

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**АРГУН ЩАСЯНА ВАЛІКОВНА**



УДК 629.3

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ  
ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Бажинов Олексій Васильович,**  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри автомобільної електроніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент,  
**Кайдалов Руслан Олегович,**  
Національна академія Національної гвардії України, начальник кафедри бойового та логістичного забезпечення

доктор технічних наук, професор,  
**Дущенко Владислав Васильович,**  
Національний технічний університет «ХПІ», професор кафедри інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова

доктор технічних наук, доцент,  
**Шуляк Михайло Леонідович,**  
Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, професор кафедри тракторів і автомобілів

Захист відбудеться «18» березня 2020 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий « 3 » лютого 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О. П. Смирнов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На сьогодні основним джерелом енергії для автотранспортних засобів є двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). За даними екологів частка вихлопів автомобільного транспорту в загальному забрудненні у деяких містах складає майже 90 %. Отже технічний розвиток і світова урбанізація призвели до виникнення у великих містах низки екологічних проблем, збільшення захворювань, пов'язаних з забрудненням оточуючого середовища тощо. У багатьох розвинених країнах світу ці проблеми вирішують зменшенням у містах кількості автотранспортних засобів з ДВЗ, впровадженням екологічного громадського транспорту і заохоченням громадян міняти авто з ДВЗ на електрокари.

Дієвим і простим шляхом вирішення зазначених проблем в Україні є застосування електробусів як міського транспорту з альтернативними системами генерації електричної енергії і розбудова зарядної інфраструктури.

Для застосування електробусів як міського транспорту можна або переобладнувати автобуси і тролейбуси, або налагодити виробництво вітчизняних електробусів. Для вирішення цих задач в першу чергу необхідно обрати найважливіші складові електробуса, якими є тяговий електродвигун і тягове джерело енергії.

Від роботи електроприводу безпосередньо залежить технічний рівень і експлуатаційні властивості електробуса, тому до тягових електродвигунів (ЕД) пред'являються досить жорсткі вимоги. Щоб ЕД відповідали цим вимогам, необхідно ще на стадії проектування задавати їх технічний рівень, у відповідності до якого контролювати якість виготовлення, а на стадії експлуатації підтримувати технічний стан, вчасно діагностувати і після усунення пошкоджень проводити контроль якості ремонту.

Вибір тягового джерела електроенергії (ТДЕ) залежить від експлуатаційних вимог до електробуса, технічних і фінансових можливостей.

Ефективність експлуатації міського електробуса безпосередньо пов'язана з наявністю розгалуженої інфраструктури, що досягається розбудовою нових зарядних станцій (ЗС) і пунктів підзарядки або переобладнанням існуючих тягових підстанцій.

Вирішення зазначеного кола проблем потребує розвитку досліджень у напрямку розробки нових науково обґрунтованих методик та підходів до впровадження альтернативних системам генерування електричної енергії (АСГЕЕ) для міських електробусів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана згідно з «Національною транспортною стратегією України на період до 2030 року»; «Стратегічними напрямками розвитку транспортної галузі України у після кризовий період»; «Концепцією сталого розвитку населених пунктів», схваленою постановою Верховної Ради України від 24 грудня 1999 року; муніципальними програмами сталого розвитку міст України та регіональними програмами розвитку міського пасажирського транспорту. Робота відповідає сучасним тенденціям забезпечення сталого розвитку транспортних систем, сформованим у Білій книзі Європейської Комісії «План розвитку Єдиного європейського транспортного простору – на шляху до конкурентоспроможної та ресурсоефективної транспортної системи».

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень Харківського національного автомобільно-дорожнього університету з науково-дослідницьких тем: «Розробка системи енергозбереження та генерації електричної енергії для транспортних засобів» (ДР №0117U002406); «Розробка сонячної зарядної станції для електромобілів» (ДР №0119U001299).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення технічного рівня та експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту шляхом застосування електричного приводу і альтернативних систем генерації електричної енергії.

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:*

- проаналізувати сучасний стан міського пасажирського транспорту та обґрунтувати вимоги до обладнання електробусів у якості міського транспорту;
- дослідити електромеханічні процеси в силовій установці електробуса і в альтернативних системах генерації електричної енергії та розробити методи підвищення експлуатаційних властивостей електробуса шляхом використання альтернативних джерел енергії;
- вдосконалити методи створення об'єднаної системи генерації електричної енергії на транспорті для підзарядки міських електробусів за рахунок використання альтернативних систем генерації електричної енергії;
- розробити методологію комплексної оцінки електродвигунів тягового електроприводу;
- розробити метод оцінки технічного стану електродвигунів тягового електроприводу електробуса за вібродіагностичними характеристиками на стадіях проектування і експлуатації;
- дослідити ефективність впровадження електробуса у порівнянні з тролейбусом на прикладі типового міського маршруту;
- розробити рекомендації щодо розвитку, реконструкції та переоснащення підприємств експлуатації міського автотранспорту.

**Об'єкт дослідження:** процеси створення силових установок електробусів з заданими технічними характеристиками, а також інфраструктури для їх обслуговування.

**Предмет дослідження** – підвищення експлуатаційних властивостей міського електробуса.

**Методи дослідження.** Теоретичні і експериментальні дослідження, приведені в роботі, базуються на загальнонаукових методах системного аналізу проблем застосування електробусів у якості міського транспорту, силовій установці електробуса та енергоефективних систем генерації електричної енергії; методах математичного та імітаційного моделювання в програмному середовищі MathLab; на узагальненні діагностичних ознак вібраційних характеристик і статистичних даних щодо граничних значень вібраційних параметрів електродвигунів і їх зв'язку з технічним станом; на статистичних методах нормування діагностичних параметрів електродвигунів. Експериментальні методи дослідження систем генерації і збереження електричної енергії та вібродіагностичних характеристик електродвигунів базуються на натурних випробуваннях, методах вимірювання і спектрального аналізу вібраційних

характеристик, зіставлення та порівняння експериментальної вібрації початкової і зміненої конструкції, змінених режимах роботи і параметрів. Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася з використанням методів математичної статистики, зокрема методі критерію серій, заснованому на медіані вибірки і критеріїв квадратів послідовних відношень й методу непараметричного дисперсійного аналізу з використанням критерія Фрідмана.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що:  
*вперше:*

- запропоновано альтернативні системи генерації електричної енергії за рахунок розширення складу обладнання електробуса та розроблено принципи і методи їх розрахунку, що дозволяє підвищити експлуатаційні властивості міського пасажирського транспорту;

- запропоновано методологію комплексної оцінки електродвигунів тягового електроприводу побудовану на семирівневій ієрархії, яка пов'язує між собою напрямки і завдання розробки методів оцінки електродвигунів за рівнями вібрацій на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації, що дозволяє підвищити експлуатаційні властивості електробуса;

- визначено метод діагностування електродвигунів тягового електроприводу електробусів за показниками рівнів вібрації, що дозволяє оцінити їх технічний стан у відповідності до розроблених класів;

- визначено значення допустимих вібраційних прискорень електродвигунів тягового електроприводу електробуса, що дозволило розробити критерії оцінки їх експлуатаційної придатності;

*удосконалено* метод створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації електричної енергії:

- в електробусах, які на відміну від існуючих використовують лінійний електрогенератор та електричну машину обертового типу з триступневим мультиплікатором, що дозволяє збільшити запас їх автономного ходу;

- та в інфраструктурі, що призначена для зарядки міських електробусів, які на відміну від існуючих використовують пристрій примусового зниження швидкості з генеруванням електричної енергії та енергогенеруюче дорожнє покриття, що дозволяє зменшити споживання електричної енергії від мережі;

*отримав подальший розвиток* метод зниження рівня вібрації електродвигунів тягового електроприводу електробуса, що збуджується магнітними джерелами, який базується на зміні форми паза магнітопроводу ротора, що дозволило підвищити технічний рівень електродвигунів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційної роботи можуть використовуватися для підвищення ефективності експлуатації міського електробуса.

Запропоновані в дисертації наукові положення, розробки та рекомендації впроваджені:

- у науково-практичній діяльності ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж»». Використовуються експериментально визначені параметри зниження рівня вібрації, що збуджується магнітними джерелами, і базуються на виборі форми паза магнітопроводу ротора; метод визначення експлуатаційної придатності електродвигунів та рі-

вень їх технічної якості за вібродіагностичними характеристиками;

– у діяльності офіційного дилера Subaru у м. Харків та харківській області ТОВ «Альфа Центр Харків». Використовуються: метод створення систем генерації та збереження електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі (електричні машини різних типів з мультиплікатором), що дозволило збільшити ефективність перетворення кінетичної енергії в електричну для експлуатації автомобільного транспорту; визначені значення допустимих вібраційних прискорень електродвигунів, що дозволило за параметрами зниження вібрації відносно допустимих значень робити оцінку експлуатаційної придатності електродвигунів, визначати рівень їх технічної якості, визначати їх ресурс і розробити вимоги до вібраційних характеристик електродвигунів з метою підвищення їх конкурентоспроможності та ресурсу;

– у діяльність компанії ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС». Використовується метод створення системи генерації та збереження електричної енергії на базі триступеневого мультиплікатора, що дозволило за допомогою експериментального зразка енергогенеруючої панелі створити альтернативне джерело електричної енергії на території підприємства. Це дало можливість отримати безперебійне живлення у разі аварійного відключення напруги та знизити загальний рівень споживання електричної енергії на 2,7 %. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновки про доцільність одночасного використання декількох пристроїв, що збільшить ефективність даної пропозиції;

– у діяльність компанії «Elcars» (ФОП Сохін П. А.). Використовуються методи розширення зарядної бази електромобілів та електробусів завдяки малопотужним альтернативним системам енергозбереження та генерації електричної енергії і методи створення систем генерації та збереження електричної енергії на транспорті та в його інфраструктурі. Апробація і впровадження зазначених результатів дисертаційних досліджень дозволяє створювати системи генерації та збереження електричної енергії на транспорті та в його інфраструктурі з метою використання генерованої електроенергії для заряду тягових акумуляторних батарей електромобілів;

– у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

**Особистий внесок здобувача.** Положення та результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані автором самостійно та викладено в роботах [1-42]. Роботи [2-5, 16-18, 21, 35] опубліковані без співавторів. Особистий внесок дисертанта в колективних публікаціях полягає в такому: запропоновано метод розрахунку електробуса на суперконденсаторах [1, 27, 33], проведено аналіз першого і другого [6] етапів розвитку електромобілів; запропоновано схемну реалізацію «розумної дороги» [7, 28]; запропоновано схему енергогенеруючої плитки [8, 25]; досліджено енергоефективні методи ремонту автомобілів [9]; проведено дослідження енергогенеруючої сходинки з мультиплікатором [10, 32]; проведено аналіз існуючих інноваційних доріг [11]; проведено вибір методу оцінки якості асинхронних електродвигунів [12]; проведено експериментальне дослідження енергогенеруючої плити з електромашиною [13, 34]; проведено розрахунок енергії, що виробляє енергогенеруюча панель [14]; проведено порівняльний аналіз використання різних типів автобусів одного класу [15, 31]; проведено обробку експериментальних досліджень

запуску ЕД в різних режимах [19]; проведено аналіз результатів експериментальних досліджень [20, 39, 40]; у колективній монографії [22] автору належать розділи 1, 4, 5; у монографії [23] – розділи 3, 5, 6; проведено аналіз розвитку існуючих сонячних зарядних станцій для електричного транспорту [24]; вибір тягових акумуляторних батарей для електромобілів [26]; проведено розрахунок панелей дорожнього покриття для системи «Розумні дороги» [29]; проведено дослідження блоку накопичення енергії [30]; проведено розрахунок витрат автобусів при роботі на обраному маршруті [36]; розкрито принцип функціонування розумної дороги [37]; запропонована концепція моніторингу енергії, що генерує енергогенеруюча панель [38]. У патенті [41] автору належить принцип, послідовність роботи елементів пристрою; у патенті [42] – структурна схема пристрою.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи» (Харків, ХНАДУ, 2017 р.); II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» (Харків, ХПІ, , 2018 р.); V-й Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (Харків, ХНАДУ, 2017 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (Харків, ХАІ, 2016 р.); X-й міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінниця, ВНТУ, 2017 р.); II-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Херсон, ХДМА, 2017 р.); VI-й Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (Харків, ХНАДУ, 2018 р.); III-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2018 р.); 7-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, ХДМА, 2016 р.); II-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Львів, НУ «Львівська політехніка, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство» (Херсон, ХДМА, 2017 р.); International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» ( Włocławek, Republic of Poland: Izdevniecība «Baltija Publishing», 2018 p.); IEEE 38th International Conference on «Electronics and Nanotechnology» (Київ, НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018 p.); IEEE First Ukraine Conference on «Electrical and Computer Engineering» (Київ, НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2017 p.); IEEE International Conference on «Energy and Sustainability in Small Developing Economies» (Funchal, Universidade da Madeira, 2018 p.); 22nd International Scientific Conference «Transport Means 2018» (Kaunas, Kaunas University of Technology, 2018 p.); 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on «Power and Electrical Engineering» (Riga, Riga Technical University, 2018 p.)

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась, обговорювалась і отримала позитивну оцінку на сумісному науковому семінарі кафедри автомобілів

ім. проф. А. Б. Гредескула, кафедри автомобільної електроніки і кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів ХНАДУ (м. Харків, ХНАДУ, 18 вересня 2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 42 наукових працях, у тому числі: 2 монографії, 21 публікація у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 21 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз, у тому числі 7 публікацій у виданнях, що індексуються у Scopus і Web of Science і з них 4 публікації у виданнях, віднесених до кuartилів Q2 та Q3); 17 тез у збірниках доповідей наукових конференцій (з них 5 у виданнях, що індексуються у Scopus і Web of Science), отримано 2 патенти.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 367 сторінок, у тому числі основного тексту 284 сторінки і 3 сторінки, площа яких повністю зайнята рисунками та таблицями. Робота ілюстрована 96 рисунками, наведено 41 таблицю. Додатки розміщені на 33 сторінках. Список використаних літературних джерел складається із 220 найменувань на 23 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, описано застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про апробацію та публікацію результатів досліджень.

У **першому розділі** розкриті характеристики об'єкта та предмета дослідження, проведено аналіз перспектив розвитку автомобільного транспорту з електричним приводом, представлено переваги та недоліки експлуатації електробусів (ЕБ) у порівнянні з існуючим міським дорожнім транспортом, проведено аналіз витрат енергоресурсів для порівняння автобусів різних типів та наведені основні сучасні напрями підвищення експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту.

Дослідженнями, спрямованими на підвищення експлуатаційних властивостей пасажирського транспорту на електричній тязі та АСГЕЕ, в різних аспектах свого часу займалися такі науковці: В. І. Заруденко; О. О. Мельник, С. М. Пересада, О. В. Драга, С. М. Ковбаса, О. І. Гула, Ю. Л. Крайник, В. Я. Двадненко, А. Cavallini, G. C. Montanari, О. В. Бажинов, В. Я. Двадненко, О. П. Смирнов, М. Tozzi, В. Г. Тонких, В. В. Грабко, В. Петухов, В. Соколов, О. Ю. Вовк, Л. М. Безменнікова, А. Ю. Вовк, С. О. Квітка, О. В. Шефер, В. М. Галай, В. В. Крицький, А. Кавалліні, В. А. Войтенко, В. А. Водічев, К. И. Семенов, М. В. Матковский, С. В. Войтків, Л. А. Скрипко, А. А. Исупов, С. П. Якубович, А. И. Кункевич, Ю. К. Толстокорова, Д. О. Затилюк, В. Будко, Л. Петраковский, Т. В. Голубчик, А. Н. Чусов, Y. Zheng, Z. Y. Dong, Y. Xu, K. Meng, Л. Д. Стадник, В. О. Колесніков, А. І. Басараб, L. Ali, Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк, В. І. Бudyко та інші.

Проведено порівняльний аналіз переваг та недоліків ЕБ з існуючим міським дорожнім транспортом, а також аналіз експлуатаційних витрат автобусів одного класу (дизельних, гібридних і електричних) для міських умов експлуатації, який показав,



що добові витрати на ЕБ в 2 рази менші, ніж на гібридний автобус і в 2,5 рази, ніж на автобус з ДВЗ. Це дає можливість висунути гіпотезу, що застосування ЕБ і впровадження АСГЕЕ в транспортну інфраструктуру сприятиме енергозбереженню і дозволить підвищити експлуатаційні властивості міського пасажирського транспорту.

Для України переобладнання уживаних автобусів і тролейбусів та виробництво нових вітчизняних електробусів є перспективним шляхом переходу на ЕБ. Але для цього необхідно вирішити ряд науково-технічних питань: обрати найважливіші складові тягової системи (тяговий електродвигун ЕД і тягове джерело електричної енергії (ЕЕ)) та облаштувати зарядну інфраструктуру.

Від якості тягового ЕД безпосередньо залежить ефективність експлуатації ЕБ, тому до ЕД ставляться серйозні вимоги, тому на стадіях проектування, виробництва і експлуатації є необхідним нормування і контроль ЕД.

Ще один важливий елемент ЕБ – тягове джерело ЕЕ. Його вибір залежить від експлуатаційних вимог до ЕБ, технічних характеристик маршруту, на якому він буде працювати, також від фінансових можливостей. До основних вимог до тягових накопичувачів енергії можна віднести: швидкість заряду; ємність (автономність ходу); вартість; робочі температури; гарантійний строк експлуатації і технічні можливості зарядної інфраструктури. Крім того, цей вибір безпосередньо пов'язаний з інфраструктурою, яка повинна мати відповідні ЗС, точки підзарядки, а також АСГЕЕ. Крім зарядних станцій, що живляться від мережі, необхідно розробляти АСГЕЕ, які стануть додатковим джерелом енергії. Об'єднання різних АСГЕЕ в єдину систему дозволить підвищити ефективність експлуатації міського ЕБ.

У другому розділі досліджено основні технічні характеристики ЕБ, проведено обґрунтування вибору тягового джерела ЕЕ для нього, визначено критерії оптимальності вибору тягового ЕД, досліджено автоматичне управління АД і представлено метод розрахунку його основних параметрів, досліджено модель електричної силової установки ЕБ в програмному середовищі MathLAB Simulink.

Тягове зусилля  $F_T$ , що розвивається тяговим ЕД на ведучих колесах, і швидкість транспортного засобу (ТЗ)  $V$ , м/с, визначаються:

$$F_T = T_d \cdot i_n \cdot i_0 \cdot \eta_T / r_B; \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi \cdot N_d \cdot r_B}{30 i_n \cdot i_0}, \quad (2)$$

де  $T_d$ ,  $N_d$  – вихідний момент двигуна і швидкість в об/хв, відповідно;

$i_n$  – передавальне відношення передач;

$i_0$  – передавальне число кінцевого приводу;

$\eta_T$  – ефективність всієї трансмісії від двигуна до ведучих коліс;

$r_B$  – радіус ведучих коліс.

Основні характеристики ЕБ включають максимальну крейсерську швидкість, здатність долати підйоми та його прискорення. Максимальна швидкість ТЗ знаходиться в точці перетину кривої тягового зусилля з кривою опору коченню та аеродинамічного опору. Максимальний підйом, який ТЗ може подолати на даній швидкості, розраховується за допомогою виразу:

$$i = F_{T-net} / (M_{T.3} \cdot g) = [F_T - (F_r + F_\omega)] / (M_{T.3} \cdot g); \quad (3)$$

$$F_{T-net} = F_m - F_r - F_\omega,$$

де  $F_{T-net}$  – чисте тягове зусилля;

$F_T$  – тягове зусилля на ведучих колесах;

$F_r$  – опір коченню шини;

$F_\omega$  – аеродинамічний опір;

$M_{T.3}$  – загальна маса транспортного засобу.

Однак на низьких швидкостях здатність долати підйоми набагато вища. Розрахунки, засновані на виразі (2.4), приведуть до помилки значущості. Замість цього слід використовувати рівняння (2.5):

$$\sin \alpha = \left( d - f_r \sqrt{1 - d^2 + f_r^2} \right) (1 + f_r^2), \quad (4)$$

де  $d = (F_T - F_\omega) / M_{T.3}g$  – коефіцієнт продуктивності транспортного засобу;

$f_r$  – коефіцієнт опору коченню.

Для ЕБ більш важливою є максимальна крейсерська швидкість і здатність долати підйоми, ніж ефективність прискорення (на відміну від легкових автомобілів), тому що вимога у прискоренні визначає потужність приводу ЕД.

Характеристики, описані вище визначають потужність силової передачі ЕД, та у звичайних умовах водіння ці максимальні можливості використовуються не часто. Протягом більшої частини робочого часу ЕД працює з частковим навантаженням. Фактичне тягове зусилля (потужність) і швидкість ТЗ сильно різняться залежно від умов експлуатації. Ці зміни пов'язані з дорожньою обстановкою, а також з типом ТЗ.

Важливою характеристикою ЕБ є його енергоспоживання – це загальна вихідна потужність на клеммах ТДЕ. Для приведення ЕБ в рух вихідна потужність ТДЕ повинна дорівнювати сумі потужності опору і втратам потужності в трансмісії і приводі ЕД, включаючи втрати потужності в електроніці. Втрати потужності в трансмісії і приводі ЕД залежать від їх ККД ( $\eta_T$  і  $\eta_D$  відповідно).

Таким чином, вихідна потужність батареї  $P_{б.вих}$  без врахування нетягового навантаження (допоміжного) і потужність рекуперативного гальмування на клеммах ТДЕ  $P_{б.вх}$  можуть бути виражені як:

$$P_{б.вих} = \frac{V}{\eta_T \eta_D} (M_{T.3} g (f_r + \xi) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}); \quad (5)$$

$$P_{б.вх} = \frac{\alpha V}{\eta_T \eta_D} (M_{T.3} g (f_r + \xi) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}), \quad (6)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, що характеризує форму ТЗ;  $A_f$  – фронтальна зона електробуса;  $\rho$  – щільність повітря;  $\delta$  – коефіцієнт маси, який представляє собою вплив обертових компонентів в силовій передачі;  $\xi$  – нахил дороги;  $\alpha$  – кое-

фіцієнт рекуперативного гальмування, який є відсотком від загальної енергії гальмування, що може бути використана ЕД ( $0 < \alpha < 1$ ).

Коефіцієнт рекуперативного гальмування  $\alpha$  залежить від прикладеної сили гальмування і конструкції силового агрегату.

Чисте споживання енергії від батарей становить:

$$E_{\text{вих}} = \int_{\text{тяга}} P_{\text{б.вих}} dt + \int_{\text{гальм.}} P_{\text{б.вх}} dt. \quad (7)$$

Ефективність тягового ЕД залежить від його робочих точок на площині швидкість-крутний момент (швидкість-потужність), де існує найбільш ефективна робоча область. При проектуванні ЕД ця зона повинна перекриватися або, принаймні, бути якомога наближеною до зони найбільшої ефективності.

Вартість тягового накопичувача енергії складає близько 40 % від загальної вартості ЕБ, тому його правильний вибір і визначення оптимальних характеристик експлуатації дозволить підвищити експлуатаційні властивості ЕБ.

При виборі ТДЕ для ЕБ важливими є наступні характеристики: висока щільність енергії, яка може бути досягнута за один заряд (для забезпечення необхідної дальності пробігу); висока щільність енергії, що дозволяє досягти стабільної потужності з глибокими характеристиками розряду; тривалий термін служби без обслуговування і складних захисних систем; масо-габаритні показники; робоча температура та ціна.

Проведений аналіз зарядних характеристик з кількісним і якісним порівнянням показників накопичувачів енергії різних видів показав, що для міських ЕБ у якості тягового накопичувача енергії краще всього використовувати суперконденсатори (СК), бо вони здатні без шкоди для себе миттєво сприймати дуже великі струми. До того ж, СК можуть дуже швидко заряджатися (наприклад, під час посадки/висадки пасажирів) і мають найбільший термін служби (кількість зарядів/розрядів може досягати мільйона).

Для дослідження СК запропоновано спрощену еквівалентну схему, рис. 1,а, де  $L$  – індуктивність,  $R_{\text{епо}}$  – еквівалентний послідовний опір, який спричиняє втрату енергії під час заряду та розряду СК, а  $R_{\text{п}}$  – еквівалентний паралельний опір, який імітує втрати енергії за рахунок саморозряду СК.

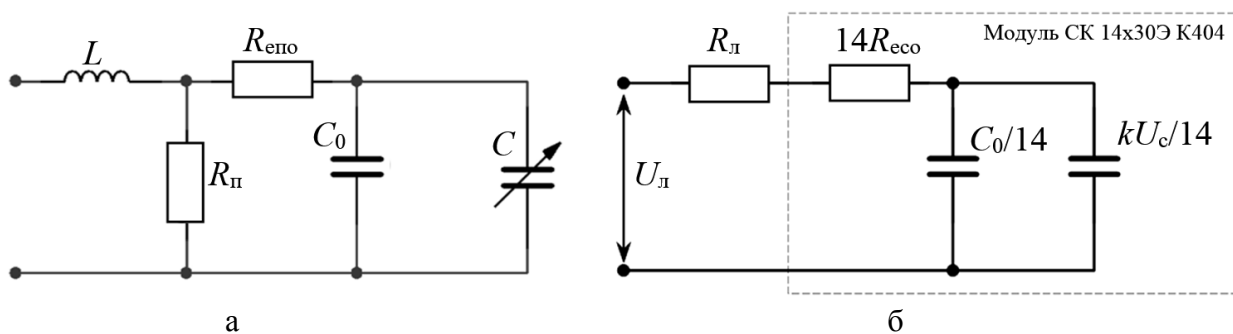


Рисунок 1 – Спрощена еквівалентна схема: а – СК; б – СК 14×30ЭК404

Загальна ємність СК залежить від його напруги, значення якої можна виразити через постійний і змінний конденсатор, що лінійно змінюється залежно від напруги

елементу  $U_c$ . Отже, еквівалентну ємність можна виразити як  $C_k = C_0 + k \cdot U_c$ .

Опір резистора  $R_{\pi}$  завжди вище, ніж  $R_{\text{ЕКО}}$ , і ним можна знехтувати під час швидкого заряду/розряду;  $L$  – індуктивність, що виникає, головним чином, від фізичної побудови СК, і, як правило, дуже мала.

СК модуль, використаний у даному дослідженні, складається з 14 СК, з'єднаних послідовно. Кожен СК має робочу напругу 45 В, загальна напруга становить 630 В. Загальна спрощена електрична модель СК, представлена на рис. 1, б.

Загальна ємність 14 послідовних СК знаходиться з виразу:

$$C_{\text{зар.}} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_{14}} = \frac{C}{14} = \frac{C_0 + kU_c}{14}. \quad (8)$$

Повний еквівалентний послідовний опір знаходиться з виразу:

$$R_{\text{ЕКО}} = 14 \cdot R_{\text{ЕКО}}. \quad (9)$$

У відповідності до закону Кірхгофа, отримаємо рівняння заряду СК:

$$(R_{\pi} + R_{\text{ЕКО}})i + \frac{1}{C_{\text{зар.}}} \int idt = U_{\text{зар.}}. \quad (10)$$

Пропустивши математичні перетворення, отримаємо рівняння у момент перемикавання, тобто коли  $t = 0^+$ :

$$R_{\text{ЕКО}}i(0^+) - \frac{1}{C_{\text{зар.}}} \int i(t)dt = U_0, \\ u_r(t) = ke^{\frac{1}{R_{\text{ЕКО}} \cdot C_{\text{зар.}}} t}. \quad (11)$$

Отже, напруга на клеммах суперконденсатора буде дорівнювати:

$$u_k(t) = u_r(t) + u(t). \quad (12)$$

Кінцева напруга на СК при розряді становить:

$$u_k(t) = u(t) - u_r(t). \quad (13)$$

Одним з основних параметрів СК є величина його послідовного опору, яким обумовлені всі внутрішні втрати. Ефективність СК залежить від того, як вони заряджаються або розряджаються. Тому на стадії вибору параметрів СК дуже важливо оцінити їх енергоефективність на різному рівні робочої напруги. Це буде основою для розробки силової електроніки, яка контролюватиме струм і напругу для навантаження та розвантаження, що оптимізує роботу СК.

На енергоефективність впливають значення внутрішнього опору  $R$  та ємності  $C$ . Взаємозв'язок між ефективністю та часом розрядки СК описується виразом:

$$\eta_{\text{еф.}} = e^{(2R_{\text{ЕПО}} \cdot C_{\text{заг.}} / t_{\text{розр.}})} \quad (14)$$

Час розряду знаходиться за виразом:

$$t_{\text{розр.}} = -(R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}})C_{\text{заг.}} \ln \left[ \frac{(R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}})d}{2R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}}} \right], \quad (15)$$

де  $R_{\text{н}}$  – функція напруги  $u$ , оскільки струм  $i$  під час розряду був встановлений постійним.

Побудована електрична модель і отримані вирази описують роботу СК і можуть бути використані при виборі СК для міського ЕБ.

Крім ТДЕ для міського ЕБ необхідно обрати тяговий ЕД. При проектуванні тягових ЕД використовують різні критерії оптимальності. Для тягового ЕД ЕБ основним критерієм оптимальності можуть бути мінімальні втрати або максимальний ККД. Це пов'язано з тим, що збільшення ККД безпосередньо впливає на збільшення пробігу ЕБ протягом одного циклу розряду ТДЕ. Досягненню цього також служить здатність ЕД забезпечити рекуперативне гальмування і мінімальний опір обертанню в знеструмленому стані. Цим критерієм досить добре задовольняє асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (АДКР).

АДКР в тяговому приводі ЕБ має низку переваг: конструктивно простий; має хороші пускові і регульовальні властивості двигуна постійного струму, крім того, при векторному регулюванні є можливість роздільного управління моментом і полем, що дозволяє гнучко адаптувати механічну характеристику під умови руху.

Аналіз роботи асинхронного двигуна (АД) в різних умовах практично неможливий без врахування параметрів, які визначають частоту обертаючого поля, ковзання, частоту струму ротору, обертаючого моменту.

Механічні характеристики АД можуть бути визначені з характеристик момент-ковзання, якщо врахувати, що швидкість обертання пов'язана з ковзанням залежністю  $n = n_1(1 - s)$ . Тоді рівняння механічної характеристики визначається виразом:

$$n = n_1 - \frac{n_1 \omega_1 R_2}{3pU_1^2} \cdot M \quad (16)$$

При використанні АД в системах автоматичного управління (САУ) необхідно вміти достатньо просто та точно визначати критичне ковзання. Проведено розрахунок критичного ковзання з використанням технічних даних АД:

$$S_k = \sqrt{\left[ S_H (M_n^* - 1) \right] / \left[ 1 - S_H (3M_n^* - 2) \right]}; \quad (17)$$

де  $M_k^* = M_k / M_{H*}$  – відносне значення критичного моменту АД;

Якщо відомі величини  $R_1$ ,  $R_2'$ ,  $X_k$ , то доцільно використовувати формулу:

$$S_k = R_2' / \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \quad (18)$$

Проведений розрахунок та аналіз дозволяють зробити такі висновки.

1. При підключенні АД до мережі живлення значення намагнічуючого струму  $I_0$  встановлюється не миттєво, змінюючись за експоненціальним законом зі сталою часу, яка дорівнює  $T_e$ . Значення  $T_e$  необхідно враховувати при розрахунку перехідних процесів в АСУ електроприводом з АД.

2. Порівняння величин сталих часу електромагнітної ( $T_e$ ) та електромеханічної ( $T_m = J_d \cdot \omega_n / M_n$ ) для частоти 50 Гц показує, що їх обидві необхідно враховувати при розрахунках перехідних процесів. На частоті  $f_1 > 50$  Гц електромагнітні процеси протікають швидше, тому електромагнітна стала часу буде значно менше. Тобто при підвищенні частоті електромагнітну сталу часу можна не враховувати.

3. Для розрахунку опору  $R_2'$  доцільно використовувати формулу, Ом:

$$R_2' = M_n \cdot \omega_n / 3I_2'^2, \quad (19)$$

де  $I_2'^2 = I_{1n}^2 - I_0^2$ ;  $I = I_0^* I_{1n}$ ;  $I_0^*$ ;  $I_{1n} = 10^3 P_n / (\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n \eta_n)$ ;

$I_0$  – відносне значення струму холостого хода.

Для представлення повної картини роботи ЕБ змодельовано роботу його електричної силової установки, що дозволило дослідити хід протікання електромеханічних процесів в його електрообладнанні. Знаючи яким чином та як протікають процеси, можна більш ефективно проводити вибір складових електрообладнання, що, в решті решт, повинно привести до підвищення ефективності роботи електробуса.

Проведено дослідження моделі функціональної силової установки ЕБ з блоком накопичення енергії на СК в програмному середовищі MathLAB Simulink з отриманням основних характеристик протікання електричних та електромеханічних процесів в обладнанні. Модель силової установки ЕБ для міських перевезень представлено на рис. 2. Запропонована схема дає можливість дослідити роботу електричної силової установки при різних навантаженнях.

В основі вище приведеної схеми лежить векторний принцип управління АД, що дозволяє незалежно і практично безінерційно регулювати швидкість обертання і момент на валу ЕД. Головна ідея векторного управління полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу.

Для вимірювання сигналів з кожного блоку моделі була побудована розширена модель електробуса. Проведено обробку результатів моделювання електричної силової установки ЕБ і їх аналіз. Завдяки блоку *Workspace* (рис. 2) можна записувати показання ЕД, бо до цього блоку підведені відомості про його швидкість, струми статора, електромагнітний момент. За результатами моделювання, скориставшись даними, що були записані в цьому блоку, побудовано механічну характеристику АД, рис. 3,а. та залежності швидкості обертання, електромагнітного моменту та струмів статора від часу, рис. 3,б.

Як видно з графіків, характер залежностей відображає фізичну картину зміни енергетичних характеристик у часі, що суттєво для аналізу і оптимізації в заданих режимах роботи. Крім того, модель дозволяє визначити часткові втрати енергії на кожній ділянці системи.

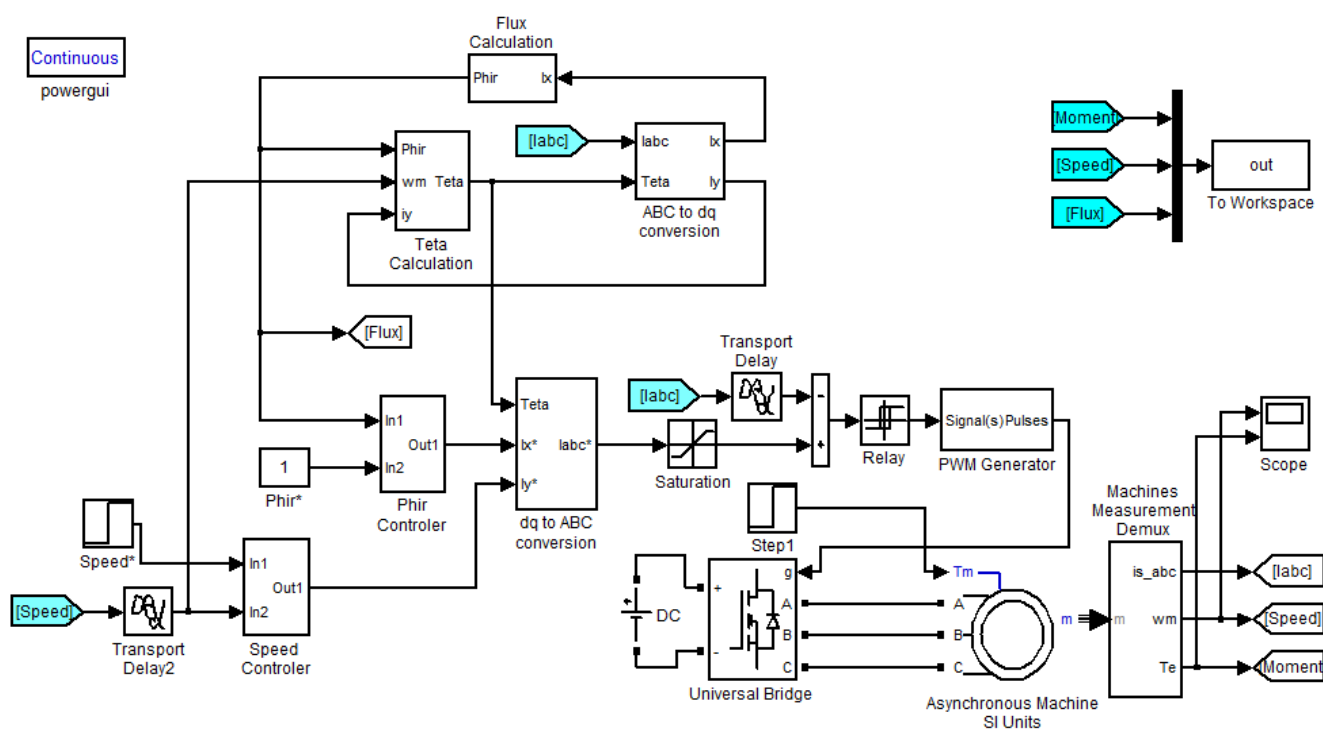
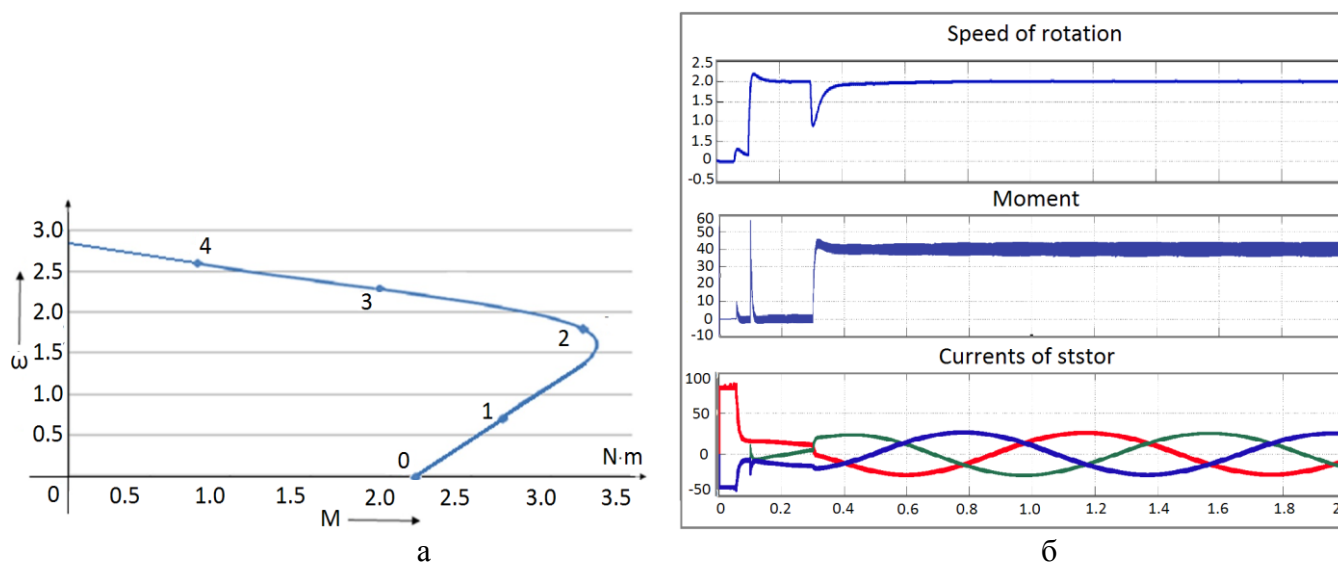


Рисунок 2 – Модель електричної силової установки електробуса



а – механічна характеристика АД; б – результати дослідження роботи моделі силової установки ЕБ у програмному середовищі Matlab Simulink

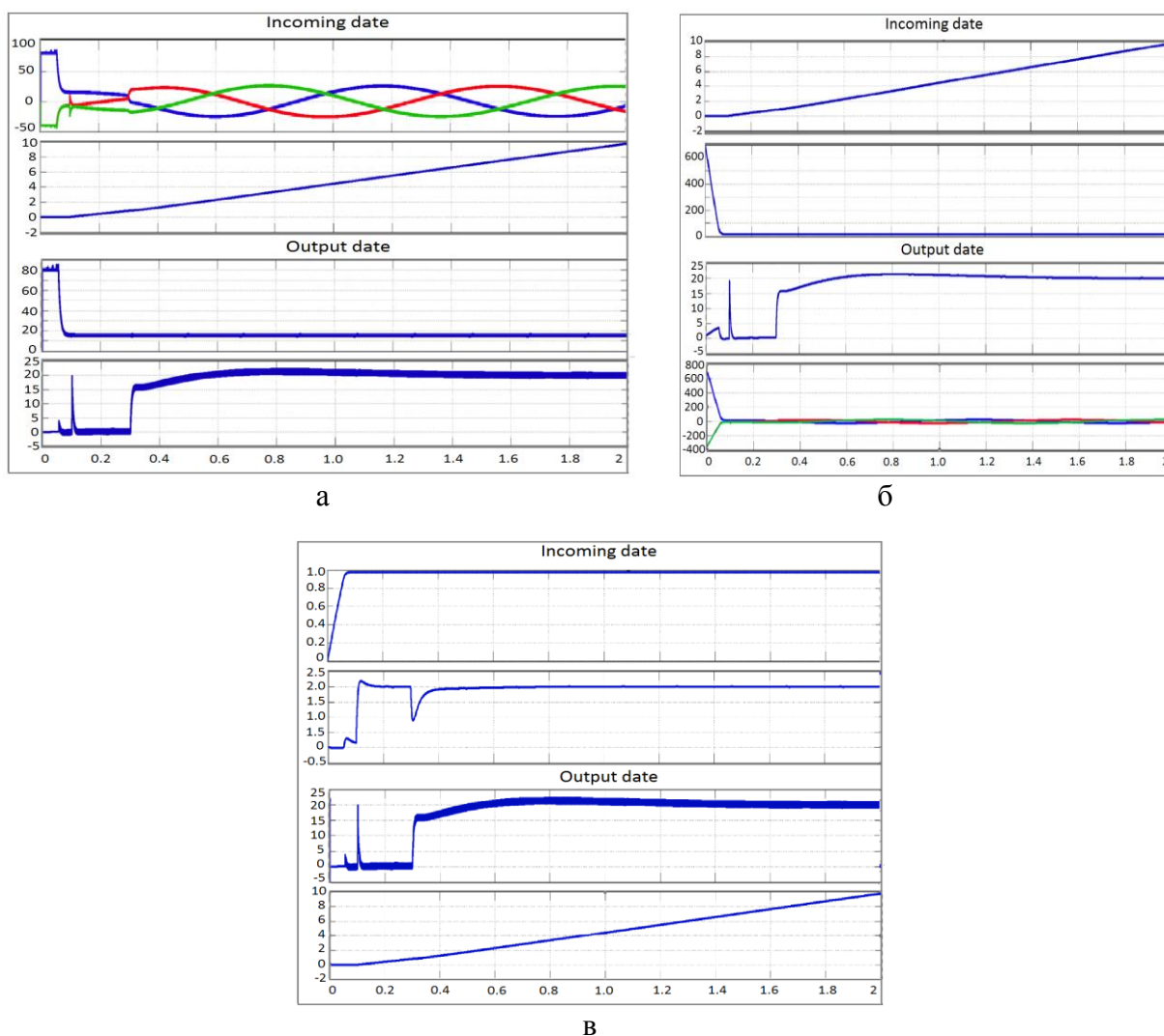
Рисунок 3 – Дослідження АД

На рис. 4 представлено вхідні та вихідні данні трьох блоків, рис. 2.

Аналіз отриманих характеристик перехідних процесів, показує, що запропонована електрична силова установка ЕБ на базі АД здатна: здійснити плавний розгін двигуна до номінальної частоти обертання при запуску, при цьому підвищення електромагнітного моменту не перевищує критичного значення; здійснити плавне регулювання частоти обертання в заданому діапазоні; при різкому збільшенні навантаження електропривод здійснює стабілізацію частоти обертання.

Аналіз отриманих результатів модулювання роботи АД в електроприводі ЕБ підтверджений проведеними розрахунками; система управління працює згідно

прийнятих налаштувань, що впливає з порівняння отриманих результатів з типовими характеристиками АД.



а – ABC to dq conversion; б – dq to ABC conversion; в – Theta Calculation  
Рисунок 4 – Вхідні та вихідні сигнали блоків

Моделювання векторної системи управління АД дозволяє виключити помилки і неточності при проектуванні системи управління АД, а також провести налагодження алгоритмів управління в різноманітних режимах роботи.

У **третьому розділі** представлено методи створення АСГЕЕ на транспорті та його інфраструктурі, проведено теоретичні і експериментальні дослідження електромеханічних процесів в альтернативних джерелах ЕЕ та розроблено модель лінійної оптимізації інфраструктури швидкої зарядки для міських електробусів.

Розробка АСГЕЕ потребує визначення основних вимог до транспортної інфраструктури, яка буде забезпечувати безперебійне функціонування ЕБ. До цих вимог відносяться: сумісність ЕБ із зарядними пристроями; відповідність кількості ЗС кількості ЕБ; потужність ЗС; органічна інтеграція в інфраструктуру міста; сумісність ЗС з енергосистемою.

Від правильного вибору типу ЗС і способу зарядки залежить безперебійність і ефективність експлуатації ЕБ. До основних видів і способів зарядки ЕБ відносяться:



- ручна зарядка зі стаціонарних швидких ЗС потужністю 50...300 кВт;
- автоматична зарядка, що ділиться на: зарядку через пантограф, підключення з-під автомобіля, підключення з боку автомобіля і індуктивну зарядку.

Ручну зарядку доцільно використовувати для ЕБ, що заряджаються або на кінцевих зупинках, або в депо вночі. Якщо ЕБ треба заряджати швидко, наприклад, на зупинках під час посадки/висадки пасажирів, то потрібна автоматична зарядка.

Для експлуатації ЕБ в умовах міста пропонується модернізувати наявні тягові підстанції (ТП), що подають напругу на контактну мережу існуючих фідерних комірков, додавши адаптовану комірку фідерного автомата, суміщену з перетворювальним модулем. В районі підключення кабелю до контактної мережі організується пункт підзарядки ЕБ за допомогою пантографа. Такий пункт технологічно простий і не містить силових перетворювачів. Вся силова електроніка і комутаційне обладнання розташовані на ТП. Можливий струм заряду від 500 А до 1000 А.

Впровадження АСГЕЕ на транспорті та в його інфраструктурі є однією зі складових, що дозволить підвищити ефективність експлуатації міських ЕБ, рис. 5.

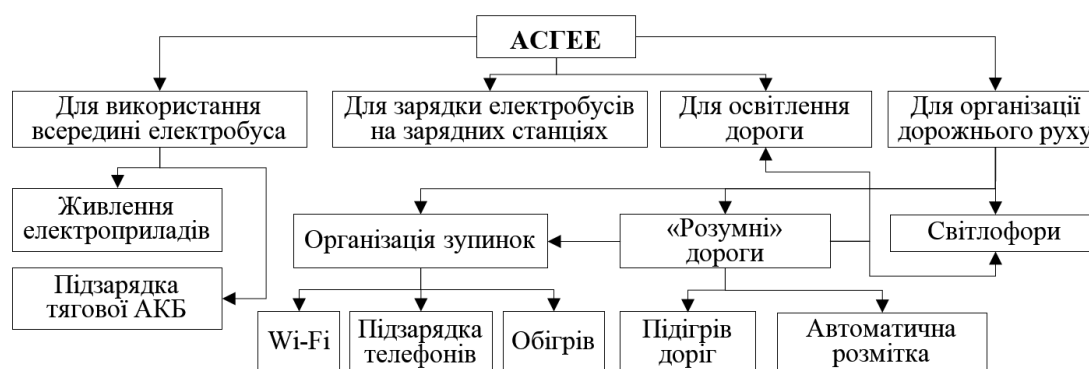


Рисунок 5 – Способи використання ЕЕ, що генерована АСГЕЕ

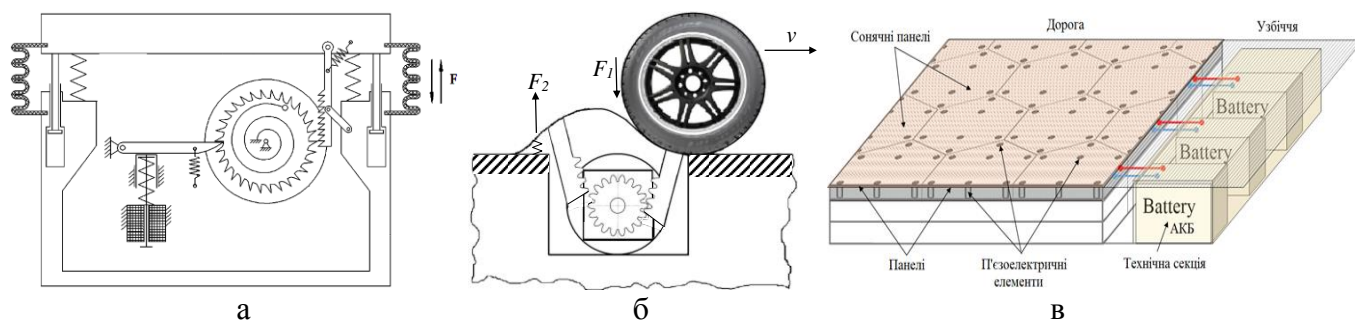
На рис. 6 представлено розроблені і запатентовані приклади АСГЕЕ, які призначені для використання в ЕБ та в транспортній інфраструктурі. Ці системи відносяться до електричних генераторів та можуть бути використані для перетворення кінетичної енергії в електричну.

Для вибору схеми підключення ЕД у електромашинному вузлі пристрою (рис. 6,а,б) було розроблено експериментальний зразок і проведено дослідження, метою яких було визначення енергетичних характеристик різних типів електричних машин (двигуна постійного струму (ДПС) та крокового двигуна (КД)), а також вибір оптимальної схеми підключення їх статорних обмоток для кращої генерації ЕЕ.

Для отримання графіку генерованої потужності проведено інтегрування виміряних функцій у відповідності до методу трапецій, де  $[a; b]$  – границі інтегрування,  $h=(a-b)/n$  – крок розбиття,  $i = 0, 1, \dots, n$ ,  $f(x)$  – значення підінтегральної функції:

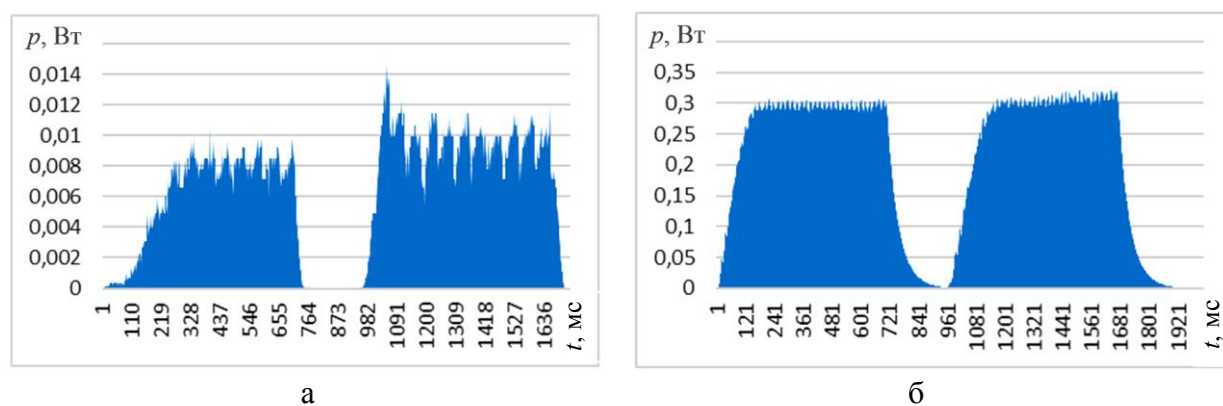
$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \cdot \left( p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (20)$$

Результати проведеної обробки експериментальних досліджень у відповідності до виразу (20) представлені у вигляді графічної залежності  $p=f(t)$  на рис. 7.



а – генерування ЕЕ з використанням пружинного накопичувача; б – генерування ЕЕ та примусового зниження швидкості; в – енергогенеруюче дорожнє покриття

Рисунок 6 – АСГЕЕ



а – ДПС; б – КД ДШ 200-1 з біполярною схемою з'єднання обмоток  
Рисунок 7 – Залежність генерованої потужності від часу

Значення генерованої потужності, що розраховані при обробці експериментальних досліджень за виразом (20) приведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення генерованої потужності

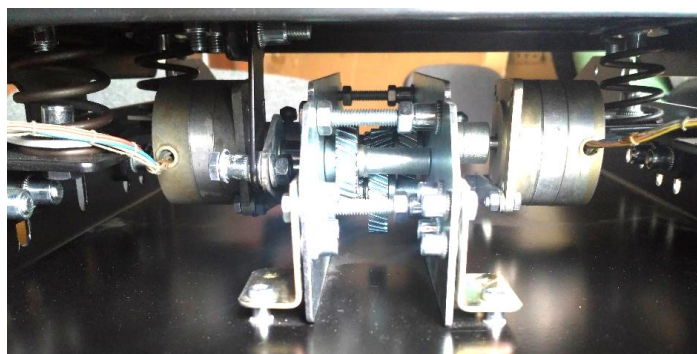
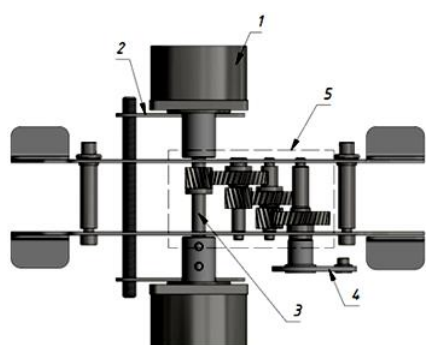
ДПС	Схеми з'єднання обмотки ДШ 200-1		
	однофазна	уніполярна	біполярна
0,004 Вт	0,069 Вт	0,143 Вт	0,164 Вт

Інтегрування вимірних осцилограм показало, що найбільш ефективною, з точки зору генерованої потужності, є КД ДШ 200-1 з біполярною схемою з'єднання обмоток.

Енергогенеруюча платформа може включати декілька електромашинних вузлів, що генерують ЕЕ, або декілька ЕД в одному електромашинному вузлі, тому потрібно визначити ступінь впливу кількості ЕД на кількість генерованої ЕЕ.

Розроблено конструкцію енергогенеруючої платформи (ЕП), рис. 8. Експериментальне дослідження проводилося при опорі навантаження  $R = 18$  Ом, рис. 9. Для зменшення похибки, вимірювання були поділені на 100 серій по 10 кроків. В дослідженнях приймали участь 5 чоловік з вагою від 50 кг до 90 кг. Швидкість натискання (кроки) складала приблизно 1,39 м/с (5 км/год).

У відповідності до виразу (20) проведено інтегрування вимірних функцій  $u = f(t)$ . Результати залежності  $p = f(t)$  при одному кроці на енергогенеруючу платформу, представлено на рис. 10.

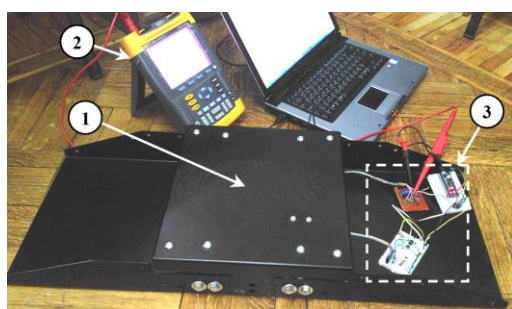


а

б

1 – кроковий двигун типу ДШИ-200; 2 – реактивна тяга; 3 – вихідний вал мультиплікатор; 4 – кривошип; 5 – триступеневий мультиплікатор

Рисунок 8 – Електромашинний вузел ЕП: а – конструкція; б – зовнішній вигляд

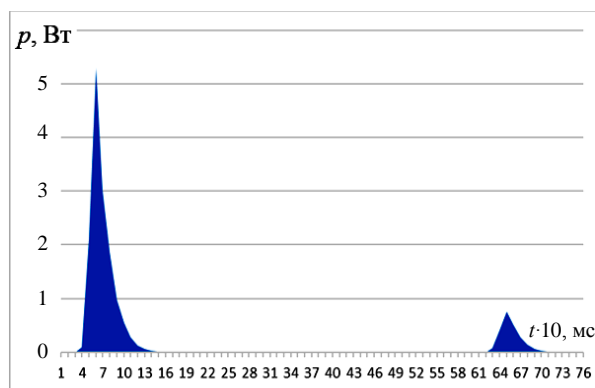


а

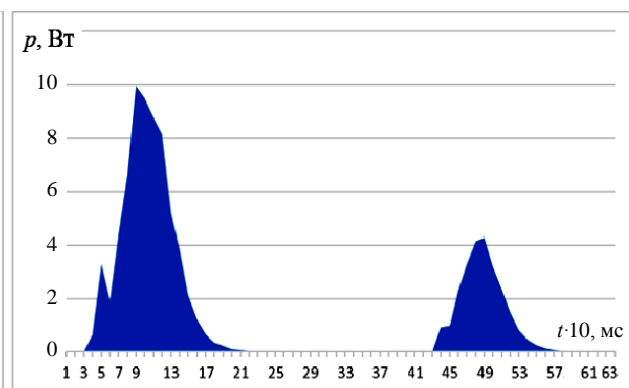
б

1 – натискна кришка енергогенеруючої плитки; 2 – осцилограф; 3 – система управління

Рисунок 9 – Експериментальне дослідження ЕП



а



б

Рисунок 10 – Залежність генерованої потужності від часу: а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Значення генерованої потужності, що розраховані при обробці результатів досліджень для однієї серії з 10 кроків наведено у таблиці 2, де  $k$  – коефіцієнт підсилення (збільшення значення генерації при підключенні двох КД).

Таблиця 2 – Значення генерованої потужності

	Серії по 10 кроків										Середнє
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1 КД, Вт	2,87	1,66	3,64	3,12	2,11	3,54	4,21	2,88	3,56	3,22	3,081
2 КД, Вт	13,84	5,55	11,4	12,12	9,85	13,24	13,85	9,87	13,54	12,38	11,56
$k$	4,8	3,3	3,2	3,9	4,6	3,7	3,3	3,4	3,8	3,8	3,78

Аналіз проведених експериментальних досліджень та їх обробка показують, що підключення двох КД до електромашинного вузлу енергогенеруючої платформи дає змогу підвищити значення генерованої ЕЕ приблизно в 3,9 рази. Отриманий результат цілком відповідає принципам протікання електромеханічних процесів, що описує теорія електроприводу та базові закони теоретичних основ електротехніки. Один крок на ЕП в середньому генерує 1,16 Вт електричної потужності.

Розроблений метод може знайти досить широке застосування в сфері транспорту та його інфраструктури для підвищення ефективності експлуатації ЕБ у якості енергогенеруючих сходинки і/або платформ.

Крім представлених вище АСГЕЕ, досить перспективним є використання у якості альтернативних джерел ЕЕ сонячних панелей (СП), які можна розташовувати і в електробусах, і на ЗС, і на зупинках. Тому проведено дослідження навантажувальних характеристик різних типів СП з визначенням найбільш ефективного значення опору навантаження, що є важливим з точки зору кількості ЕЕ, що генерується. Результати проведеного дослідження дозволяють з максимально можливим ККД використовувати дані СП як поновлюване джерело енергії на транспорті.

У відповідності до умов експерименту дослідження проводилися в липні, при сонячній погоді, в годину найбільш високої інтенсивності сонячної радіації для м. Харкова: 12.30–14.00. Зміна опору навантаження проводилась в межах 2...10 Ом з кроком 0,5 Ом. Струм та напруга вимірювались мультиметрами APPA 82. Кут нахилу СП – 35°...40°.

За результатами експериментальних досліджень було побудовано вольт-амперні (ВАХ) та навантажувальні характеристики СП. Усереднені значення виміряних характеристик представлені на рис. 11.

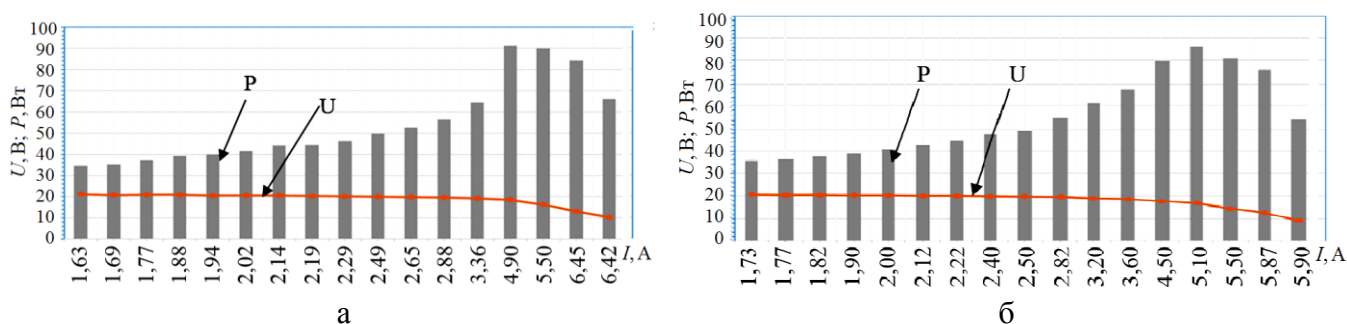


Рисунок 11 – Вольт-амперні і навантажувальні характеристики СП:  
а – полікристал; в – монокристал

Проводячи аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень можна зробити висновок, що досліджувані СП генерують ЕЕ з найбільшою ефективністю в діапазоні активного навантаження від 3 Ом до 3,5 Ом. Тобто, при використанні даних типів СП необхідно підтримувати навантаження в зазначеному діапазоні опорів, з урахуванням електричної схеми їх з'єднання.

Так як досліджувані типи СП повинні бути згруповані в системи з відповідним послідовно-паралельним з'єднанням, то слід визначити внутрішній опір системи СП. Тоді навантаження, підключені до такої системи, повинні відповідати критерію передачі максимальної потужності і обчислюватися з урахуванням того, що одна монокристалічна СП має внутрішній опір 3,34 Ом, а полікристалічна СП – 3,04 Ом.

Запропоновано використовувати СП також і для генерування ЕЕ в енергогенеруючому дорожньому покритті (ЕДП), схему якого представлено на рис. 6,в.

Проведено оцінку генерації ЕЕ системою ЕДП. Визначено, що при 75 % заповненні ЕДП фотоелементами, для генерування 1 кВт·год необхідно 8,25 м<sup>2</sup> ЕДП (150 панелей при площі кожної 0,55 м<sup>2</sup>).

Для проведення індикативної оцінки була обрана дорога з двома смугами руху і шириною 7,5 м. З урахуванням реальних умов експлуатації (затінення дороги, забруднення тощо) генерацію 100 кВт·год забезпечує ділянка дороги, що складається з 2045 панелей загальною площею 1125 м<sup>2</sup>.

В одну панель ЕДП входить 150 LED RGB світлодіодів, які споживають 9,6 Вт·год ЕЕ. Тоді на роботу LED освітлення для живлення 2045 панелей необхідно 19,7 кВт·год ЕЕ (при максимальному навантаженні). Крім того, кожна ЕДП панель має нагрівальний елемент потужністю 25 Вт, тобто на роботу нагрівальних елементів буде витрачатися 51,125 кВт·год ЕЕ, а значить в зимові місяці, ділянка дороги, що генерує 100 кВт·год ЕЕ, в темний час доби споживатиме 70,825 кВт·год.

Проведені розрахунки показують, що взимку в і темний час доби дорога, що складається з ЕДП, на власні потреби буде витрачати близько 71 % згенерованої ЕЕ.

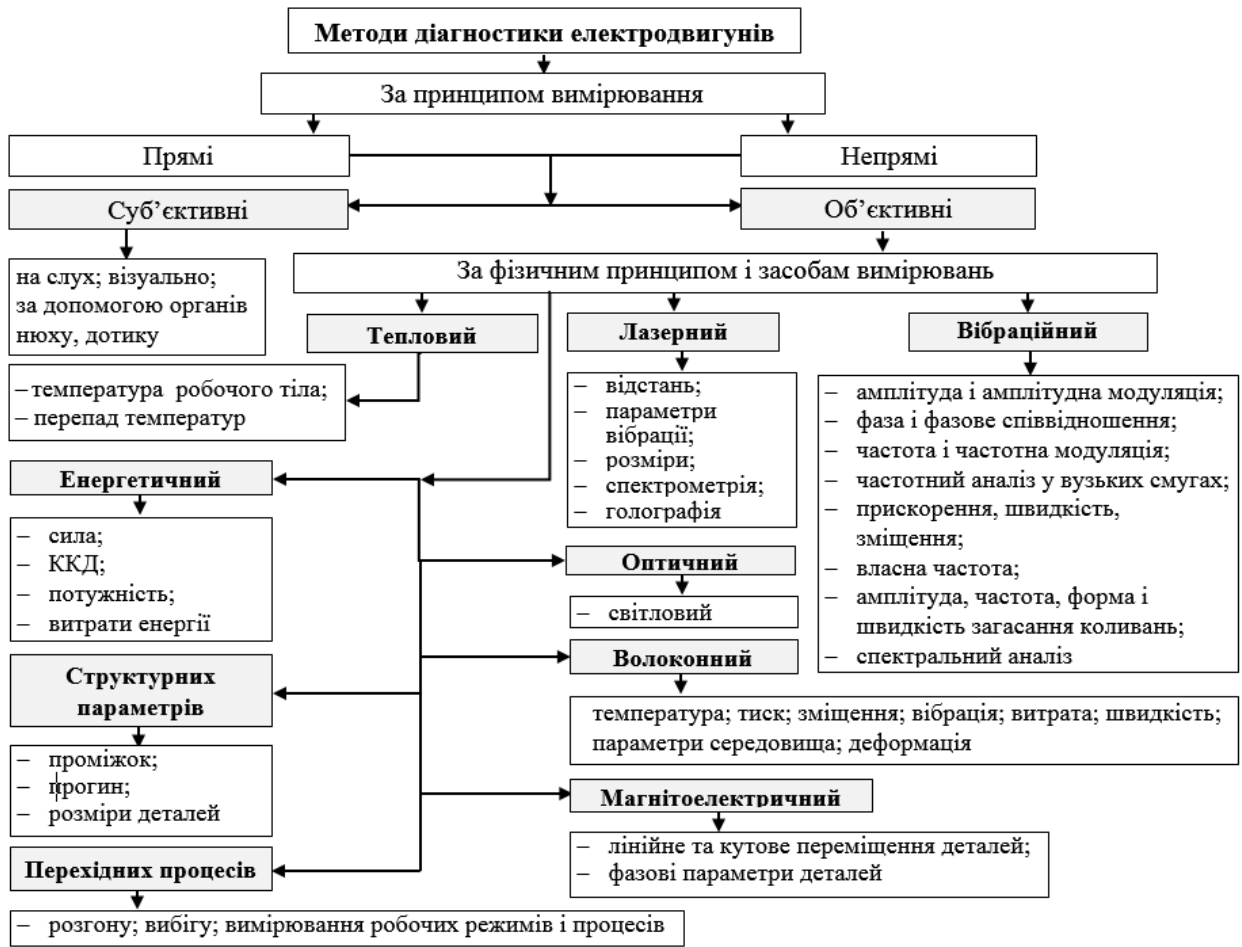
Ефективне застосування концепції зарядки ЕБ вимагає оптимізації витрат пов'язаних з установкою ЗС, тому необхідно знайти компроміс між ємністю СК (вартістю і вагою) і кількістю встановлених точок зарядки, забезпечуючи при цьому достатню кількість ЕЕ для роботи ЕБ. Ґрунтуючись на існуючих роботах і підході представлено вдосконалену модель лінійної оптимізації зі змішаними цілими числами для ЕБ. Модель вирішує задачу визначення мінімально необхідної кількості і відповідного розташування ЗС і необхідних параметрів СК для кожного ЕБ на маршруті. Перспективна структура дозволяє виявити синергізм витрат при плануванні інфраструктури зарядки для кількох електробусних маршрутів одночасно. Таким чином, імітаційна модель значною мірою сприятиме оптимальному розташуванню інфраструктури систем швидких ЗС для електробусів на СК.

**У четвертому розділі** представлена методологія комплексної оцінки технічного стану тягових ЕД електроприводу, виділено сім рівнів ієрархії комплексної оцінки ЕД, проведено аналіз структури міжрівневих зв'язків, які пов'язують між собою напрямки та завдання розробки методів оцінки ЕД за рівнями вібрацій на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації, сформовано принципи інтегрального оцінювання ЕД і формалізовано оцінювання їх якості та визначено базові передумови підвищення експлуатаційних властивостей ЕБ.

Незважаючи на всі переваги АД, за даними статистики, щорічно близько 20...25 % від їх загальної кількості потребують ремонту. У зв'язку з тим, що електробуси є досить новим видом транспорту, статистичних даних щодо відмов або проблем тягових ЕД електроприводу ЕБ, у відкритих джерелах не знайдено, але можна з високою долею вірогідності припустити, що для міських ЕБ кількість відмов ЕД буде достатньо високою через те, що експлуатація в міських тягових ЕД ЕБ здійснюється в динамічних (перехідних) режимах роботи. Тому оцінка ЕД на всіх стадіях життєвого циклу є актуальною задачею. Існує багато методів оцінки ЕД, рис. 12. Кожен з них має свої переваги і недоліки, та найбільш інформативним, а значить і найбільш ефективним, є вібраційний. Це пов'язано з тим, що у вібраційному сигналі



міститься вся необхідна інформація про зміну всіх компонент, що визначають технічний стан ЕД в реальному часі на стадії проектування, виготовлення і експлуатації.



а



б

Рисунок 12 – Діагностика ЕД: а – методи оцінки; б – причини і джерела вібрації

Розроблена класифікація основних причин і джерел вібрації і шуму ЕД (рис. 12, б). На рис. 13 представлена віброакустична граф-модель АД.

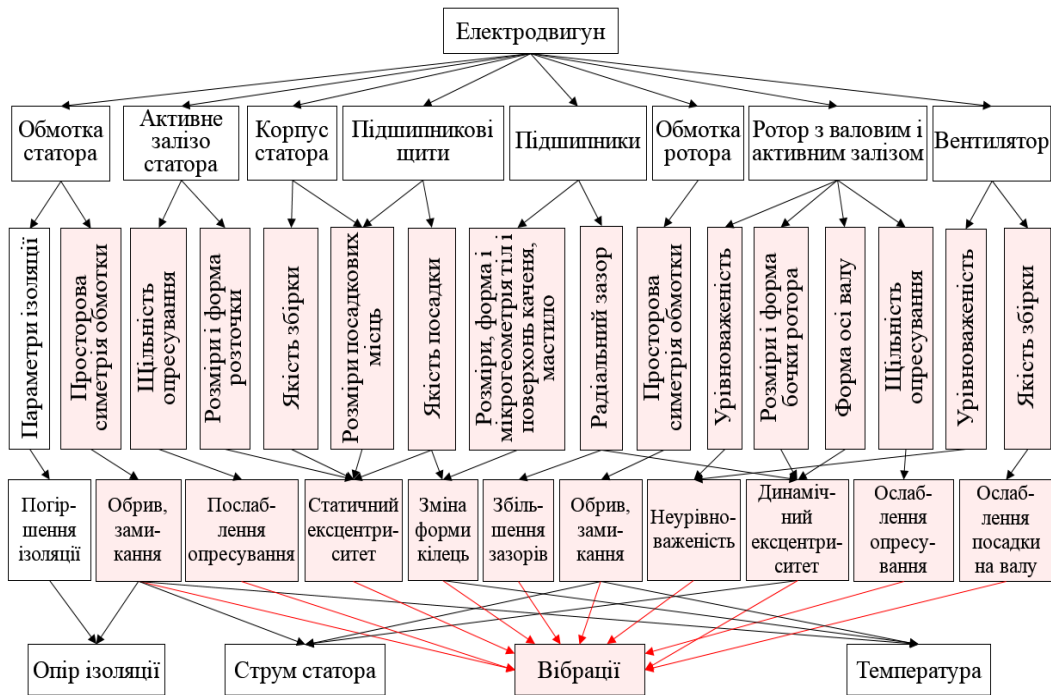


Рисунок 13 – Віброакустична граф-модель асинхронного електродвигуна

Власні коливання окремих елементів механічної системи, що лежать в межах частотного діапазону діючих сил, жорсткість конструкції, що змінюється при певних режимах роботи і дії зовнішніх сил, деформація матеріалів і зміна їх в'язко пружких властивостей і спектра власних частот механічних систем завжди становлять потенційну проблему надійності. Тому ресурс ЕД визначається не тільки робочими процесами, навантаженнями і закладеною міцністю й довговічністю, точністю виготовлення і функціонування механізмів, а й фактичним вібронавантаженням і можливістю механічних систем і деталей мати в певних умовах резонансну частоту. Тож вібраційні характеристики ЕД є комплексним показником якості.

Основні властивості вібраційних сигналів, які використовуються для оцінки тягового ЕД для ЕБ:

- пропорційна залежність зміни вібрації від: навантаження, частоти обертання, розміру зазору, значень геометричних похибок, що дозволяє нормувати вихідні та граничні їх значення для контролю якості проектування, виготовлення і експлуатації ЕД.
- висока універсальність, чутливість і вибірковість вібраційного сигналу до параметрів технічного стану ЕД;
- фізичні властивості збудження вібрації, що дозволяють у вигляді діагностичного параметра використовувати динамічні – комплексні ознаки структурного, функціонального та динамічного стану ЕД;
- властивості вібраційних сигналів швидко реагувати на зміну технічного стану ЕД.
- можливість створювати системи автоматизації контролю і попередження аварійних ситуацій і управління роботою ЕД;
- можливість створювати сучасні комп'ютерні і мікропроцесорні бортові, стаціонарні і переносні системи швидкого отримання достовірної інформації про техні-

чний стан ЕД на стадіях доведення конструкції, виготовлення і експлуатації;

- наявність великого обсягу інформації в одному вимірі вібрації;
- велика достовірність вібраційного діагностування;
- прогресивна технологія діагностування (без розбирання);
- зниження трудомісткості ресурсних і експлуатаційних випробувань і діагностування.

Комплексний підхід до оцінки тягового ЕД дозволяє розробити універсальний метод контролю їх на стадіях проектування, виробництва і експлуатації з використанням вібродіагностичних характеристик (ВДХ). Проблема розробки вібраційних методів оцінки ЕД представляє, з точки зору системотехніки, велику систему складних фізичних і технічних, внутрішніх і зовнішніх факторів. Для розуміння проблеми і сутності шляхів її вирішення прийнятий логічний комплексний аналіз представлений на рис. 14 і описаний в табл. 3.

Таблиця 3 – Комплексна оцінка ЕД за ВДХ

Завдання і цілі дослідження ЕД	Аспекти	Характер
<b>Завдання 1-го рівня:</b> розробка критеріїв і методів оцінки ЕД при: проектуванні (2.1), виготовленні (3.1), експлуатації (4.1)	методологічні, моделювання	методологічний
<b>Цілі 2-го рівня:</b> розробка класів вібрації ЕД (2.2), норм вібрації для оцінки якості виготовлення (3.2) і норм вібрації для оцінки технічного стану в експлуатації (4.2)	методичні	теоретичний, статистичний
<b>Цілі 3-го рівня:</b> визначення вібрацій: допустимих (2.3) і для кожного класу (2.4); розробка методів: нормування (3.3), контролю (3.4) і вимірювання вібрації (3.5); розробка методів нормування вихідних (4.3) і граничних (4.4) вібраційних параметрів; розробка класів для оцінки технічного стану ЕД при експлуатації (4.5)	методичні, класифікації, нормування, структуризації	теоретичний, статистичний, розрахунковий
<b>Цілі 4-го рівня:</b> розробка конструктивних і технологічних методів зниження вібрації (2.5), засобів випробувань і діагностування ЕД (2.6), режимів діагностування (4.6)	методичні, метрологічні, конструкційні	методичний, експериментальний
<b>Цілі 5-го рівня:</b> визначення ВДХ ЕД (2.7); розробка методів зниження вібрації: корегуванням зазору між магнітопроводами статора і ротора (2.8), вибором форми паза магнітопроводу ротора (2.9), якістю електроенергії, що живить ЕД (2.10); розробка ТЗ, ТУ, ТД та дослідних зразків (2.11); розробка методів: експлуатаційної діагностики, періодичності контролю, визначення залишкового ресурсу (4.7), контролю якості ремонту та оцінки обсягу ремонтних робіт (4.8); визначення вихідних вібраційних параметрів (4.9)	вимірювання, конструктивно-технологічні, метрологічні, методичні, розпізнавання	теоретичний, експериментальний, конструктивно-технологічний
<b>Цілі 6-го рівня:</b> розробка: алгоритмів проектування ЕД заданого рівня (2.12), рекомендацій з доведення макетних і дослідних зразків ЕД (2.13), алгоритмів і методів контролю якості виготовлення (3.6), алгоритмів і технологій діагностування ЕД (4.10); впровадження вібраційних методів оцінки якості для проектування, виготовлення і експлуатації	випробуванні, алгоритмічні, прогнозування, моделювання, метрологічні	методичний, алгоритмічний, розробка ТЗ, ТУ, ТД, дослідних зразків, акти впровадження
<b>Цілі 7-го рівня:</b> розробка рекомендацій щодо виявлення та усунення резонансних явищ (2.14), оцінки рівноресурсності складових ЕД (2.15), забезпечення віброконтролепридатності (2.16), проведення комплексних вібраційних випробувань (2.17)	методичні, конструктивно-технологічні, зіставлення	методичні рекомендації



З головної мети виділені три підсистеми цілей (2.1, 3.1, 4.1), які можуть розглядатися як самостійні системи відповідного рівня ієрархії. Але максимальний технічний і економічний ефект можливий тоді, коли поставлена головна мета буде досягтися комплексно на стадії проектування. На першій стадії досягаються цілі 2.1-2.17, на другій – 3.1-3.6, на третій – 4.1-4.10, рис. 14.

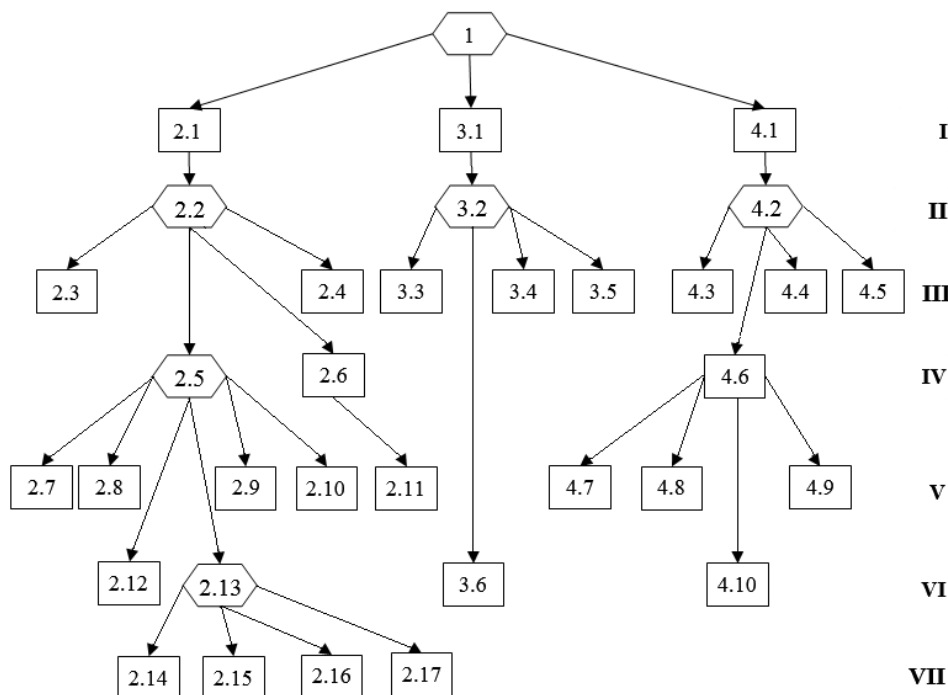


Рисунок 14 – Комплексна оцінка тягових ЕД

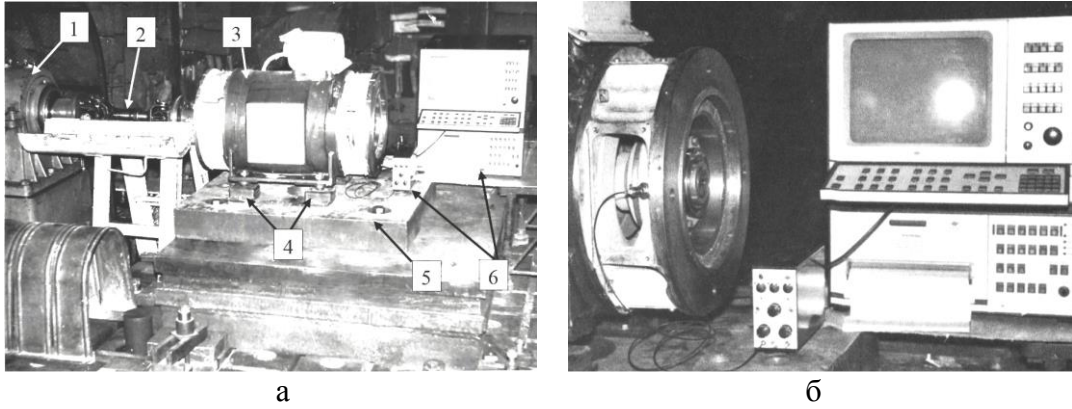
Традиційні підходи виділення і дослідження окремих підсистем і їх вузька систематизація є неефективними. Запропонована система послідовності оцінки ЕД дозволяє поетапно усувати дефекти і цим забезпечувати підвищення якості ЕД, отримувати достовірну індивідуальну вхідну інформацію про його технічний стан при введенні в експлуатацію, що дозволяє підвищити ресурс і з більшою точністю прогнозувати вихідні дані про зміну технічного стану.

Розроблені методи нормування класів вібрації і розрахунків вібрації ЕД, конструктивні і технологічні засоби зниження вібрації на заданий клас; нормовані вібрації і види дефектів для контролю якості виготовлення; розроблені вихідні та граничні вібраційні діагностичні параметри, експлуатаційні норми вібрації класів оцінки технічного стану і таблиці несправностей.

Комплексний підхід оцінки ЕД на всіх стадіях життєвого циклу за ВДХ дозволив створити єдину методологію і засоби, що забезпечують поетапний і безперервний ефективний контроль процесу створення, виготовлення і експлуатації тягового ЕД електроприводу ЕБ, включаючи передпроектне прогнозування вихідних показників якості ЕД.

У **п'ятому розділі** представлені результати експериментальних досліджень ВДХ електродвигунів, впливу форми паза магнітопроводу ротора на ВДХ ЕД і визначені допустимі вібрації та її зв'язок з ресурсом ЕД.

Для проведення експериментального дослідження були відібрані 10 висококласних АД типу АНУ 92-2, що використовуються на транспорті. АД досліджувалися на стенді у віброакустичній камері з підключенням вимірювального обладнання, рис. 15.



а – загальний вигляд; б – підключення експериментального обладнання

1 – навантажувальна машина; 2 – карданний вал; 3 – електродвигун, що досліджується;  
4 – віброізолятори; 5 – плита станда; 6 – експериментальне обладнання

Рисунок 15 – Стенд віброакустичної камери для випробування ЕД:  
а – загальний вигляд; б – підключення експериментального обладнання

На першому етапі досліджень рівні вібрації ЕД визначалися в децибелах за середнім квадратичним значенням коливального прискорення. За умовний нульовий рівень вібрації прийнято прискорення  $a$ , що дорівнює  $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ .

Вимірювання вібрації ЕД здійснювалося після його попередньої роботи на холостому ході протягом 30 хв. Досліджувані ЕД мали трапецеїдальну форму закритих пазів ротора, використовувались підшипники з вимогами до рівню вібрації Ш1. Проведена статистична обробка усереднених за результатами 3-х вимірювань значень віброприскорення (дБ) для кожного з досліджуваних АД у спектрі 1/3 октавних частот від 50 Гц до 10 кГц. Отримані спектрограми представлені на рис. 16.

Проведено аналіз отриманих результатів. Для цього був застосований метод критерію серій, заснований на медіані вибірки і критерій квадратів послідовних відношень. Для перевірки гіпотези про випадковість вибірки з використанням критерію квадратів послідовних відношень були проведені розрахунки, які підтвердили, що отримана послідовність середніх значень результатів досліджень не є випадковою, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

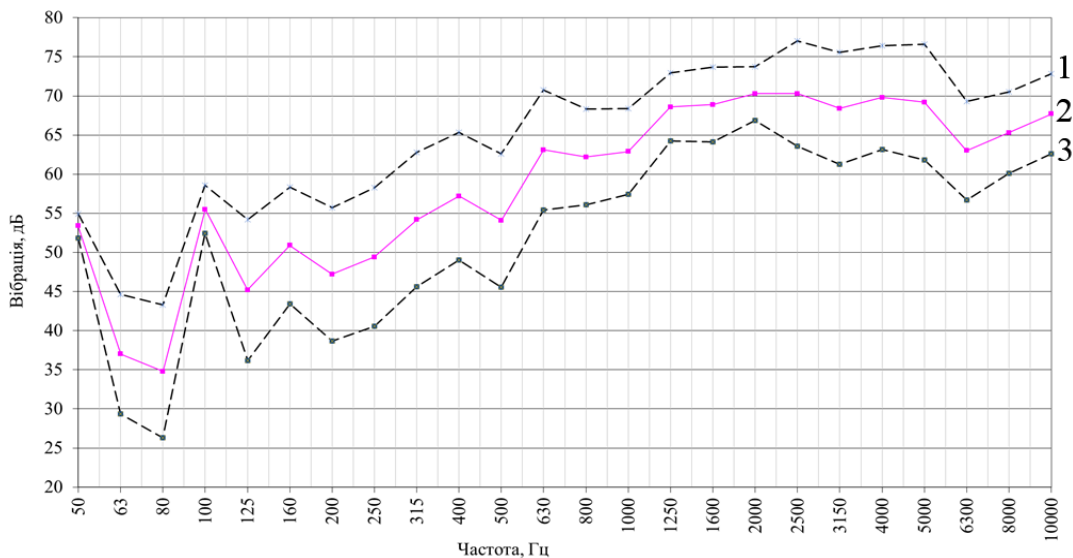


Рисунок 16 – Спектрограми вібрацій ЕД АНУ92-2: 1, 3 – середні квадратичні відхилення рівнів вібрації; 2 – середні значення рівнів вібрації

З класифікації основних причин і джерел вібрації ЕД (рис. 12) і віброакустичної граф-моделі (рис. 13) видно, що практично всі види дефектів ЕД впливають на їх ресурс, змінюють параметри сигналу вібрації. Отримані результати експериментів, представлені на рис. 16 дозволяють оцінити можливості зменшення вібрації при внесенні змін в конструкцію ЕД.

Вплив на віброактивність ЕД здійснюють механічні, магнітні і аеродинамічні джерела. Що стосується останніх – вони впливають лише на частоті  $zn/60$  ( $z$  – число пазів ротора) і їх джерелом є вентилятор. Основним шляхом зменшення цих вібрацій є використання водяного охолодження або встановлення глушників шуму.

До механічних джерел вібрації відносяться: неурівноваженість ротора, подвійна жорсткість і овальність цапф ротора, які проявляються на частотах  $n/60$  і  $2n/60$ . Ці джерела вібрації вже достатньо добре вивчені і існують рекомендації щодо їх усунення. Опираючись на існуючі рекомендації прийнято рішення для зниження вібрації замість підшипників ШІ використовувати ШЗ.

Найбільший вплив на вібрацію в ЕД, здійснюють магнітні сили в діапазоні частот від 100 Гц до 5 кГц, що видно з рис. 16. Тому подальші дослідження спрямовані на усунення їх причин.

Магнітні сили зумовлюють виникнення аксіальної, радіальної і тангенціальної вібрацій ЕД. У повітряному зазорі АД, крім основної гармоніки поля, що створює корисний крутний момент, присутні додаткові гармоніки, обумовлені несинусоїдальністю і несиметрією напруги живлення; насиченням магнітного кола ЕД: нерівномірністю проникності сталі уздовж і поперек прокату; дискретним розподілом обмоток статора і ротора вздовж розточки; нерівномірністю повітряного зазору, обумовленого відкриттям пазів статора і ротора; статичним і динамічним ексцентриситетом. Поля вищих гармонік мають свої амплітуди, частоти, довжину хвиль.

У загальному випадку частота вібрації, викликана магнітними полями, визначається за формулою:

$$f = f_p \cdot z_2 \cdot k. \quad (21)$$

де  $f_p$  – частота обертання ротора, Гц;  $z_2$  – число пазів ротора;  $k = 1, 2, 3$  – порядок гармоніки.

Значну роль в створенні вібрації грає основна гармоніка поля, яка створює силову хвилю з порядком  $r=2p$  і частотою  $f = 2f_0$ , де  $f_0$  – частота напруги;  $p$  – число пар полюсів. Значна вібрація обумовлюється роторними зубцевими гармоніками від основної гармоніки поля, що мають порядок:

$$\mu = \pm k \cdot z_2 / p. \quad (22)$$

При взаємодії цих гармонік зі статорними гармоніками поля виникають радіальні сили з порядком і частотою:

$$f = f_0 [2 \pm k \cdot (z_2 / p)(1 - S)], \quad (23)$$

а для порядку радіальної гармоніки  $r = p\mu + p\nu$ , де  $\nu$  – порядок статорної поля;  $\mu$  – порядок роторної гармоніки поля, сили:

$$f = f_0 \left[ k \frac{z_2}{p} (1 - S) \right]. \quad (24)$$

де  $p$  – число пар полюсів основної гармоніки поля;  $S$  – ковзання в режимі холостого ходу.

Зубцеві сили можуть створювати значні деформації статора, особливо при низьких порядках коливань і можуть при певних частотах обертання ротора збігатися з власною частотою коливання статора. У цих випадках амплітуда деформації і віброакустичного випромінювання істотно збільшується, що особливо проявляється в процесі пуску і в ЕД з широкими межами регулювання частоти обертання.

Сили низького порядку виникають, якщо  $|z_1 - z_2| = p; p \pm 1; p \pm 2; 2p; 2p \pm 1; 2p \pm 2; 3p; 3p \pm 1$  ( $z_1$  – число пазів статора). Сили нульового порядку виникають при  $(z_1 - z_2) = 0; p; 2p$ . Частота сил дорівнює:

$$f = 2f_0 [(z_2 / p) \cdot (1 - S) \pm 1]. \quad (25)$$

Небезпечна вібрація викликається гармоніками поля при ексцентриситеті ротора, так як в цьому випадку виникає радіальна сила першого порядку, тобто сила одностороннього магнітного тяжіння.

При статичному ексцентриситеті основна частота вібрації дорівнює подвійній частоті мережі живлення, а при динамічному ексцентриситеті частота основної вібрації дорівнює частоті обертання ротора.

Аксіальні сили викликають періодичне розпушування і стиснення пакетів шихтованої сталі. Під дією осьових сил може статися зсув пакета ротора по відношенню до пакету статора, що призводить до асиметричного розташування статора і ротора. Тангенціальні сили викликають коливання зубців, які в потужних ЕД досягають великих значень. Під їх дією порушується ізоляція обмоток, знижується термін служби ЕД. Радіальні сили викликають деформацію пакета статора, пакета, ротора, в результаті чого відбувається деформація станини. Деформація окремих деталей і вузлів в цілому є причиною виникнення вібрації всього ЕД, інтенсивність якої залежить від величини вимушених сил, пружних властивостей матеріалів, використовуваних в ЕД, конструкції і її акустичних властивостей.

Виткове замикання в роторах може викликати істотну вібрацію. Замикання частини обмотки фазного ротора АД призводить до вібрації з частотою ковзання.

Електрична несиметрія різних видів ЕД призводить до тангенціальних коливань статора, що виявляється особливо на частотах  $f_p; 2f_0; 2pf_p; 2Sf_0$ .

Зниження магнітних вібрацій досягається вдало обраним співвідношенням чисел пазів статора і ротора, правильно обраною величиною повітряного зазору між магнітопроводами статора і ротора, скосом пазів ротора, зниженням ексцентриситету повітряного зазору і іншими конструктивними і технологічними рішеннями.

Одним з таких рішень є зміна форми паза ротора. Були досліджені трапецеїдальні, т-подібні і дугоподібні форми закритих пазів асинхронних ЕД. У пазі дугоподібної форми нахил дуги змінювався справа наліво по довжині паза через 20 мм.

Проведені дослідження показали, що форма паза пакету магнітопроводу рото-

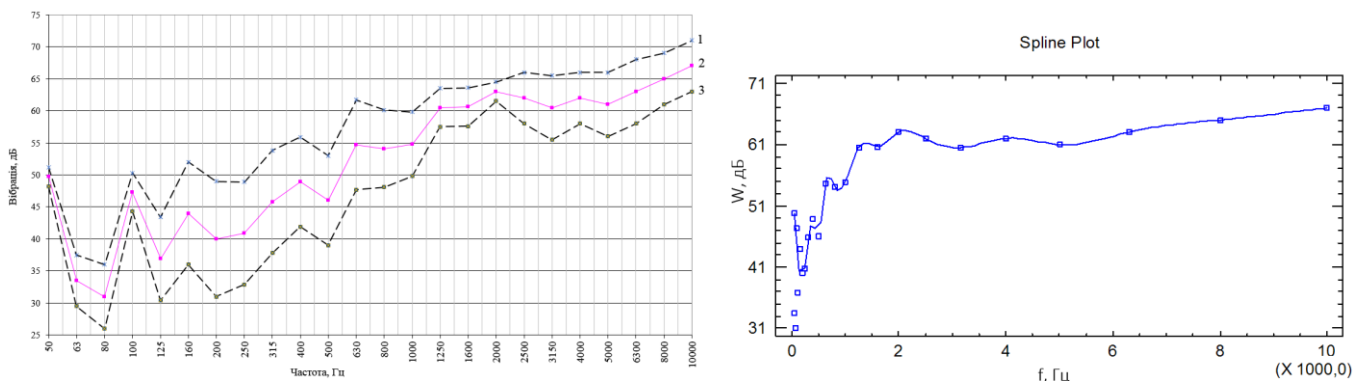
ра істотно впливає на рівні вібрації ЕД в області магнітних частот і мало впливає на інших ділянках спектра від частоти обертання до 1000 Гц.

Після проведення вимірів вібрації ЕД на 1/3 октавному спектрі частот від 50 Гц до 10 кГц проведена статистична обробка отриманих результатів. Результати представлені на рис. 17,а. Побудована сплайн-апроксимація в програмному пакеті STATGRAPHICS V.15, рис. 17,б.

Для проведення аналізу був застосований метод критерію серій, заснований на медіані вибірки і критерій квадратів послідовних відносин. Отримано регресійне рівняння виду:

$$\ln(W_i) = \sqrt{9,45998 + 0,9220 \cdot \ln f_i} . \quad (26)$$

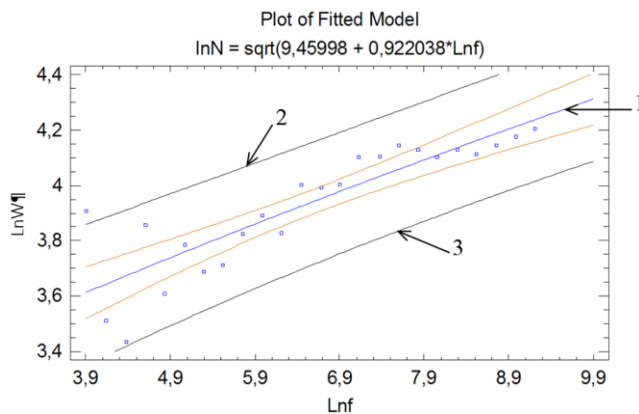
Графік, що відповідає цьому рівнянню показаний на рис. 18.



1, 3 – середні квадратичні відхилення рівнів вібрації; 2 – середні значення рівнів вібрації

Рисунок 17 – Результати обробки експериментальних досліджень:

а – спектрограми вібрацій; б – сплайн-апроксимація вібрації



1 – графік отриманий з рівняння регресії (24); 2, 3 – границі довірчих інтервалів рівняння регресії

Рисунок 18 – Графік регресійної залежності між величиною натурального логарифма частоти обертання ЕД і вібрацією ЕД

З графіка видно, що всі точки фактичних експериментальних значень, крім однієї, знаходяться в їх межах, а це значить, що якість апроксимації задовільна.

Для подальшого підвищення якості (надійності і ресурсу) ЕД за базові вихідні рівні вібрації прийняті досягнуті значення спектрів, що апроксимуються прямою АВ (рис. 19,а), з різницею рівнів вібрації 40 дБ на частоті 5 Гц і 80 дБ на частоті 10 кГц.

Нахил прямої АВ з різницею 40 дБ між частотою 5 Гц і частотою 10 кГц є рівноресурсною вимогою до рівнів вібрації, які збуджуються всіма дефектами ЕД.

Зниження вібрації ЕД на 8 дБ нижче прямої АВ вказує на перехід ЕД в інший (вищий) клас технічного стану. На цій підставі розроблені класи Г, Д, Е норм вібрації ЕД, рис. 19,б.

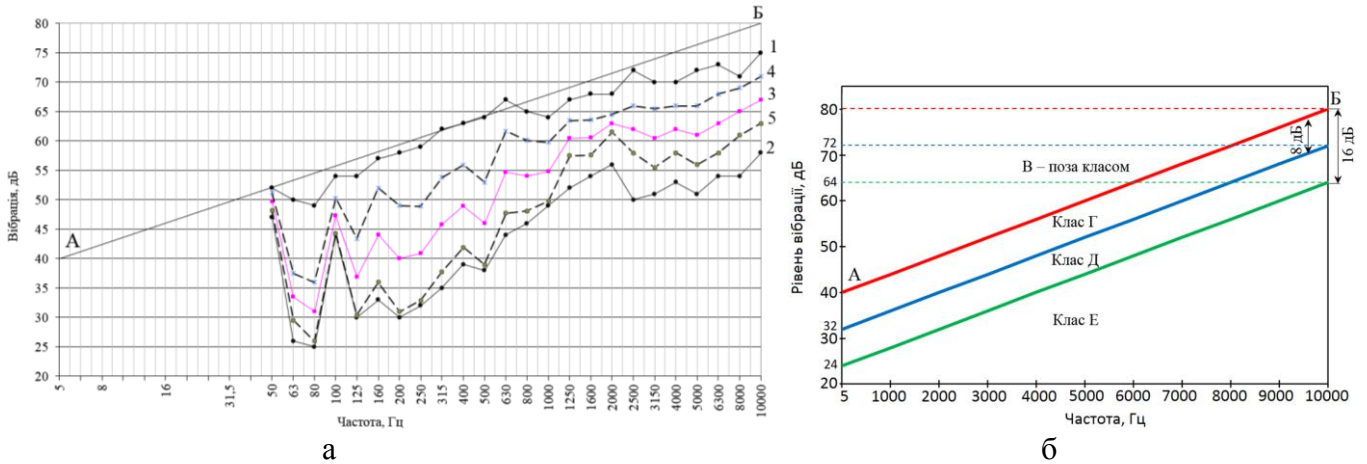


Рисунок 19 – Результати експериментальних досліджень:

а – спектрограми вібрацій ЕД АНУ92-2; б – діапазони класів вібрації ЕД

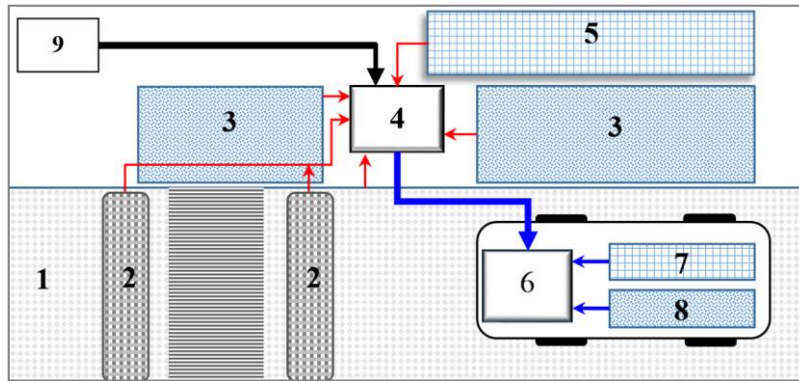
Рівні вібрації класу Г не повинні перевищувати прямої лінії АВ; класу Д – не перевищувати лінії з рівнями вібрації 32 дБ на частоті 5 Гц і 72 дБ на частоті 10 кГц. Рівні вібрації класу Е не повинні перевищувати прямої лінії 24 дБ на частоті 5 Гц і 64 дБ на частоті 10 кГц. Двигуни з рівнями вібрації вище прямої АВ до застосування в ЕБ не рекомендуються через те, що високі рівні вібрації знижують надійність, прискорюють процеси зношування ЕД, а також можуть мати шкідливий вплив на людину і навколишнє середовище.

Доведено, що при зменшенні вібрації на 8 дБ збільшується ресурс ЕД в два рази, а при зменшенні на 16 дБ – в три рази. У відповідності до цього і на основі проведених досліджень, використовуючи методи оцінки за вібраційними характеристиками ресурсу машин, можна стверджувати, що ресурс ЕД класу Е в три рази більший, ніж класу Г і в два рази більший, ніж класу Д. А це означає, що підвищивши клас ЕД хоча б на один (тобто з класу Г до Д або з Д до Е), можна прогнозувати збільшення ресурсу його роботи в два рази.

У **шостому розділі** надані рекомендації щодо створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ в транспортній інфраструктурі, щодо проектування і вибору тягових ЕД для ЕБ і забезпечення їх технічного стану у відповідності до нормативних значень; визначено ефективність від впровадження ЕБ та представлено баланс ЕЕ в міському ЕБ при використанні АСГЕЕ.

Транспортна інфраструктура для міських ЕБ повинна бути екологічною, безпечною, незалежною, обслуговувати себе і зручною. Крім того, впровадження міських ЕБ вимагає наявності ЗС. Тому запропоновано метод створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ в транспортній інфраструктурі, рис. 20.





1 – ЕДП; 2 – пристрої примусового зниження швидкості, що генерують ЕЕ; 3 – енергогенеруюча платформа з лінійним електрогенератором та електричною машиною обертового типу з триступеневим мультиплікатором; 4 – ЗС для ЕБ; 5 – СП розташовані на зупинці і на ЗС; 6 – блок СК; 7 – СП на даху ЕБ; 8 – АСГЕЕ з лінійним електрогенератором та електричною машиною обертового типу з триступеневим мультиплікатором; 9 – тягова підстанція

Рисунок 20 – Елемент об'єднаної системи альтернативних джерел генерації електричної енергії для зарядки міських електробусів

Для успішної і швидкої реалізації даного методу необхідно послідовно виконувати положення, які представлені на рис. 21.

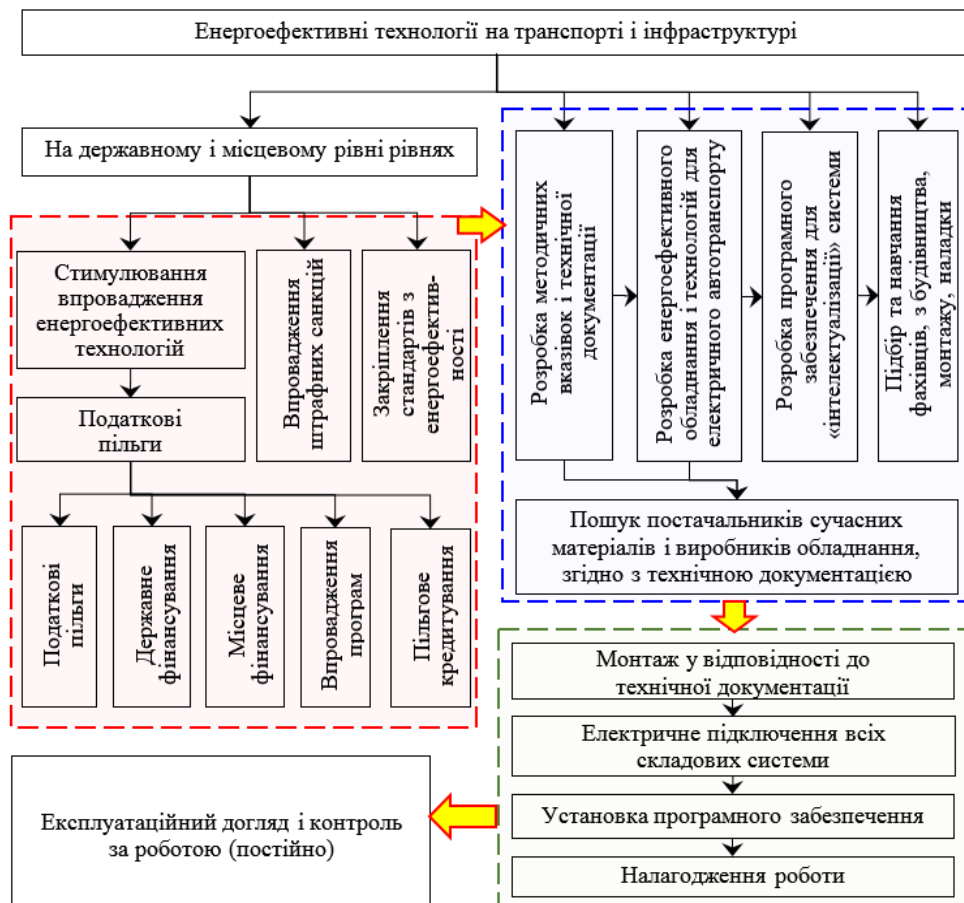


Рисунок 21 – Реалізація методу створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ для зарядки міських електробусів

Пілотне впровадження ЕБ пропонується здійснити на типовому міському маршруті, який охоплює житловий мікрорайон Північна Салтівка м. Харкова, рис. 22.

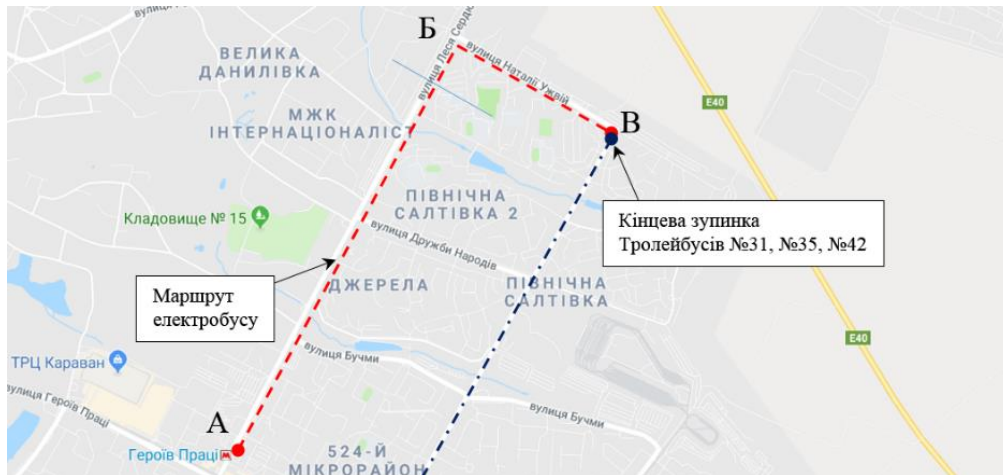


Рисунок 22 – Транспортні маршрути в м. Харкові в житловому районі Салтівка

Довжина маршруту складає 3,5 км. В точці В знаходиться кінцева зупинка тролейбусів. Тобто там можна встановити ЗС для ЕБ, під'єднавшись до тролейбусної мережі, що дозволить суттєво зменшити витрати.

На даному маршруті пропонується використовувати ЕБ на СК зі швидкою зарядкою з автономним ходом близько 10 км, що вимагає наявності лише однієї ЗС.

Час руху ЕБ за маршрутом у прямому і зворотному напрямку займе  $\approx 14$  хв.

Використовуючи дані з проекту «Міський громадський транспорт в Україні», а також інформацію виробника ЕБ ВАТ «Белкоммунмаш», проведемо порівняльні розрахунки витрат на прокладення нового маршруту ЕБ і тролейбуса.

Результати розрахунків представлені в табл. 4, демонструють, що навіть з урахуванням більшої вартості ЕБ у порівнянні з тролейбусом загальні витрати на прокладання тролейбусного маршруту більші приблизно у 2,65 разів. При цьому взагалі не враховані чималі затрати на обслуговування тролейбусної мережі, її ремонт, а також великі втрати ЕЕ.

Таблиця 4 – Витрати на прокладення нового маршруту ЕБ і тролейбуса

	ЕБ на СК E420			Тролейбус		
	Кількість	Вартість за од. тис. \$	Всього, тис.\$	Кількість	Вартість за од., тис. \$	Всього, тис.\$
Тягова підстанція	існуюча			1	1500	1500
Зарядна станція	1 шт	200	200	-	-	-
Транспортний засіб	6 шт	450	2700	6 шт	200	1200
Монтаж тролейбусної траси	-	-	-	8 км	625	5000
Всього, тис. \$	2900			7700		

Для експлуатації міського ЕБ необхідна енергія на тягу  $E_T$  плюс енергія для особистих потреб  $E_{o.п.}$ , яка може бути отримана від особистих  $E_{особ.}$  і зовнішніх джерел  $E_{зовн.дж.}$  ЕЕ, та від мережі живлення  $E_{мер.}$  При цьому у загальному вигляді баланс енергії в ЕБ можна представити у вигляді рівняння витраченої  $E_{витр}$  і отриманої  $E_{отрим}$  енергії:

Використання міських ЕБ дає можливість суттєво зменшити загальне енергоспоживання не тільки завдяки вибору конструкції ЕБ і вбудованим пристроям генерації ЕЕ, але і завдяки транспортній інфраструктурі, що її генерує.



$$\sum E_{\text{витр}} = \sum E_{\text{отрим}} = E_{\text{т}} + E_{\text{о.п.}}; \quad (27)$$

$$\sum E_{\text{отрим}} = E_{\text{мер}} + \sum_{j=1}^n E_{\text{особ.дж.}} + \sum_{k=1}^m E_{\text{зовн.дж.}}, \quad (28)$$

де  $j$  – кількість особистих джерел додаткової енергії, що знаходяться в ЕБ;

$k$  – кількість зовнішніх джерел енергії, що призначені для зарядки / підзарядки ЕБ на маршруті або на кінцевій зупинці.

Енергію на електричну тягу електробуса (Дж) знаходимо за виразом:

$$E_{\text{т}} = 3,6 \cdot 10^3 \int_{\text{тяга}} \frac{V}{\eta_{\text{т}} \eta_{\text{д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \quad (29)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, що характеризує форму ТЗ;

$\eta_{\text{т}}$  і  $\eta_{\text{д}}$  – ККД трансмісії і ЕД відповідно;

$i$  – нахил дороги;  $dV/dt$  – прискорення;

$A_f$  – фронтальна зона ЕБ;

$\rho$  – щільність повітря;

$\delta$  – коефіцієнт маси (вплив обертових компонентів в силовій передачі);

$M$  – загальна маса транспортного засобу;  $f_r$  – коефіцієнт опору коченню ЕБ.

Кількість енергії, що використовує ЕБ на особисті потреби,  $E_{\text{о.п.}}$  залежить від температури навколишнього середовища і габаритів ЕБ. Енергія отримана від особистих джерел ЕБ  $E_{\text{особ.}}$  складається з енергії рекуперації  $E_{\text{рек.}}$ , енергії, що генерують сходинки  $E_{\text{сх.}}$  і енергії, що надходить від СП розташованих на даху  $E_{\text{с.п.д.}}$ :

$$\sum_{j=1}^n E_{\text{особ.дж.}} = E_{\text{рек.}} + E_{\text{сх.}} + E_{\text{с.п.д.}}; \quad (30)$$

$$E_{\text{рек.}} = 3,6 \cdot 10^3 \int_{\text{рек.}} \frac{\alpha V}{\eta_{\text{т}} \eta_{\text{д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt; \quad (31)$$

$$E_{\text{сх.}} = 4,16 \cdot 10^3 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх.}_y}; \quad (32)$$

$$E_{\text{с.п.д.}} = \frac{3600 \cdot a \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot K_{\text{втр}}}{1000}, \quad (33)$$

де  $i$  – нахил дороги або прискорення  $dV/dt$  (або обидва вони негативні);

$\alpha$  – коефіцієнт рекуперативного гальмування ( $0 < \alpha < 1$ );

$K_{\text{нат.сх.}}$  – кількості натискань на сходинки ЕБ;

$a$  – кількість СП, що знаходяться на даху ЕБ;

$J$  – кількість сонячної енергії, що падає на дах ЕБ, кВт·год/м<sup>2</sup> (таблична величина);

$K_0$  – корегувальний коефіцієнт кількості сонячної енергії, що падає на СП, залежить від кута нахилу СП і кута її відхилення від південного напрямку (таблична величина);

$P_{\text{ном.}}$  – номінальна потужність однієї СП, Вт;

$K_{\text{втр}}$  – коефіцієнт, який враховує, скільки енергії втрачається у системі автономного електропостачання.

Врахувавши всі особисті джерела ЕЕ ЕБ, отримаємо:

$$\sum_{j=1}^n E_{\text{особ.дж.}} = 3,6 \cdot 10^3 \left( \int_{\text{рек}} \left( \frac{\alpha V}{\eta_{\text{т}} \eta_{\text{д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \right) + \left( 1,16 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} \right) + 10^{-3} S \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{втр}} \right). \quad (34)$$

Другою складовою енергії, що отримує ЕБ є енергія, яка надходить під час його зарядки або підзарядки на зупинках. Але це енергія не мережева, а та, яку генерують зовнішні АСГЕЕ, тобто енергія від СП розташованих на даху ЗС  $E_{\text{с.п.}}$ , від «лежачих поліцейських», які встановлені на маршруті  $E_{\text{леж.пол.}}$ , від ЕДП  $E_{\text{дор.}}$  і ЕП, розташованих на зупинках  $E_{\text{платф.}}$ . Вся ця генерована енергія зберігається в накопичувачах на зарядній станції. Отримаємо загальний вираз для її знаходження:

$$\sum_{k=1}^m E_{\text{зовн.}} = E_{\text{леж.пол.}} + E_{\text{платф.}} + E_{\text{дор.}} + E_{\text{с.п.}} \quad (35)$$

Енергія, що генерують АСГЕЕ розраховується за виразом:

$$E_{\text{леж.пол.}} = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot K_{\text{л.п}} \cdot \sum_{c=1} \frac{m_c \cdot g \cdot h}{60}; \quad (36)$$

$$E_{\text{платф}} = 4,16 \cdot 10^3 \cdot \sum_{q=1} K_{\text{нат.пл}_q}; \quad (37)$$

$$E_{\text{дор.}} = 126,7 \cdot 10^3 \cdot S; \quad (38)$$

$$E_{\text{с.п.}} = 3,6 \cdot a \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном.з.с}} \cdot K_{\text{втр.з.с}},$$

де  $c$  – кількість транспортних засобів, що перетнуть пристрій;

$m_c$  – вага  $c$ -го ТЗ, що перетинає пристрій;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$h$  – висота «лежачого поліцейського», м;

$K_{\text{л.п}}$  – коефіцієнт, що враховує всі витрати при перетворенні і передачі ЕЕ;

$K_{\text{нат.пл}_q}$  – кількість натискань на  $q$ -ту ЕП на маршруті ЕБ;

$q$  – кількість ЕП на маршруті;

$S$  – площа ЕДП на маршруті ЕБ;

$P_{\text{ном.з.с}}$  – номінальна потужність СП.

Врахувуючи всі складові отримаємо баланс енергії в ЕБ:

$$\begin{aligned}
E_{\text{мер}} = & (3,6 \cdot 10^3 \left( \int_{\text{тяга}} \frac{V}{\eta_r \eta_d} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt + E_{\text{оп.}} \right) - \\
& - (3,6 \cdot 10^3 \left( \int_{\text{рек}} \frac{\alpha V}{\eta_r \eta_d} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt + 4,16 \cdot 10^3 \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} + \right. \\
& \left. + 3,6 \cdot 10^3 \left[ \int_{\text{рек}} \left( \frac{\alpha V}{\eta_r \eta_d} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \right) + \right. \\
& \left. + \left( 1,16 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} \right) + 10^{-3} S \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{втр}} \right] + \\
& + 1,15 \cdot 10^3 K_{\text{л.п}} h \sum_{c=1}^z m_c + 4,16 \cdot 10^3 \sum_{q=1} K_{\text{нат.пл}_q} + 126,7 \cdot 10^3 S + 3,6 \alpha J K_0 P_{\text{ном.з.с}} K_{\text{втр.з.с}}
\end{aligned} \tag{39}$$

Отриманий вираз враховує всю енергію вироблену АСГЕЕ, які знаходяться в ЕБ, а також тими, що розташовані на маршруті.

## ВИСНОВКИ

У дисертації теоретично узагальнено і показано розвиток наукових основ актуальної науково-технічної проблеми підвищення технічного рівня і експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту застосуванням електричного приводу, що склало основу визначення закономірностей, розробки математичних моделей і методів створення альтернативних систем генерації електричної енергії на транспорті, оцінки технічного стану тягових електродвигунів на стадіях проектування, виробництва і експлуатації.

Основні наукові і практичні результати досліджень.

1. Проведено системний аналіз сучасного стану міського пасажирського транспорту. Доведено необхідність використання електричного приводу і альтернативних систем генерації електричної енергії для підвищення його експлуатаційних властивостей.

2. Теоретичні і експериментальні дослідження електромеханічних процесів в силовій установці електробуса виявили особливості їх протікання при використанні блоку суперконденсаторів як тягового джерела енергії і альтернативних джерел енергії на базі лінійного електрогенератора, електричної машини обертового типу з триступеневим мультиплікатором, пристрою примусового зниження швидкості з генеруванням електричної енергії та енергогенеруючого дорожнього покриття.

Встановлено, що:

– застосування блоку суперконденсаторів в електробусі дозволяє зменшити добові витрати в 2 рази, в порівнянні з гібридним автобусом і в 2,5 рази, в порівнянні з автобусом з ДВЗ;

– застосування розробленого мультиплікатора на основі пари гвинтових зубчастих передач з модулем 1,5 і загальним передавальним відношенням 9,8 в енергогенеруючій платформі дозволяє отримати 1,16 Вт електричної потужності при одному кроці натискання на неї. Визначено, що для типового харківського маршруту № 276е використання в електробусі, який за зміну робить 25 рейсів, а за рейс в нього

заходять і виходять 100 осіб, двох таких платформ, дозволить згенерувати 11,6 кВт електричної потужності;

- застосування сонячних панелей у якості додаткового джерела енергії найбільш ефективно при опорі навантаження 3...3,5 Ом;

- застосування енергогенеруючого дорожнього покриття площею 8,25 м<sup>2</sup>, яке складається зі 150 панелей, дозволить отримати додатково 3,6 МДж електричної енергії;

- баланс енергії для міського електробуса дозволяє розробити комплексний підхід до визначення енергії потрібної для його зарядки з урахуванням як зовнішніх альтернативних систем генерації електричної енергії, так і розташованих на борту та залежить від багатьох факторів.

3. Удосконалено метод створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації електричної енергії для міського пасажирського транспорту:

- в електробусі з використанням лінійного електрогенератора та електричної машини обертового типу з триступеневим мультиплікатором, що дозволяє збільшити автономність ходу на 3-5 %;

- в транспортній інфраструктурі для зарядки міських електробусів, що використовують пристрій примусового зниження швидкості з генеруванням електричної енергії та енергогенеруюче дорожнє покриття, що дозволяє зменшити споживання електричної енергії від мережі.

4. Запропонована методологія комплексної оцінки електродвигунів тягового електроприводу являє собою інтегральний підхід до створення єдиних методів і засобів діагностування і побудована на семирівневій ієрархії, яка пов'язує між собою напрямки та завдання розробки методів оцінки електродвигунів за рівнями вібрацій на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації, що дозволяє підвищити експлуатаційні властивості електробуса.

5. Метод діагностування електродвигунів тягового електроприводу електробусів за показниками рівнів вібрації дозволяє оцінити їх технічний стан у відповідності до розроблених класів. Визначені значення допустимих вібраційних прискорень тягових електродвигунів електробусів, які дозволяють оцінювати їх технічний рівень:

- допустимими вібраціями є рівні вібрації обмежені прямою 40 дБ на частоті 5 Гц і 80 дБ на частоті 10 кГц;

- не допустимими вібраціями є рівні вібрації, що перевищують пряму 40 дБ на частоті 5 Гц і 80 дБ на частоті 10 кГц;

- визначений метод дозволив розробити класи оцінки технічного стану електродвигунів за рівнем їх вібрації, що дозволяє прогнозувати їх ресурс: клас Г (зона обмежена зверху прямою з рівнями вібрації 40 дБ на частоті 5 Гц; 80 дБ на частоті 10 кГц, а знизу – прямою, що є верхнім обмеженням класу Д); клас Д (зона обмежена зверху прямою з рівнями вібрації 32 дБ на частоті 5 Гц; 72 дБ на частоті 10 кГц, а знизу – прямою, що є верхнім обмеженням класу Е); клас Е (зона обмежена зверху прямою з рівнями вібрації 24 дБ на частоті 5 Гц; 64 дБ на частоті 10 кГц);

- при контролі якості ремонту електродвигуна тягового електроприводу рівні вібрації не повинні перевищувати більше ніж на 4 дБ рівні вібрації нового електродвигуна.

6. Розроблено модель оптимізації інфраструктури швидкої зарядки для міських електробусів за допомогою якої вирішується задача визначення раціональної необхідної кількості і відповідного розташування зарядних станцій і необхідних параметрів накопичувачів енергії для кожного електробуса на маршруті. Встановлено, що загальні витрати на прокладання тролейбусного маршруту більші за електробусний в 2,65 рази.

7. Розроблено рекомендації щодо розвитку, реконструкції та переоснащення підприємств експлуатації міського автотранспорту шляхом інтеграції альтернативних систем генерації електричної енергії в транспортну інфраструктуру, що дозволяє підвищити технічний рівень міського пасажирського транспорту.

Практична значимість результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження на різних підприємствах і станціях технічного обслуговування України: ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж»»; ТОВ «Альфа Центр Харків»; «Elcars» (ФОП. Сохін П.А.); ТОВ «ОЛЛ ТРАК ПАРТС»; у навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Гнатів А. В., Аргун І. В., Бікова О. В., та ін. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.
2. Аргун І. В. Ретроспектива розвитку об'єдиненої енергетическої системи України. *Вісник ХНАДУ*. 2014. № 67. С. 134–137.
3. Аргун І. В. Проекти та моделі сонячних зарядних станцій для електромобілів. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 80. С. 45–52.
4. Argun S. Types of alternative energy and prospects for their use in Ukraine. *Автомобільний транспорт*. 2014. № 35. С. 29–33.
5. Аргун І. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*. 2018. № 43. С. 36–46.
6. Гнатів А. В., Аргун І. В. Ретроспектива основних етапів розвитку електромобілів. Частина 1. *Вісник ХНАДУ*. 2017. № 77. С. 68–74.
7. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. Study of load characteristics of various types of silicon PV panels for sustainable energy efficient road pavement. *Electrical, control and communication engineering*. 2019. Vol. 15. № 1. P. 30-38. (Web of Science)
8. Гнатів А. В., Аргун І. В. Енергогенеруюча плитка як альтернативне малопотужне джерело електричної енергії. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 40. С. 167–172.
9. Gnatov A., Argun S. New method of car body panel external straightening: *Tools of method. international journal of vehicular technology*. 2015. Vol. 2015. P. 1–7. (Scopus, квартиль Q3)
10. Гнатів А. В., Аргун І. В., Дзюбенко О. А. Вибір схеми технічного рішення енергогенеруючої сходинки. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 81. С. 29–38.
11. Гнатів А. В., Аргун І. В., Киценко О. Р. Сучасні дороги та дороги майбутнього, їх види та перспективи використання. *Вісник ХНАДУ*. 2017. № 76. С. 66–73.

12. Мигаль В. Д., Аргун Щ. В. Вибір методу оцінки якості асинхронних тягових електродвигунів для електробусів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2019. Вип. 15. С. 105–113.
13. Patlins A., Hnatov A., Arhun S., та ін. Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation research procedia*. 2019. Vol. 40. P. 434–441. (Scopus)
14. Arhun S., Hnatov A., Dziubenko O., та ін. A Device for Converting Kinetic Energy of Press Into Electric Power as a Means of Energy Saving. *Journal of the korean society for precision engineering*. 2019. Vol. 36, № 1. P. 105–110. (Scopus, квартиль Q2)
15. Hnatov A., Arhun S., Ponikarovska S. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 14, № 4. P. 4649–4664. (Scopus, квартиль Q2)
16. Аргун Щ. В. Алгоритм підготовки транспортної інфраструктури до масштабного використання автодорожнього електротранспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2016. Вип. 10. С. 12–18.
17. Аргун Щ. Електробуси – перспективний міський транспорт Харкова. *Автомобільний транспорт*. 2019. № 44. С. 59–65.
18. Аргун Щ. В. Визначення найбільш ефективних тягових джерел струму для електромобілів. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 41. С. 11–22.
19. Dvadnenko V., Arhun S., Bogajevskiy A., та ін. Improvement of economic and ecological characteristics of a car with a start-stop system. *International journal of electric and hybrid vehicles*. 2018. Vol. 10, № 3. P. 209–222. (Scopus, Web of Science, квартиль Q3)
20. Hnatov A., Arhun Shch., Dziubenko O., та ін. Choice of electric engines connection circuits in electric machine unit of electric power generation device. *Majlesi journal of electrical engineering*. 2018. Вип. 12, № 4. P. 85–93. (Scopus)
21. Аргун Щ. В. Енергозберігаючі технології на основі п'єзоелектричного ефекту для автомобільної техніки. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 11. С. 13–19.
22. Аргун Щ., Гнатов А. Электромобиль и его тяговый электропривод с асинхронным двигателем: монографія: *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2017. 224 с.
23. Аргун Щ., Гнатов А., Марченко Д. Энергосберегающие технологии на автобусном транспорте: монографія: *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2017. 176 с.  
*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*
24. Аргун Щ. В., Гнатов А. В. Сонячні зарядні станції як невід'ємна частина транспортної інфраструктури: *Автомобільний транспорт і автомобілебудування. Новітні технології і методи: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції, 20-21 жовтня 2017 р. Харків : ХНАДУ, 2017. С. 53–54.*
25. Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Дзюбенко О. А., та ін. Энергогенерирующая плитка з електромашинним вузлом на базі крокових двигунів: *Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем: II Всеукраїнська науково-технічна конференція, 3–6 грудня 2018 р. Харків: Друкарня Мадрид, 2018. С. 14–16.*
26. Аргун Щ. В., Ульянец О. А., Бармін В. А. Тягові акумуляторні батареї для електромобіля: *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: матеріали V Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 20-21 листопада 2017 р. Харків: ХНАДУ, 2017. С. 10–12.*

27. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Електробус на суперконденсаторах для наземної аеродромної техніки: *Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки*: тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 20-21 квітня 2016 р. Харків : ХАІ, 2016. С. 145–147.

28. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Розумні дороги, як основа сучасних технологій для автомобільного транспорту: *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали Х міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 жовтня 2017 р. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 87–89.

29. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Киценко О. Р. Ресурсозберігаючі технології в транспортній інфраструктурі. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні*: матеріали другої всеукраїнської науково-практичної конференції, 23-25 травня 2017 р. Херсон: ХДМА, 2017. С. 306–309.

30. Гнатов А. В., Підгора О. В., Аргун Щ. В., та ін. Дослідження блоку накопичення для міського електробусу на суперконденсаторах: *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*: матеріали VI Міжнародної науково-технічної інтернетконференції, 19-20 листопада 2018 р. Харків: ХНАДУ, 2018. С. 73–74.

31. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Енергоефективні та енергозберігаючі технології на транспорті : *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні: матеріали III-ї всеукраїнської науково-практичної конференції*, 22-23 лютого 2018 р. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2018. С. 42–43.

32. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Малопотужна система енергозбереження та генерації електричної енергії для транспортних засобів: *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 7-мої міжнародної науково-практичної конференції, 22-23 вересня 2016 р. Херсон: ХДМА, 2016. С. 56–57.

33. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Міський електробус з надшвидкою зарядкою: *Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні*: матеріали II-ї всеукраїнської науково-практичної конференції, 17-18 березня 2016 р. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. С. 43–44.

34. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Інноваційні енергоефективні технології при проектуванні та виробництві сучасних автотранспортних засобів: *Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство* : матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 21-22 вересня 2017 р. Херсон: ХДМА. 2017. С. 17–18.

35. Arhun S. Впровадження енергоефективного міського транспорту в Харкові на базі електробусів: *Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine* : International scientific and practical conference, 21 December 2018. Wljalawek, Republic of Poland: Izdevnieciba “Baltija Publishing”. 2018. С. 17–20.

36. Hnatov A., Arhun S., Ulyanets O., та ін. Ultracapacitors Electrobus for Urban Transport: *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 24 April 2018. Kyiv : 2018. С. 539–543. (Scopus)

37. Gnatov A., Argun S., Rudenko N. Smart road as a complex system of electric power generation: *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering: IEEE 2017*, 29 трав.–2 черв. 2017 р. Kiev, 2017. P. 457–461. (Scopus)

38. Patlins A., Hnatov A., Kunicina N., Arhun S. та ін. Sustainable pavement enable to produce electricity for road lighting using green energy: *International Conference on Energy and Sustainability in Small Developing Economies, 2018 International Conference, IEEE 2018*, 12 лип. 2018 Funchal, 2018. P. 21–26. (Scopus, Web of Science)

39. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. Safety of Pedestrian Crossings and Additional Lighting Using Green Energy: *Transport Means 2018: Proceedings of 22nd International Scientific Conference*, 5 oktob. 2018. Kaunas: Kaunas University of Technology : 2018. P. 527–531. (Scopus)

40. Patlins A., Arhun S., Hnatov A., та ін. Determination of the Best Load Parameters for Productive Operation of PV Panels of Series FS-100M and FS-110P for Sustainable Energy Efficient Road Pavement: *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON 2018): Conference Proceedings*, 12 Nov. 2018. Riga : RTU, 2018, P. 1–6. (Scopus)

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

41. Спосіб роботи електробуса на суперконденсаторах з над швидкою зарядкою для міських перевезень: пат. 114643 Україна : B60L11/00, B60L9/00. Гнатів А. В., Аргун Щ. В., Гнатова Г. А., та ін.; заявл. 11.10.2016 ; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5.

42. Електромеханічний пристрій перетворення кінетичної енергії в електричну: пат. 121491 Україна : H02K 7/00, H02K 7/12, H02K 35/00, H02K 35/02, H02N 2/18, H01L 41/04. Гнатів А. В., Аргун Щ. В.; заявл. 02.06.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

## АНОТАЦІЯ

**Аргун Щ. В.** Підвищення експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту застосуванням електричного приводу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори (274 – Автомобільний транспорт) – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми підвищення експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту. Напрямок дослідження визначена необхідність розробки нових науково обґрунтованих методик та підходів до впровадження альтернативних систем генерації електричної енергії (АСГЕЕ) для міського електробуса (ЕБ).

Проведено системний аналіз сучасного стану міського пасажирського транспорту. Доведено необхідність використання електричного приводу і АСГЕЕ для підвищення його експлуатаційних властивостей. Теоретичні і експериментальні дослідження електромеханічних процесів в силовій установці ЕБ виявили особливості їх протікання при використанні блоку суперконденсаторів (СК) як тягового джерела енергії і альтернативних джерел енергії. Встановлено, що застосування блоку СК в ЕБ дозволяє зменшити добові витрати в 2 рази, в порівнянні з гібридним автобусом, і в 2,5 рази, в порівнянні з автобусом з ДВЗ. Удосконалено метод створення



об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ для міського пасажирського транспорту: в ЕБ з використанням лінійного електрогенератора та електричної машини обертового типу з триступеневим мультиплікатором, що дозволяє збільшити автономність ходу на 3-5 %; в транспортній інфраструктурі для зарядки міських електробусів, що використовують пристрій примусового зниження швидкості з генеруванням ЕЕ та енергогенеруюче дорожнє покриття і дозволяє зменшити споживання ЕЕ від мережі.

Запропонована методологія комплексної оцінки електродвигунів (ЕД) тягового електроприводу являє собою інтегральний підхід до створення єдиних методів і засобів діагностування і побудована на семирівневій ієрархії, яка пов'язує між собою напрямки та завдання розробки методів оцінки ЕД за рівнями вібрацій на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації, що дозволяє підвищити експлуатаційні властивості ЕБ. Визначені значення допустимих вібраційних прискорень тягових ЕД ЕБ, які дозволяють оцінювати їх технічний рівень.

Розроблено модель оптимізації інфраструктури швидкої зарядки для міських ЕБ за допомогою якої вирішується задача визначення необхідної кількості і відповідного розташування зарядних станцій і необхідних параметрів накопичувачів енергії для кожного ЕБ на маршруті. Встановлено, що загальні витрати на прокладання тролейбусного маршруту більші за електробусний в 2,65 рази. Розроблено рекомендації щодо розвитку, реконструкції та переоснащення підприємств експлуатації міського автотранспорту шляхом інтеграції АСГЕЕ в транспортну інфраструктуру, що дозволяє підвищити технічний рівень міського пасажирського транспорту.

**Ключові слова:** тяговий електропривод, електродвигун, суперконденсатор, генерація електричної енергії, електрозоправна станція, експлуатація, електробус, транспортний засіб.

## АННОТАЦИЯ

**Аргун Щ. В.** Повышение эксплуатационных свойств городского пассажирского транспорта применением электрического привода. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины. – Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению проблемы повышения эксплуатационных свойств городского пассажирского транспорта. Направлением исследования определена необходимость разработки новых научно обоснованных методик и подходов к внедрению альтернативных систем генерации электрической энергии (АСГЭЭ) для городского электробуса (ЭБ).

Проведен системный анализ современного состояния городского пассажирского транспорта. Доказана необходимость использования электрического привода и АСГЕЕ для повышения его эксплуатационных свойств. Усовершенствован метод создания объединенной системы альтернативных источников генерации электроэнергии для городского пассажирского транспорта в ЭБ и в транспортной инфраструктуре.

Предложенная методология комплексной оценки электродвигателей (ЭД) тя-

гового электропривода представляет собой интегральный подход к созданию единых методов и средств диагностирования и построена на семиуровневой иерархии, которая связывает между собой направления и задачи разработки методов оценки ЭД по уровням вибраций на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации, что позволяет повысить эксплуатационные свойства ЭБ. Определены значения допустимых вибрационных ускорений тяговых ЭД ЭБ, которые позволяют оценивать их технический уровень.

Разработана модель оптимизации инфраструктуры быстрой зарядки для городских ЭБ. Разработаны рекомендации по развитию, реконструкции и переоснащению предприятий эксплуатации городского автотранспорта путем интеграции АСГЕЕ в транспортную инфраструктуру.

**Ключевые слова:** тяговый электропривод, электродвигатель, суперконденсатор, генерация электроэнергии, электрозаправочная станция, эксплуатация, электробус, транспортное средство.

## ABSTRACT

**Arhun. Shch.** Improving the Performance of Urban Passenger Transport by Using an Electric Drive. – Qualifying research paper, manuscript copyright.

Doctoral thesis in Engineering Science in specialty 05.22.02 – Automobiles and tractors. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kharkiv, 2020.

The thesis is dedicated to solving the problem of improving the performance of urban passenger transport. The direction of the study was identified by the need to develop new scientifically based methods and approaches to the introduction of alternative systems for generating electrical energy (ASGEE) for an urban electric bus (EB).

A systematic analysis of the current state of urban passenger transport has been made. The necessity of using an electric drive and ASGEE to improve its performance has been proved. The method of creating a unified system of alternative sources of energy generation for urban passenger transport has been improved in the electric vehicle and in the transport infrastructure.

The proposed methodology for the integrated assessment of electric motors (EM) of a traction electric drive is an integrated approach to creating unified diagnostic methods and tools, and is built on a seven-level hierarchy, that interconnects the directions and tasks of developing methods for evaluating EM by vibration levels at the design, manufacturing and operation stages, which makes possible to increase operational properties of EB. The values of permissible vibrational accelerations of traction electric motors of EB are determined, which allow to evaluate their technical level.

A model has been developed for optimizing the fast charging infrastructure for urban electric batteries. Recommendations have been made on the development, reconstruction and re-equipment of enterprises of urban transport operation by integrating ASGEE into the transport infrastructure.

**Key words:** traction electric drive, electric motor, supercapacitor, power generation, gas station, operation, electric bus, vehicle.