатню достовірність, оскільки не можуть урахувати багато конструктивних, технологічних і динамічних чинників технічного стану, які існують в реальних ЕД. Вплив цих чинників на реальну якість ЕД вимагає проведення великого обсягу експериментальних робіт, які полягають у доведенні ЕД до проектного технічного рівня шляхом розробки конструктивних і технологічних способів зниження вібрації макетних і дослідних зразків, вузлів та електродвигуна. Такі заходи дають можливість підвищити їх безвідмовність, довговічність, ресурс, зменшити шкідливий вплив на людину та довкілля, знизити витрати на технічне обслуговування автомобілів у цілому [15, 17, 18].

Створення асинхронних електродвигунів із заданими рівнями вібрації, а значить і надійності, пов'язане з оптимізацією численних конструктивних і технологічних завдань. З точки зору підвищення надійності та ресурсу найнебезпечнішими є вібрації в діапазоні частот від робочої частоти обертання до 10 кГц.

Для проектування асинхронних тягових електродвигунів розроблені методи нормування вібраційних характеристик в області частот від 5 Гц до 10000 Гц [15, 19], розроблені методи визначення допустимої вібрації [12, 15] і три класу вібрації (рис. 4) для якісної оцінки технічного рівня електродвигунів при частоті обертання  $3000 \text{ хв}^{-1}$ .



Рис. 3. Причини та джерела вібрації електромагнітного, механічного та аеродинамічного походження асинхронного електродвигуна

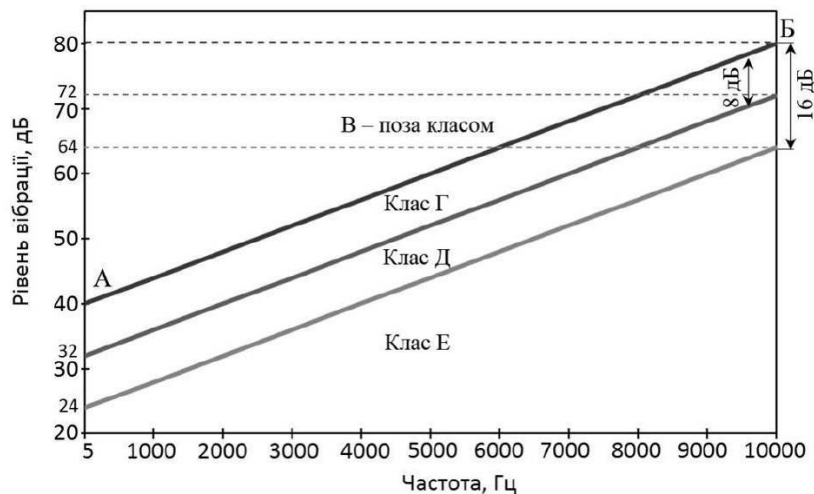


Рис. 4. Діапазони класів вібрації електродвигунів

Електродвигуни класу В з рівнями вібрації вище 48 дБ на частоті 5 Гц і 80 дБ на частоті 10 кГц мають знижену надійність порівняно з класом вібрації Г.

Клас Г з рівнями вібрації <40 дБ на частоті 5 Гц і <80 дБ на частоті 10 кГц.

Клас Д з рівнями вібрації <32 дБ на частоті 5 Гц і <72 дБ на частоті 10 кГц.

Клас Е з рівнями вібрації <24 дБ на частоті 5 Гц і <64 дБ на частоті 10 кГц.

Двигуни з рівнями вібрації вище прямої АБ (клас В) до використання в електромобілях не рекомендуються через високі рівні вібрації, які знижують надійність, прискорюють процеси спрацювання і шкідливо впливають на надійність електродвигуна і довкілля.

За рівні вібрації прийняті третьоктавні значення віброприскорень в децибелах (дБ) в області частот від 5 Гц до 10 кГц в режимі холостого ходу. В цій області частот проявляються вібрації, збурюванні всіма дефектами електродвигуна (рис. 3, 5).

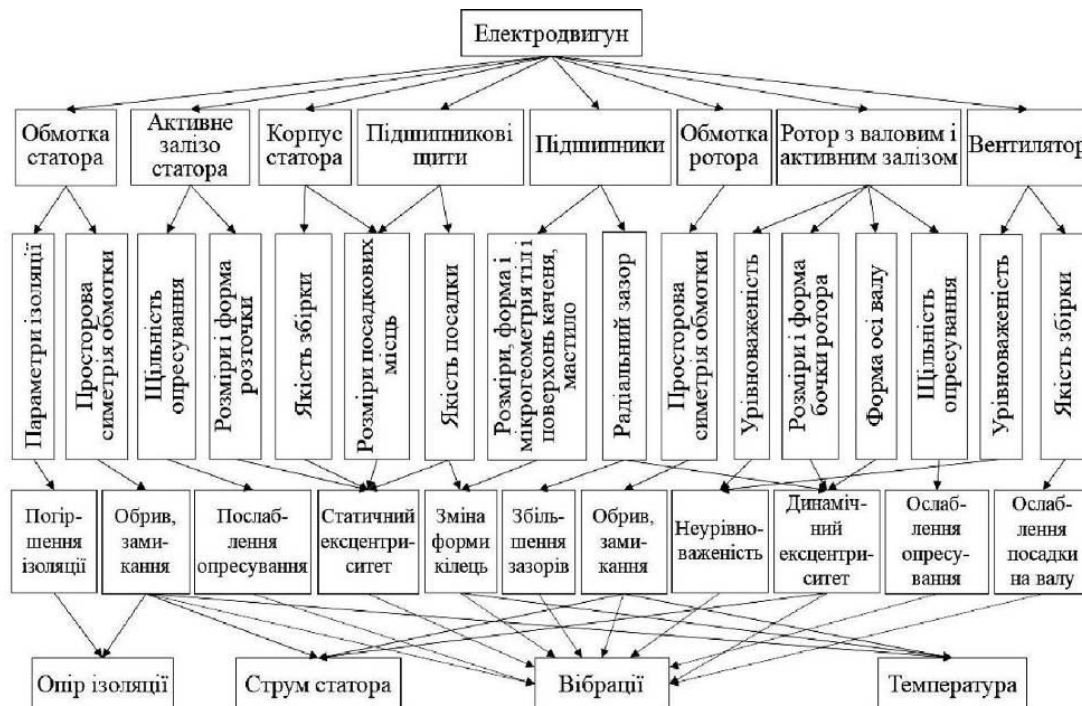


Рис. 5. Віброакустична граф-модель асинхронного електродвигуна

Перевищення норм вібрації розглядається як параметрична відмова електродвигуна. Експериментальне визначення допустимої вібрації і зв'язок вібрації з ресурсом машини показано в роботі [15].

### Обговорення

Визначене обладнання, методи і засоби контролю вібрації електродвигунів на відповідність нормам вібрації при проектуванні, встановленні і в експлуатації електродвигунів [12, 15, 19].

Розроблені методи проектування і доведення електродвигунів до заданих рівнів вібрації шляхом: призначення підшипників визначеного класу вібрації [20], конструктивних параметрів деталей підшипникових вузлів [15, 20]. Параметрів деталей електромагнітних систем: форми паза магнітопроводу ротора і статора, зазору між магнітопроводом статора і ротора, скосу пазів ротора, відбудови власних частот деталей електродвигуна [15], оптимізації жорсткості ротора. Удосконалення технології

виготовлення складання підшипникових вузлів і складання електродвигунів з двох незалежно контрольованих вузлів [15, 20].

### Висновки

1. Основним критерієм оцінки якості тягових електродвигунів є їх вібраційні характеристики в діапазоні частот від 5 Гц до 10000 Гц.
2. Рівень конструкторсько-технологічної якості створених тягових електродвигунів оцінюються за розподіленими класами рівнів вібрації.
3. Розроблені засоби доведення конструкції електродвигуна до заданого класу вібрації.
4. Описані методи і обладнання випробування і вимірювання вібрації.

### Список використаних джерел

1. Мигаль В.Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Х.: Майдан. 2018. 262 с.
2. Мигаль В.Д. Мехатронні та телематичні системи автомобілів: навч. посібник. Х.: Майдан. 2017. 314 с.
3. Мигаль В.Д., Шуляк М.Л., Шевченко І.О. Інтелектуальні системи тракторів і автомобілів, сервісний супровід: підручник. Х.: ДБТУ, Майдан. 2023. 246 с.
4. Hnatov A., Arhun S., Tarasov K., Hnatova H., Mygal V., Patlins A. Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. Presented at the 2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Riga, Latvia, October 7 2019. P. 1-6.
5. Burch I., Gilchrist J. Survey of Global Activity to Phase out Internal Combustion Engine Vehicles. Center of Climate Protection: Santa Rosa, CA, USA. 2018.
6. Du J., Ouyang M., Chen J. Prospects for Chinese Electric Vehicle Technologies in 2016-2020: Ambition and Rationality. Energy. 2017. 120. P. 584-596, doi:10.1016/j.energy.2016.11.114.
7. Anman M. Government Policy and the Development of Electric Vehicles in Japan. Energy Policy. 2006. 34. P. 433-443.
8. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Ponikarovska S., Hnatova A., Novichonok S. Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. EAI Endorsed Trans. Energy Web. vol. 7. no. 29. 2020. doi: 10.4108/EAI.13-7-2018.164101.
9. Zarma T.A., Galadima A.A., Aminu M.A. Review of Motors for Electric Vehicles. Journal of Scientific Research and Reports. Oct. 2019. P. 1-6. doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.
10. Бороденко Ю.М., Гнатів А.В., Аргун І.В. Мехатронні системи автомобіля. Частина 1. Силовий привід: підручник. Харків, ХНАДУ. 2023. 297 с.
11. Shymuk D., Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S., Mygal V., Kunicina N. Solving the problem of balancing and complete compensation of reactive power for a three-phase power supply system. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 7. 2020. <https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.163093>.
12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Dvadnenko V., Ponikarovska S. Substantiating the criteria for assessing the quality of asynchronous traction electric motors in electric vehicles and hybrid cars. J. Korean Soc. Precis. Eng. 36. 2019. P. 989-999. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.10.989>.
13. Hnatov A., Arhun S., Mygal V., Bisenieks M., Grants R., Ulianets O. Prospects for the Use of Electric Drives in Urban Passenger Vehicle Transport in Ukraine. Presented at the

2023 IEEE 64th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2023 – Proceedings. 2023.

14. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Kalinin E., Mysiura M. Functional and Engineering Methods of Upgrading the Quality of Induction Traction Electric Motors. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 8. 2021. P. 1-9. <https://doi.org/10.4108/eai.29-1-2021.168537>.

15. Мигаль В.Д., Аргун Ш.В. Вібраційна діагностика машин: проектування, виготовлення, експлуатація: монографія. Харків: Мачулін. 2024. 441 с.

16. Migal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova I., Shevchenko I. Assessing design and manufacturing quality of tractor gearboxes by their vibration characteristics. JVC Journal Vib. Control. 29. 2023. P. 1218–1228. <https://doi.org/10.1177/10775463211060899/>.

17. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics. Presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference. 2022.

18. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Hnatova H., Ulyanets O. System approach to the evaluation of the traction electric motor quality. EAI Endorsed Trans. Energy Web. 7. 2020. <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.162693>.

19. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Ulyanets O., Shevchenko I. Requirements for vibroacoustic methods of the quality assessment of vehicles traction electric motors. Noise Vib. Worldw. 2024. <https://doi.org/10.1177/09574565241243390>.

20. Migal V., Lebedev A., Shuliak M., Kalinin E., Arhun S., Korohodskyi V. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors. JVC Journal Vib. Control. 27. 2021. P. 1123-1131. <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>.

## References

1. Myhal' V.D. Intelektual'ni systemy v tekhnichniy ekspluatatsiyi avtomobiliv: monohrafiya, Kh.: Maydan, 2018, 262 p.

2. Myhal' V.D. Mekhatronni ta telematychni systemy avtomobiliv: navch. posibnyk, Kh.: Maydan, 2017, 314 p.

3. Myhal' V.D., Shulyak M.L., Shevchenko I.O. Intelektual'ni systemy traktoriv i avtomobiliv, servisnyy suprovod: pidruchnyk, Kh.: DBTU, Maydan, 2023, 246 p.

4. Hnatov A., Arhun S., Tarasov K., Hnatova H., Mygal V., Patlins A. Researching the model of electric propulsion system for bus using Matlab Simulink. Presented at the 2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON): Riga, Latvia, October 7 2019, pp. 1-6.

5. Burch I., Gilchrist J. Survey of Global Activity to Phase out Internal Combustion Engine Vehicles, Center of Climate Protection: Santa Rosa, CA, USA, 2018.

6. Du J., Ouyang M., Chen J. Prospects for Chinese Electric Vehicle Technologies in 2016-2020: Ambition and Rationality. Energy, 2017, 120, pp. 584-596, doi:10.1016/j.energy.2016.11.114.

7. Anman M. Government Policy and the Development of Electric Vehicles in Japan. Energy Policy, 2006, 34. pp. 433-443.

8. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Ponikarovska S., Hnatova A., Novichonok S. Determining the quality of electric motors by vibro-diagnostic characteristics. EAI Endorsed Trans. Energy Web., vol. 7, no. 29, 2020, doi: 10.4108/EAI.13-7-2018.164101.

9. Zarma T.A., Galadima A.A., Aminu M.A. Review of Motors for Electric Vehicles. Journal of Scientific Research and Reports, Oct. 2019, pp. 1-6, doi: 10.9734/jsrr/2019/v24i630170.

10. Borodenko Yu.M., Hnatov A.V., Arhun Sh.V. Mekhatronni systemy avtomobilya.

Chastyna I. Sylovyy pryvid: pidruchnyk, Kharkiv, KHNADU, 2023, 297 p.

11. Shymuk D., Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S., Mygal V., Kunicina N. Solving the problem of balancing and complete compensation of reactive power for a three-phase power supply system. EAI Endorsed Trans. Energy Web, 7, 2020, <https://doi.org/10.4108/EAI.13-7-2018.163093>.

12. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Dvadnenko V., Ponikarovska S. Substantiating the criteria for assessing the quality of asynchronous traction electric motors in electric vehicles and hybrid cars, J. Korean Soc. Precis. Eng., 36, 2019, P. 989-999, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2019.36.10.989>.

13. Hnatov A., Arhun S., Mygal V., Bisenieks M., Grants R., Ulianets O. Prospects for the Use of Electric Drives in Urban Passenger Vehicle Transport in Ukraine, Presented at the 2023 IEEE 64th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2023, Proceedings, 2023.

14. Mygal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Kalinin E., Mysiura M. Functional and Engineering Methods of Upgrading the Quality of Induction Traction Electric Motors, EAI Endorsed Trans. Energy Web, 8, 2021, pp. 1-9, <https://doi.org/10.4108/eai.29-1-2021.168537>.

15. Myhal' V.D., Arhun Sh.V. Vibratsiyna diahnostyka mashyn: proektuvannya, vyhotovlennya, ekspluatatsiya: monohrafiya, Kharkiv: Machulin, 2024, 441 p.

16. Migal V., Arhun S., Shuliak M., Hnatov A., Trunova I., Shevchenko I. Assessing design and manufacturing quality of tractor gearboxes by their vibration characteristics, JVC Journal Vib. Control, 29, 2023, pp. 1218–1228. <https://doi.org/10.1177/10775463211060899/>.

17. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Shuliak M. Evaluating the Quality of Design and Manufacture of Agricultural Tractors by Vibration Characteristics, Presented at the Transport Means - Proceedings of the International Conference, 2022.

18. Arhun S., Migal V., Hnatov A., Hnatova H., Ulyanets O. System approach to the evaluation of the traction electric motor quality, EAI Endorsed Trans. Energy Web, 7, 2020, <https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.162693>.

19. Migal V., Arhun S., Hnatov A., Ulianets O., Shevchenko I. Requirements for vibroacoustic methods of the quality assessment of vehicles traction electric motors, Noise Vib. Worldw., 2024, <https://doi.org/10.1177/09574565241243390>.

20. Migal V., Lebedev A., Shuliak M., Kalinin E., Arhun, Korohodskiy V. Reducing the vibration of bearing units of electric vehicle asynchronous traction motors, JVC Journal Vib. Control, 27, 2021, pp. 1123-1131, <https://doi.org/10.1177/1077546320937634>.