

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АРГУН ЩАСЯНА ВАЛКОВНА

УДК 629.3

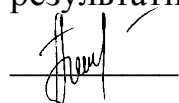
ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ
ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

Галузь знань – 27 Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Щ. В. Аргун

Науковий консультант Бажинов Олексій Васильович, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Аргун Ш.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 Міністерства 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 для міського електробуса.

У дисертації теоретично узагальнено і показано розвиток наукових основ актуальної науково-технічної проблеми підвищення 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.

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

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 триступневим мультиплікатором, пристрою примусово-

го 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 м², 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.

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 тріступеневим 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, дозволяє зменшити споживання електричної енергії від мережі.

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.

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).

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

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.

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.

Практичне значення отриманих 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 рівень 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».

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О. В., та ін. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.
2. Аргун Щ. В. Ретроспектива розвитку объединенной энергетической системы Украины. *Вісник ХНАДУ*. 2014. № 67. С. 134–137.
3. Аргун Щ. 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 Щ. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*. 2018. № 43. С. 36–46.
6. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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, кuartиль Q3)
10. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Дзюбенко О. А. Вибір схеми технічного рішення енергогенеруючої сходинки. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 81. С. 29–38.
11. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. . 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. Енергогенеруюча 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 X 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. Wlajclawek, 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. Київ, 2017. Р. 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. Р. 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. Р. 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, Р. 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 : В60L11/00, В60L9/00. Гнатов 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. Гнатов А. В., Аргун І. В.; заявл. 02.06.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

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 (274 - Motor Transport) - Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to solving the problem of improving the performance of urban passenger transport. The research area identified the need to develop new scientifically substantiated methods and approaches to the implementation of alternative systems of generating electrical energy (ASGEE) for urban electric buses.

The thesis theoretically generalizes and shows the development of scientific bases of the actual scientific and technical problem of improving the performance of urban passenger transport by using an electric drive. It formed the basis for determining the patterns, developing the mathematical models and methods for creating ASGEE in transport, evaluating the technical state of traction electric motors (EM), at the stages of design, production and operation

A systematic analysis of the current state of urban passenger transport has been carried out. The necessity of using an electric drive and alternative systems of electricity generation to increase its operational properties has been proved.

Theoretical and experimental studies of electromechanical processes in the power plant of the bus revealed the peculiarities of their occurrence when using a block of supercapacitors as a traction source and alternative energy sources based on a linear electric generator, a rotating-type electric machine with a three-stage multi-

plier, a device of forced deceleration with generating electrical energy and an energy-generating road coating.

It is established that using the block of supercapacitors in the bus makes possible to reduce daily expenses twice in comparison with a hybrid bus, and by 2.5 times in comparison with a bus with an ICE; the use of a developed multiplier based on a pair of helical gears with a module of 1.5 and a total gear ratio of 9.8 in the energy-generating platform allows obtaining 4.2 kJ of electrical energy with one step of pressing it. It is determined that for a typical Kharkiv route No. 276e the use of two such platforms in an electric bus, which makes 25 runs for a shift, and for one shift 100 people get on and get off it, will allow generating 41.2 MJ of electricity; the use of solar panels as an additional source of energy is most effective when the load resistance is 3... 3.5 Ohms; the use of an energy-generating pavement with an area of 8.25 m², consisting of 150 panels, will enable to obtain additional 3.6 MJ of electricity. The energy balance for a city bus makes possible to develop a comprehensive approach to determining the amount of energy required for charging it, taking into account both external and onboard power generation systems, and depends on many factors.

The method of creating a combined system of alternative sources of electricity generation for urban passenger transport has been improved: in the electric bus with a linear electric generator and a rotary type electric machine with a three-stage multiplier, which allows to increase the autonomy of the course by 3-5%; in the transportation infrastructure – for charging city buses, that use a forced deceleration device with electricity generation and a power-generating pavement, it reduces consuming electricity from the grid.

The proposed methodology for complex evaluation of traction electric motors is an integrated approach to creating unified methods and means of diagnosis and is built on a seven-level hierarchy, which interconnects the directions and tasks of developing methods of estimating electric motors at the levels of vibration at the stages of design, production and operation, that makes possible to improve the performance of the bus.

The method of diagnostics of electric traction electric motors of electric buses by the indicators of vibration levels allows estimating their technical condition in accordance with the developed classes. The values of allowable vibrational accelerations of traction electric motors of electric buses are determined, which enable to estimate their technical level: the allowable vibrations are the vibration levels limited by the line of 40 dB at 5 Hz and 80 dB at 10 kHz; vibration levels exceeding the direct 40 dB at 5 Hz and 80 dB at 10 kHz are not allowed. This method allowed to develop classes of evaluation of the technical state of the motors by their vibration level, which makes possible to predict their resource: class G (the zone is limited from the top by a vibration level of 40 dB at a frequency of 5 Hz; 80 dB at a frequency of 10 kHz, and from below – by a line that is the upper limit of Class D); class D (zone limited from above by a line with vibration levels of 32 dB at a frequency of 5 Hz; 72 dB at a frequency of 10 kHz and below – by a line which is the upper limit of class E); class E (zone limited from above by the line with vibration levels of 24 dB at 5 Hz; 64 dB at 10 kHz); when controlling the quality of repair of traction electric motor, the vibration levels must not exceed the vibration levels of the new motor by more than 4 dB.

A model of optimization of fast charging infrastructure for urban electric buses is developed. It solves the problem of determining the required rational number and appropriate location of charging stations and the required energy storage parameters for each electric bus on the route. It is found that the total cost of laying the trolley-bus route is 2.65 times higher than laying the routes for the bus.

Recommendations for the development, reconstruction and re-equipment of urban vehicles by the integration of alternative systems of electricity generation into a transport infrastructure have been developed, which allows increasing the technical level of urban passenger transport.

The practical significance of the results obtained. The results of the thesis research can be used for increasing the efficiency of an urban bus operation.

Scientific provisions, development and recommendations, suggested in the thesis, are implemented:

– in the scientific and practical activity of LLC "NMU" Electroplating ". The experimentally determined parameters for reducing the level of vibration excited by magnetic sources and based on the choice of groove shape of the rotor core are used as well as the method of determining the operational suitability of electric motors and the level of their technical quality by vibro-diagnostic characteristics;

– by the official Subaru dealer in Kharkiv and in the Kharkiv region, "Alfa Center Kharkiv" LLC. The following are used: the method of creating electricity generation and storage systems for transport and its infrastructure (electric machines of various types with a multiplier), which made it possible to increase the efficiency of converting kinetic energy into electrical energy for the operation of road transport; the values of allowable vibration acceleration of electric motors were determined, which allowed evaluating the operational suitability of motors by the parameters of vibration reduction relative to allowable values, determine their technical quality, determining their resource and developing requirements for vibration characteristics of electric motors in order to increase their competitiveness;

– by "ALL TRAK PARTS" LLC. The method of creating a system of generation and storage of electrical energy on the basis of a three-stage multiplier is used, which allowed to create an alternative source of electricity on the territory of the enterprise with the help of an experimental sample of the power generating panel. This made it possible to get uninterrupted power in the event of a power failure and reduce the overall level of electricity consumption by 2.7%. The analysis of the obtained results enables to conclude that it is advisable to use several devices simultaneously, which will increase the effectiveness of this proposal;

– by "Elcars" Company (IP P.A. Sokhin). The methods of expanding the charging base of electric vehicles and electric buses by means of low-power alternative systems of energy saving and generation of electricity and methods of creating systems of generation and storage of electricity in transport and its infrastructure are used. Trials and implementation of these results of the thesis research makes possible to create systems of generation and storage of electricity in transport and its in-

frastructure, in order to use the generated electricity for charging the traction batteries of electric vehicles.

– in the educational process at the Kharkiv National Automobile and Highway University when training bachelors and masters in the specialty 141 “Electricity, Electrical Engineering and Electromechanics”.

Keywords: traction electric drive, electric motor, supercapacitor, generation of electrical energy, power station, operation, electric bus, vehicle.

List of publications of the applicant.

Scientific papers in which the main scientific results of the dissertation are published: [1–31]

1. Hnatov A.V., Arhun Shch.V., Bykova O. V, and others. Supercapacitor electric bus for urban transportation. HNAD Bulletin. 2016. № 72. P. 29–34.

2. Arhun Shch.V. The retrospective of the development of the united energy system of Ukraine. HNAD Bulletin. 2014. № 67. P. 134–137.

3. Arhun Shch.V. Designs and models of solar charging stations for electric vehicles. HNAD Bulletin. 2018. № 80. P. 45–52.

4. Arhun Shch.V. Types of alternative energy and prospects for their use in Ukraine. Road transport. 2014. № 35. P. 29–33.

5. Arhun Shch. V. Calculation of main characteristics of traction induction motor for electric transmission of city bus. Road transport. 2018. № 43. P. 36–46.

6. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. The retrospective of the main stages of the development of electric vehicles. Part 1. HNAD Bulletin. 2017. № 77. P. 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.

8. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. The energy-generating tile as an alternative low-power source of electricity. Road transport. 2017. № 40. P. 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, quartile Q3)

10. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Dzyubenko O. A. Choosing a scheme for the technical solution of an energy-generating step. *HNADU Bulletin*. 2018. № 81. P. 29–38.
11. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Kitsenko O. R. Modern roads and roads of the future, their types and prospects of use. *HNADU Bulletin*. 2017. № 76. P. 66–73.
12. Migal V. D., Arhun Shch. V. The choice of a method of estimating the quality of asynchronous traction motors for electric buses. *Car and electronics. Modern technology*. 2019. No. 15. P. 105–113.
13. Patlins A., Hnatov A., Arhun S. et al. Design and research of constructive features of paving slabs for power generation by pedestrians. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 434–441.
14. Arhun S., Hnatov A., Dziubenko O., et al. 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, quartile 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, quartile Q2)
16. Arhun Shch. V. The algorithm of preparation of transport infrastructure for large-scale use of road electric transport. *Car and Electronics. Modern technology*. 2016. Vol. 10. P. 12–18.
17. Arhun S. Electric buses - perspective city transport of Kharkov. *Road transport*. 2019. № 44. P. 59–65.
18. Arhun Shch. V. Determination of the most effective traction current sources for electric vehicles. *Road transport*. 2017. № 41. P. 11–22.
19. Dvadnenko V., Arhun S., Bogajevskiy A., et al. Improvement of economic and environmental characteristics of a car with a start-stop system. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2018. Vol. 10 (3). P. 209–222. (Scopus, quartile Q3)
20. Hnatov A., Arhun Shch., Dziubenko O., et al. Choice of Electric Engines

Connection Circuits and Electric Power Generation Device Unit. Miles Journal of Electrical Engineering. 2018. Vol. 12 (4). P. 85–93.

21. Arhun Shch. Energy-saving technologies based on piezoelectric effect for automotive technology. Car and electronics. Modern technology. 2017. Vol. 11. P. 13–19.

22. Arhun Shch., Gnatov A. The electric car and its traction electric drive with an induction motor: monograph: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 224 p.

23. Arhun Shch., Hnatov A., Marchenko D. Energy-saving technologies on bus transport: monograph: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 176 p.

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

24. Arhun Shch. V., Hnatov A. V. Solar charging stations as an integral part of the transport infrastructure: *Road transport and automotive engineering. New technologies and methods: Scientific papers of the international scientific and practical conference*, October 20-21, 2017 Kharkiv: KhNADU, 2017. P. 53–54.

25. Arhun Sh. V., Hnatov A.V., Dzubenko O. A., and others. Power generating tile with step-based electromachine assembly: *Energy efficiency and energy security of power systems: Second all-ukrainian scientific and technical conference*, December 3-6, 2018 Kharkov: Madrid Printing House, 2018. P. 14-16.

26. Arhun Shch. V., Ulyanets O. A., Barmin V. A. Traction battery packs for electric vehicles: *Car and electronics. Modern technologies: Proceedings of the 5th International scientific and technical internet conference*, November 20-21, 2017 Kharkiv: KhNADU, 2017. P. 10–12.

27. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. The electrobus on supercapacitors for ground aerodrome engineering: *Problems of creation and maintenance of life cycle of aviation engineering: abstracts of reports of the international scientific and technical conference*, April 20-21, 2016 Kharkov: HAI , 2016. P. 145–147.

28. Hnatov A. V., Arhun Shch. V. Reasonable roads as a basis for modern technologies for road transport: Modern technologies and prospects for road transport development: *Proceedings of the 10th international scientific and practical conference*, 23-25 October 2017, Vinnitsa : VNTU, 2017. P. 87–89.

29. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Kitsenko O. R. Resource-saving technologies in transport infrastructure. Modern information and innovative technologies in transport: Bus construction and passenger transportation in Ukraine: *Proceedings of the second all-ukrainian scientific and practical conference*, May 23-25, 2017, Kherson: KhDMA, 2017. P. 306-309.

30. Hnatov A. V., Podgora O. V., Arhun Shch. V., et al. Accumulation block investigation for urban supercapacitor electric bus: *Car and electronics. Modern technologies: Proceedings of the VI international scientific and technical internet conference*, November 19-20, 2018 Kharkiv: KhNADU, 2018. P. 73-74.

31. Hnatov A. V., Ulyanets O. A., Arhun Shch.V. Energy efficient and energy efficient transport technologies: Bus-building and passenger transportation in Ukraine: materials of the third all-ukrainian scientific and practical conference, February 22-23, 2018. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2018. P. 42–43.

32. Hnatov A., Ulyanets O., Arhun Shch.V. The low-power system of energy saving and generation of electricity for vehicles: Modern energy installations for transport and technologies and equipment for their maintenance: *Materials of the 7th international scientific- practical conference*, Sept. 22-23, 2016, Kherson: CDMA, 2016. P. 56–57.

33. Hnatov A. V., Ulyanets O. A., Arhun Shch. V. Ultra-fast urban electric bus : *materials of the II-th All-Ukrainian scientific-practical conference*, March 17-18, 2016 Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. P. 43–44.

34. Hnatov A., Ulyanets O., Arhun Shch.V. Innovative energy-efficient technologies in the design and production of modern motor vehicles: *Transport: mechanical engineering, operation, materials science: materials of international scientific and technical conference*, September 21-22, 2017 Kherson: CDMA. 2017. P. 17–18.

35. Arhun S. Implementation of energy efficient urban transport in Kharkov based on electric buses: 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. P. 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)

Scientific works which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

41. Method of operation of electric bus on supercapacitors with supercharging for urban transportation: Pat. 114643 Ukraine: B60L11/00, B60L9/00. Hnatov A. V., Arhun Shch. V., Gnatova H. A., et al.; claimed 11/10/2016; publ. 10/03/2017, Bul. № 5.

42. Electromechanical device for converting kinetic energy into electrical: US Pat. 121491 Ukraine: H02K 7/00, H02K 7/12, H02K 35/00, H02K 35/02, H02N 2/18, H01L 41/04. Hnatov A. V., Arhun Shch. V; claimed 02.06.2017; publ. 12/11/2017, Bul. № 23.

ЗМІСТ

Вступ.....	26
Розділ 1 Сучасний стан проблеми застосування електричного приводу в міському пасажирському автотранспорті.....	35
1.1 Системний аналіз перспектив розвитку автомобільного транспорту з електричним приводом	38
1.2 Переваги та недоліки експлуатації електробусів у порівнянні з існуючим міським дорожнім транспортом.....	48
1.3 Аналіз витрат енергоресурсів для порівняння автобусів різних типів.....	56
1.4 Обґрунтування напрямків дослідження і постановка завдань	60
Висновки за розділом 1.....	67
Розділ 2 Силова установка електробуса як об'єкт управління.....	68
2.1 Конфігурації електричних транспортних засобів. Основні конструкції електробусів	69
2.2 Дослідження основних технічних характеристик електробусів	75
2.2.1 Основні характеристики тягових електродвигунів	76
2.2.2 Тягові сили і вимоги до передачі.....	77
2.2.3 Визначення ефективності електробуса	80
2.2.4 Тягове зусилля в міському циклі руху електробуса	81
2.2.5 Енергоспоживання електробуса	83
2.3 Вибір тягового джерела електричної енергії для електробуса.....	85
2.3.1 Вимоги до тягового джерела струму.....	86
2.3.2 Аналіз накопичувачів енергії різних типів.....	91
2.3.3 Електрична модель суперконденсатора.....	96
2.4 Критерії оптимальності вибору електродвигуна для тягового електропривода міського електробуса.....	103
2.5 Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса.....	110
2.6 Автоматичне управління тяговим асинхронним двигуном.....	117

2.7 Дослідження моделі електричної силової установки електробуса в програмному середовищі MathLab Simulink.....	126
Висновки за розділом 2.....	137
Розділ 3 Теоретичне обґрунтування використання альтернативних систем генерації електричної енергії	139
3.1 Типи зарядних станцій для транспортних засобів на електричній тязі .	139
3.2 Організації зарядної інфраструктури для електробусів шляхом переоснащення існуючих тягових підстанцій.....	143
3.3 Методи створення альтернативних систем генерації електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі	146
3.4 Обґрунтування вибору схеми підключення електродвигунів у електромашинному вузлі пристрою генерації електричної енергії.....	158
3.5 Синтез кінематичної схеми енергогенеруючої платформи з триступеневим мультиплікатором.....	166
3.6 Схеми сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів.....	176
3.7 Енергоефективність сонячної зарядної станції.....	185
3.8 Трекерна система для сонячної зарядної станції.....	188
3.9 Дослідження навантажувальних характеристик різних типів кремнієвих сонячних панелей.....	191
3.10 Модель лінійної оптимізації інфраструктури швидкої зарядки для міських електробусів.....	201
Висновки за розділом 3.....	213
Розділ 4 Теоретичні основи комплексної оцінки вібродіагностичних характеристик тягових електродвигунів електробусів	215
4.1 Методологія комплексної оцінки електродвигунів тягового електроприводу.....	217
4.2 Методи оцінки технічного стану електродвигунів тягового електроприводу.....	222

4.3	Обґрунтування критеріїв і методів оцінки електродвигунів тягового електроприводу за вібродіагностичними характеристиками	224
4.4	Параметри вібраційних сигналів	235
4.5	Методи дослідження рівня вібрації для оцінки технічного стану ЕД	240
4.6	Визначення дефектів електродвигунів за джерелами вібрації	246
4.7	Забезпечення нормативних значень технічного рівня тягових ЕД електробусів за вібродіагностичними характеристиками.....	248
	Висновки за розділом 4.....	253
	Розділ 5 Експериментальне дослідження оцінки надійності електродвигуна тягового електропривода електробуса за показниками вібрації	254
5.1	Об’єкти, методи, обладнання та засоби вимірювання вібрації електродвигунів.....	255
5.2	Опис експериментального стенду	258
5.3	Експериментальне дослідження вібраційних характеристик вибірки випробуваних електродвигунів.....	260
5.4	Експериментальне дослідження впливу форми паза магнітопроводу ротора на вібраційні характеристики електродвигунів.....	269
5.5	Експериментальне визначення допустимої вібрації і зв’язок вібрації з ресурсом електродвигуна	271
	Висновки за розділом 5.....	285
	Розділ 6 Реалізація теоретичних і експериментальних результатів дослідження	287
6.1	Рекомендації щодо створення об’єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ в транспортній інфраструктурі	287
6.2	Рекомендації щодо проектування і вибору електродвигунів тягового електроприводу електробусів	292
6.3	Рекомендації щодо забезпечення технічного стану тягового електроприводу електробуса у відповідності до нормативних значень	294

6.4 Економічна ефективність від впровадження електробуса на типовому міському маршруті	296
6.5 Теоретичний розподіл енергії в міському електробусі при використанні альтернативних систем генерації електричної енергії	301
Висновки за розділом б.....	308
Висновки	309
Список використаних джерел	312
Додаток А Параметричний синтез систем стабілізації електробуса під час руху	335
Додаток В Експериментальне дослідження вібраційних характеристик асинхронних електродвигунів.....	348
Додаток Г Акти впровадження	355
Додаток Д Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	361

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АГ – асинхронний генератор;
АД – асинхронний електродвигун;
АСГЕЕ – альтернативні системи генерації електричної енергії;
АКБ – акумуляторна батарея;
ВДЕ – відновлюване джерело енергії;
ВДХ – вібродіагностичні характеристики;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ДПС – двигун постійного струму;
ЕБ – електробус;
ЕГ – електрогенератор;
ЕД – електродвигун;
ЕЕ – електрична енергія;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
СД – синхронний електродвигун;
СЗА – стану заряду акумулятора;
СЕ – сонячна електростанція;
СК – суперконденсатор;
СП – сонячна панель;
ТЗ – транспортний засіб;
ТМП – точка максимальної потужності;
ТП – тягова підстанція;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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 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 систем 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 науководослідницьких тем: «Розробка системи енергозбереження та генерації електричної енергії для транспортних засобів» (ДР №0117U002406); «Розробка сонячної зарядної станції для електромобілів» (ДР №0119U001299).

Мета і завдання 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 **завдання**:

- 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 троллейбусом 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, силової установки електробуса та енергоефективних систем генерації електричної енергії; методах математичного та імітаційного моделювання в програмному середовищі MathLab з метою вивчення процесів, що протікають в електричній силовій установці електробуса; 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 критерію 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 отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи можуть використовуватися для підвищення технічного рівня та експлуатаційних властивостей міського електробуса і альтернативних систем генерації електричної енергії. Розроблено рекомендації щодо розвитку, реконструкції та переоснащення підприємств експлуатації міського автотранспорту.

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 рівень 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 до-

зволило 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 авто-

мобілебудування. Новітні технології і методи» (Харків, ХНАДУ, 2017 р.); II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» (Харків, ХПІ, , 2018 р.); V-ій 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-ій міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінниця, ВНТУ, 2017 р.); II-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Херсон, ХДМА, 2017 р.); VI-ій Міжнародній науково-технічній інтернет конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (Харків, ХНАДУ, 2018 р.); III-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2018 р.); 7-ій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, ХДМА, 2016 р.); II-ій 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» (Wlclawek, Republic of Poland: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2018 р.); IEEE 38th International Conference on «Electronics and Nanotechnology» (Київ, НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2018 р.); IEEE First Ukraine Conference on «Electrical and Computer Engineering» (Київ, НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 2017 р.); IEEE International Conference on «Energy and Sustainability in Small Developing Economies» (Funchal, Universidade da Madeira, 2018 р.); 22nd International Scientific Conference «Transport Means 2018» (Kaunas, Kaunas University of Technology, 2018 р.); 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.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДУ В МІСЬКОМУ ПАСАЖИРСЬКОМУ АВТОТРАНСПОРТІ

Аналіз забрудненості атмосфери міст з інтенсивним автомобільним рухом показав, що на першому місці за рівнем еколого-хімічного впливу на людину знаходяться оксиди азоту і канцерогенні вуглеводні. Виявлено, що в умовах міського середовища при взаємодії канцерогенних вуглеводних з оксидами азоту синтезуються значно небезпечніші для людини нітроканцерогенні речовини, що мають мутагенні властивості. Тому забруднення атмосфери міст оксидами азоту, канцерогенними та мутагенними речовинами, а також твердими частинками (особливо при використанні дизелів), що спричиняють транспортні засоби, на даний час є найбільш гострою проблемою, що вимагає негайного вирішення [43].

Німецька транспортна асоціація протягом останніх років формує так званий екологічний рейтинг автомобілів за критеріями, що відображає ступінь шкідливого впливу на здоров'я людини. На перше місце вона ставить канцерогенні вуглеводні. На думку медиків, саме їх частка в ризику виникнення злоякісних пухлин в великих містах складає $\approx 85\%$. Федеральне відомство з охорони навколишнього середовища сприяло тому, що урядом Німеччини була сформульована задача: в найближчі роки зменшити обумовлені автотранспортом викиди канцерогенів на 90% [43].

Країни Європи з 2015 року перейшли до норм екологічного стандарту «Євро-6», що регулює вміст шкідливих речовин у вихлопних газах. За цими стандартами Європейське співтовариство стимулює виробників до розробки енергозберігаючого та екологічно сумісного обладнання. Водночас, забруднення у великих містах змушує місцеву владу ухвалювати суворі екологічні вимоги до транспорту. Наприклад, Федеральний суд Лейпцига прийняв постанову, що влада німецьких міст має право заборонити в'їзд дизельних транспортних засобів (ТЗ) на територію своїх населених пунктів. При цьому в Німеч-

чині планується створення абсолютно безкоштовного громадського транспорту. Цей експеримент буде проведено спочатку в п'яти містах Німеччини. Уряд вживає такі заходи для того, щоб довести місто Берлін до європейського екологічного стандарту і уникнути колосальних штрафів, які передбачені для порушників екологічних стандартів.

У багатьох країнах поступово починають відмовлятися від авто з ДВЗ, наприклад, у Франції, Великобританії, Норвегії, Індії, Нідерландів, Німеччині та Китаю. Вони оголосили про відмову від транспортних засобів з ДВЗ і перехід на екологічні ТЗ вже до 2040 року. Що стосується міського транспорту – дизельні автобуси планують повністю замінити на більш екологічні і енергоефективні електробуси (ЕБ) або гібридні ТЗ.

Гібриди і електричні ТЗ забезпечують економію за рахунок гальмування (рекуперація енергії), що є найбільш актуальним для міст, де існує постійна необхідність додаткових зупинок на світлофорах або в пробках.

Навіть гібридні автобуси дозволяють суттєво зменшити витрати палива, що призводить до зменшення викидів в атмосферу. Вони заощаджують до 60 % енергії в порівнянні з дизельними автобусами (при цьому споживання палива знижується до 30 %), а кількість забруднюючих викидів в атмосферу зменшення до 70 % [22]. Тим більше це стосується електробусів. Доказом цього є успішне використання в розвинених країнах ЕБ як міського громадського транспорту. Найбільшим виробником ЕБ є компанія BYD Auto з моделлю K9 (Китай). Ці ЕБ здатні подолати відстань 250...300 км в місті без підзарядки, а заряджаються в спеціальних терміналах протягом трьох годин [44].

Компанія АВВ в Люксембурзі запустила автоматичні системи швидкої зарядки з автоматичним зчепленням на даху, які можуть усунути одну з головних перешкод для розширення використання міських автобусів – тривалий час зарядки на коротких маршрутах [15, 36]. Час зарядки звичайного автобуса становить 4-6 хвилин. Система може бути легко інтегрована в існуючі автобусні маршрути з установкою швидкої зарядки на терміналах маршруту, зупинках, в депо і (або) на проміжних зупинках.

Поряд зі зростаючим числом електричного автомобільного транспорту стає необхідність у розробках і впровадженні відповідної інфраструктури, яка може забезпечити надійне та ефективне функціонування цього виду ТЗ. На даний момент є нагальна необхідність у побудові широкої міської і приміської мережі ЗС для ЕБ і гібридних автобусів, а також для електричних і гібридних автомобілів, що відображено в наукових роботах [3, 11, 24, 45]. Ці ЗС повинні бути обладнані у відповідності до стандартів екологічної безпеки і в повному обсязі використовуватися поновлювані та альтернативні джерела енергії (сонячні батареї, вітрові турбіни та ін.) [3, 8, 46–48].

Електробуси є чимось середнім між звичайними автобусами і тролейбусами. Деякі види ЕБ можуть заряджатися від надшвидких зарядних станцій під час завантаження / вивантаження пасажирів і здатні рухатися маршрутом без довгої зарядки батарей [15, 36].

Наприклад, в китайському місті Нінбо, провінції Чжецзян, існує екологічний маршрут громадського транспорту, на якому використовується ЕБ, що може заряджатися на зупинках під час завантаження / розвантаження пасажирів приблизно за 10 секунд.

Також перспективним є новий тип ЕБ, розроблений компанією Zhuzhou Electric Locomotive Company. Сутність цієї розробки полягає у тому, що на даху громадського транспорту встановити спеціальний пристрій з роз'ємами для швидкої зарядки. На зупинках уздовж маршруту розташовані опорні кронштейни з кріпильними втулками, які вставляються в роз'єми ЕБ для зарядки суперконденсаторів, які є тяговим джерелом енергії. Одна така зарядка забезпечує близько п'яти кілометрів автономного руху ТЗ. Суперконденсатори розраховані на мільйон циклів заряду/розряду і безвідмовну роботу протягом 12 років. А їх робочі температури знаходяться в діапазоні від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$ [15, 36, 49].

Як відомо, частка пасажирських перевезень в Україні становить близько 82 %. Міські автобуси щодня проїжджають 200...250 км. Таким чином, стає

завдання створити екологічно чистий автобус – електробус, який здатний здолати таку відстань [4, 16, 17].

Ще в Радянському Союзі був транспортний норматив впровадження міського транспорту у відповідності до кількості населення, а саме:

- при кількості населення 200 тис. – нормувалось впровадження тролейбусної мережі;
- 500 тис. – трамвайних ліній;
- 1 млн. – метро.

Тому на сьогодні в багатьох містах України є тролейбусні електричні мережі, які можуть бути використані для обладнання зарядних станцій для підзарядки ЕБ [16, 17]. Це дає можливість покращувати міський транспорт не тільки завдяки переобладнанню автобусів в ЕБ, але і тролейбусів.

Таким чином, розрахунок, проектування та виготовлення автомобілів на електричній тязі для міського транспорту є актуальним і важливим науковим і інженерним завданням, і його рішення не тільки дозволить впровадити енергозберігаючі технології в міському транспорті, але також може зробити його екологічно чистим і безпечним для навколишнього середовища.

1.1 Системний аналіз перспектив розвитку автомобільного транспорту з електричним приводом

Для проведення системного аналізу необхідно дослідити основні етапи розвитку автомобільного транспорту на електричній тязі, причини, що вплинули на їх поширення, сучасний стан та перспективи їх розвитку в Україні.

Розвиток електромобілів, можна умовно поділити на шість етапів, більш детально розглянутих в роботах автора [6, 50]:

- перший – зародження електромобілів (1837-1895 рр.);
- другий – інтенсивного розвитку і конкуренції (1896-1930 рр.);
- третій – локального використання (1931-1960 рр.);

– четвертий – широкого проведення дослідно-конструкторських робіт і випуску великої кількості дослідних зразків і малих експериментальних серій електромобілів (1961-1982 рр.);

– п'ятий – певний спад, викликаний різкою зміною кон'юнктури на нафтовому ринку і проблемами, що проявилися при експлуатації дослідних пар-тій (здебільшого через недоліки джерел струму) (1982-2010 рр.);

– шостий – відродження електромобілів, пов'язаний з виходом на масо-вий ринок електрокарів таких відомих фірм, як, Tesla Motors (США), Nissan Motor Company (Японія), BYD AUTO (Китай).

Коротко розглянемо кожний з цих етапів.

На першому етапі, розвиток електромобілів відбувався паралельно з ав-томобілями з ДВЗ, які на той час ще не були серйозними конкурентами для електрокарів. Конструкція електромобілів була простішою, ніж у авто з ДВЗ, і вони так само використовувалися тільки в містах в радіусі не більшому ніж 10...15 км, а їх швидкість не перевищувала 20 км/год [22, 50].

Другий етап розвитку характеризується конкуренцією в області автомо-білебудування. В цей час виробництво електромобілів стало зростати, почався їх серійний випуск. Протягом цього етапу електромобілі встановлювали швидкі-сні рекорди, наприклад, в 1898 р. їми було досягнуто швидкості 63,3 км/год [6].

В кінці XIX ст. електромобілі займали значну частку серед усіх ТЗ, що були в експлуатації. Наприклад, в США до початку XX ст. 38 % автомобілів мали електричні двигуни, 40 % – парові, 22 % – бензинові.

Перше десятиліття цього періоду характеризується підйомом в розробці і виробництві електромобілів, а потім спостерігався деякий спад. У цей період серійне виробництво електромобілів було організовано в Англії, Німеччині, США, Франції, Японії та інших країнах. Електромобілі мали в середньому за-пас ходу 50-80 км, а швидкість 20...35 км/год [51].

В перші десятиліття XX століття підвищилася конкурентоспроможність автомобілів з ДВЗ по відношенню до електромобілів через вдосконалення конструкції поршневих двигунів, що забезпечило швидкість їх руху більше

80 км/год з запасом ходу до 300 км, що дозволило використовувати автомобіль за межами міста [50].

Третій етап розвитку характерний тим, що вже на початку 30-х років ХХ століття виробництво електромобілів різко скоротилося. Лише в окремих країнах, таких як Великобританія, Німеччина і США, тривав їх випуск невеликими партіями.

На третьому етапі спостерігається зростання виробництва електромобілів і в Англії. Роботи по розробці електромобілів велися також і в Радянському Союзі [6, 22, 50].

Четвертий етап розвитку розпочався з середини 60-х років ХХ ст. і характеризувався попитом на електромобілі у багатьох країнах, таких як: США, Японія, Німеччина та Англія, що було обумовлено тогочасним загостренням енергетичних та екологічних проблем. В кінці 60-х і на початку 70-х років ХХ ст. утворилася енергетична криза в багатьох країнах, яка стала свідченням того, що ресурси нафтових палив для ТЗ з ДВЗ є обмеженими. Крім цього, велика кількість ТЗ у містах призвела до забруднення навколишнього середовища відпрацьованими газами й швидкого погіршення екологічного стану. Тому з 1966 по 1971 рр. у світі було розроблено багато дослідних зразків електромобілів, але подальшого розвитку і застосування вони не знаходили.

На п'ятому етапі розвитку спостерігався спад виробництва електромобілів, викликаний падінням цін на нафтовому ринку і невдачами в експлуатації дослідних партій через недоліки АКБ [6, 50].

Шостий етап розвитку можна назвати етапом «відродження». Умовний термін початку – після 2010 р. Передумовою цього етапу стало заснування в 2003 р. однієї з найвідоміших сучасних компаній Tesla Motors (США). В 2006 р. компанія представила свій перший спортивний електромобіль Tesla Roadster з запасом ходу 300 км [6, 50].

Другою моделлю від Tesla Motors стала 5-дверний ліфтбек преміум класу Tesla Model S, який завоював чимало нагород, серед яких «Автомобіль року 2013» (за версією журналу Motor Trend, США) [50].

Ще один електромобіль, який неможливо не відмітити – це Nissan Leaf – електромобіль японського концерну Nissan – найбільш поширений у всьому світі в сегменті електрокарів. Nissan Leaf серійно випускається з весни 2010 р. Це по-справжньому перший масовий електромобіль, продажі якого почалися по всьому світу.

Nissan Leaf має електродвигун потужністю 80 кВт, 280 Н·м, що живиться від літій-іонної батареї ємністю 24 кВт·год. вагою 300 кг. Nissan Leaf може заряджатися як від однофазної мережі (звичайна розетка), так і від трифазної. Повного заряду батареї вистачає на 160 км [6, 50].

Слід зазначити, що крім японських та американських виробників значний вклад у розвиток електромобілів внесли і китайські. Однією з відомих компаній з Китаю в цій галузі є компанія BYD AUTO [6, 50].

З 2003 р. BYD – єдиний китайський виробник автомобілів, який експонує власні авто на Женевському автомобільному салоні і має консульства на всіх континентах. З 2008 р. фірма серійно виготовляє і реалізує гібридні авто, з 2009 р. розпочато створення електромобілів, а вже з 2010 р. розпочато спільний проект з виробництва електромобілів з Daimler AG.

У 2010 р. фірмою було вироблено понад півмільйона авто. За версією Business Week, BYD зайняла перше місце в списку найбільш технологічних компаній світу, випередивши таких гігантів як Apple і Google, і друге місце з числа автомобільних компаній, випередивши компанії Ford, Volkswagen і BMW.

У січні 2010 р. в м. Детройті представлено електрокар BYD E6, що оснащений електромотором потужністю 75 кВт з залізо-фосфатним акумулятором власної розробки і автономним ходом до 300 км [6, 50].

Шостий етап розвитку електромобілів триває і до сьогодні. Тому далі розглянемо більш детально причини, що вплинули на поширення автомобільного електротранспорту у світі.

Розвиток сучасних технологій у багатьох галузях призвів не тільки до паливно-ресурсних, але і до глобальних екологічних проблем. Це негативно

вплинуло на стан оточуючого середовища, завдаючи непоправної шкоди здоров'ю людей, загрожуючи зміною клімату нашої планети. Одним із важливих чинників, які є причиною вище зазначених проблем, є автомобільний транспорт, який забруднює біосферу продуктами викидів спаленого автомобільного палива в навколишнє середовище. Ці викиди є складною сумішшю хімічної сполуки, склад яких залежить від типу двигуна, типу палива та умов експлуатації транспортних засобів.

Як показують розрахунки, приведені в журналі автомобільної торгівлі Ward's Auto, у 2010 р. загальний обсяг авто перевищив один мільярд, а у 2014 р. на дорозі вже було більше 1,2 мільярдів автомобілів [52]. Прогнозується, що до 2035 р. буде побито їх рекордну кількість у 2 мільярди.

На даний час більша кількість ТЗ використовують двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які виробляють до 70 % шкідливих викидів в атмосферу. Щороку кількість забруднення зростає в середньому на 3,1 % [6, 50]. Річна кількість викидів у світі склала близько 22 млн. тон забруднюючих речовин різного походження [53, 54]. Але, незважаючи на це, сучасний світ не може обійтися без автомобільного транспорту, так як він є: зручним; доступним у співвідношенні ціна-якість; забезпечує швидку та своєчасну доставку вантажів та пасажирів у невеликих кількостях; доставляє товари безпосередньо споживачеві; має підвищену маневреність, мобільність і зручність водіння. Тому виникла гостра необхідність створення та розвитку нових більш екологічно чистих і дешевших типів автомобілів, а саме – електромобілів.

Уряди багатьох розвинених країн світу переглянули свою політику і розгорнули багатосторонню підтримку як для виробників, так і для споживачів електричних авто. Тому розглянемо способи стимулювання поширення автомобільного транспорту на електричній тязі в світі.

За прогнозами фахівців вже в 2020...2022 рр. електричні авто зрівняються в ціні з автомобілями з ДВЗ такого ж класу. Але поки що головними недоліками електромобілів є невеликий автономний запас ходу та тривалий час зарядки. Та ці питання поступово знаходять своє вирішення [6, 22, 50, 55].

Варто відзначити, що найбільш вагомий внесок в поширення електромобілів зробили два американські автовиробники – Tesla Motors та General Motors.

Вже у 1998 р. Каліфорнійський Комітет Повітряних Ресурсів прийняв рішення, яке визначало кількість ТЗ з нульовою емісією, що реалізуються на рік [56]. У 1998 р. їх кількість повинна була складати не менше 2 %, а до 2003 р. досягти 10 %.

Уряди країн ЄС оголосили про перехід на електричні ТЗ у період 2015...2020 рр. Вони посилили це рішення запровадженням суттєвих штрафів за надлишок викидів CO₂ від нових автомобілів, вироблених в ЄС (у 2015 р., за ставкою від 130 грамів CO₂ на кілометр, а до 2020 року – 95 грамів на кілометр (до € 95 за кожний грам, що перевищує норму)). При тому були надані «супер кредити» на виробництво і покупку «чистих» автомобілів.

З середини 1990-х років в ряді країн на загальнодержавному та міському рівні була здійснена «Зелена податкова реформа» в результаті якої власники гібридних автомобілів отримали помітні податкові пільги і субсидії.

В США представлено на розгляд законопроект, згідно якому власникам електромобілів будуть платити по \$ 250 на місяць для покриття витрат на зарядку машини. Наразі у ряді штатів США платять разові податки з транспортних засобів за скороченою ставкою або звільняють від їх сплати зовсім. Середній розмір такої пільги становить \$ 4,7 тис. Разові пільги поширені і в Японії – економія там в підсумку становить близько € 1,2 тис. [57]. У Китаї покупець отримує компенсацію в розмірі близько 35 % від вартості авто [22, 50]. Крім того в Китаї реалізується цілеспрямована державна програма, щодо заохочення переходу на екологічний автотранспорт [22, 50].

В 2011 р. Єврокомісія прийняла рішення до 2050 р. заборонити використання в містах ЄС автомобілів з ДВЗ зовсім. Їх стратегія розвитку транспорту на найближчі десятиліття ґрунтується на «Білій книзі з транспорту» [58]. Але національний план розвитку транспорту Норвегії передбачає припинення ре-

естраційних автомобілів з ДВЗ вже з 2025 р. На даний момент в Норвегії частка електрокарів складає близько 28 % [59].

В 2017 р., відповідно до паризького кліматичного договору [60], уряд Франції заявив, що припинить продаж бензинових та дизельних транспортних засобів до 2040 р. [61].

Згідно з даними нового звіту дослідницької групи Bloomberg, до 2040 р. електромобілі складуть 54 % від всіх продажів легкових автомобілів [62].

Що стосується України важливо відмітити, що в 2017 р. українці придбали 2697 легкових електромобілів. У порівнянні з 2016 р. це в 2,3 рази більше [63]. У той же час, з 1 січня 2018 р. електромобілі було звільнено від ПДВ і акцизного збору. Пільговий податковий режим діяв рік – до 31 грудня 2018 р.

Тож, як показує проведений аналіз, для масштабного переходу від авто з ДВЗ на транспортні засоби на електричній тязі, необхідною складовою є стимулювання виробництва та купівлі електрокарів. Та цього недостатньо, бо електромобілі не можуть експлуатуватися без відповідної інфраструктури. І в першу чергу це відноситься до зарядних станцій. Тобто, як мінімум, необхідно мати розгалужену мережу електрозаправних станцій. Тому дуже актуальною задачею є розробка енергоефективних технологій і їх інтеграція як у виробництво, так і в процес експлуатації.

Перш ніж розглядати транспортну інфраструктуру в цілому, необхідно відзначити, що проблема стану доріг в Україні стоїть дуже гостро. Загальна протяжність доріг в країні становить близько 169,6 тис. км. Згідно зі статистичними даними понад 12 % міжнародних доріг в Україні вимагають повної заміни [64]. З наведених даних на рис. 1.1 видно, що навіть серед міжнародних доріг України, тільки 65 % можна вважати дорогами задовільної якості. І це без урахування обласних доріг, серед яких якісних практично немає.

У 2017 р. український уряд виділив на капітальний ремонт і на будівництво нових автодоріг близько 30 млрд. грн., а в 2018 р. близько 40 млрд. грн. [65]. Якщо до цієї суми додати інвестиційну підтримку, то з'явиться можливість побудувати не тільки сучасні дороги, а й об'єднати їх в єдину, злагодже-

ну, «інтелектуальну» інфраструктуру, що стане гарною підтримкою для масштабного використання електромобілів в Україні [64].

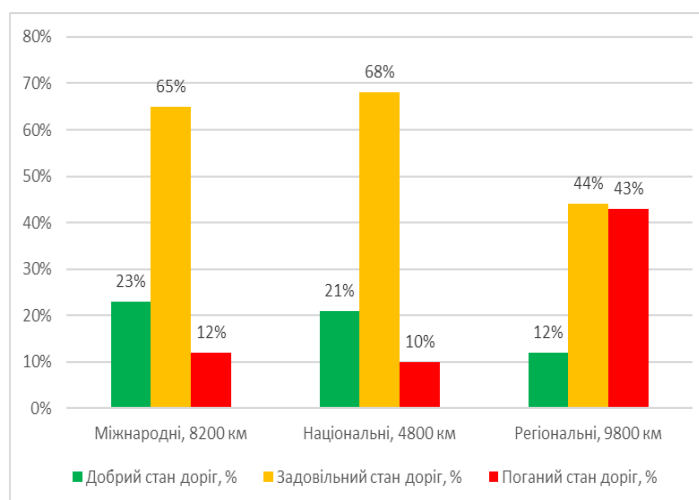


Рисунок 1.1 – Стан доріг в Україні

На рис. 1.2 представлено класифікацію автомобільного дорожнього транспорту за видами енергії, які в більшій або в меншій мірі використовуються у містах України.

В таблиці 1.1 представлено стан міського транспорту в Україні на 1 січня 2016 р. Дані взяті з проекту «Міський громадський транспорт в Україні» [66]. У таблиці 1.1 і далі по тексту ТП – тягова підстанція.

Упродовж 2015 року міським електричним транспортом перевезено понад 2,5 млрд. пасажирів у тому числі тролейбусами – 1080 млн. Переважна більшість перевезених пасажирів трамваями і тролейбусами становлять громадяни пільгових категорій (понад 60%) [66].

Загальні пасажирські перевезення за всіма видами транспорту у 2015 р. склали майже 5,2 млн. пасажирів, тобто на частку міського електротранспорту припадає 49 % пасажиро перевезень по країні і понад 52 % внутрішньо міських пасажиро перевезень [66].

Доходи підприємств від продажу проїзних квитків в останні роки залишаються низькими – близько 28 % від собівартості перевезень.

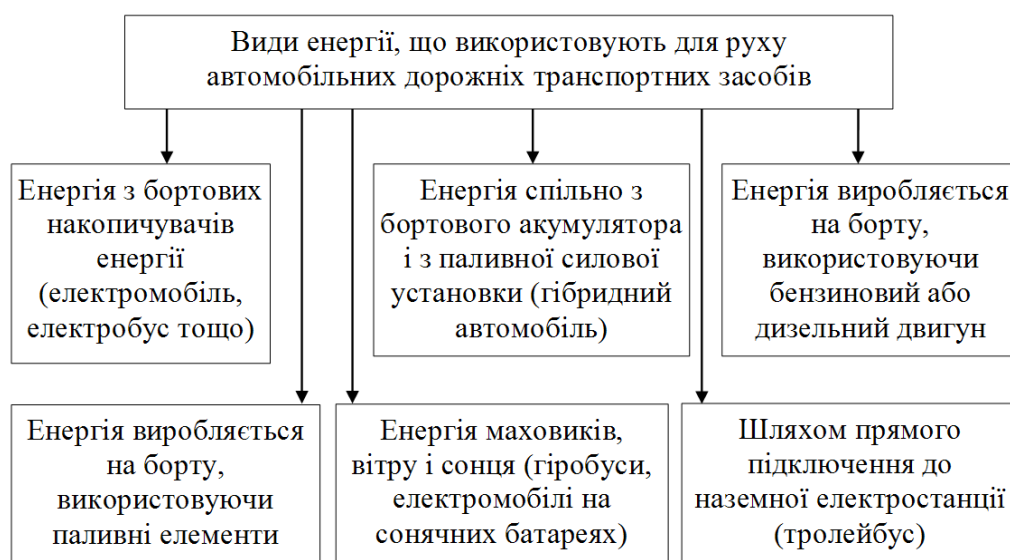


Рисунок 1.2 – Класифікація автомобільного дорожнього транспорту за видами енергії, що використовується

Таблиця 1.1 – Стан міського транспорту в Україні на 01.01.2016

	Рухомий склад			Обладнання мережі		
	Трамвайні вагони, шт	Тролейбуси, шт	Вагони метрополітену, шт	Трамвайні колії, км	Контактні мережі (трамвайні, троллейбусні), км	ТП, шт
Всього	2278	2929	1180	1579,1	4955,9	541
Не відповідають вимогам (потребують заміни)	96 %	76 %	80 %	133,2		99
В аварійному стані				31,1		3

При нормативному терміні експлуатації трамвая – 15 років, тролейбуса – 10 років, в містах України експлуатується:

- 1467 од. трамвайних вагонів віком понад 30 років;
- 1387 од. тролейбусів віком понад 20 років.

Результати державного технічного огляду свідчать, що не відповідають вимогам правил експлуатації: 27 % загальної протяжності трамвайних колій та контактної мережі; 19 % тягових підстанцій.

Високий рівень старіння основних фондів міського електротранспорту та недостатні темпи їх оновлення призводять до зменшення кількості парку трам-

вайних вагонів та тролейбусів (близько 200 од. щорічно), невідповідності технічному та технологічному рівню сучасних вимог, суттєво збільшує (близько 25 %) енерговитрати та витрати на їх утримання, не забезпечує достатній рівень комфортності, якості та безпеки наданих послуг.

Поступово відбувається закриття руху трамваїв і тролейбусів у багатьох містах України, а також скорочення кількості маршрутів. Натомість з'являється велика кількість маршрутних автобусів з ДВЗ.

Пошук шляхів розвитку транспорту в розрізі підвищення екологічності і енергоефективності є актуальним для багатьох розвинених країн. Особливо це стосується великих міст. Одним з головних способів вирішення цього питання – зменшення використання особистого транспорту в містах за рахунок міського екологічного транспорту з одночасною відмовою від міського автотранспорту, що використовує ДВЗ і впровадження транспортних засобів на електротязі (електробусів) [58, 59].

Так у 2017 р. в світі налічувалося близько 386 тис. міських автобусів на електротязі. Однак вже до 2025 р. ринок таких машин потроїться і складе близько 1,2 млн. од. А це майже половина (47%) від глобального парку міських автобусів. Це пов'язано з тим, що з 2025 р. має запрацювати програма, за якою 12 найбільших міст світу повністю перейдуть на електричні автобуси. Це Лондон, Париж, Копенгаген, Барселона, Мілан, Лос-Анджелес, Сіетл, Окленд, Ванкувер, Кіто, Мехіко і Кейптаун [67]. Глобальний ринок електробусів до 2025 р. на 99 % буде складатися з машин китайського виробництва. Уже сьогодні в Китаї стали з'являтися міста, в яких немає автобусів з ДВЗ. Такому бурхливому розвитку продажів автобусів на електротязі сприяє впровадження більш дешевих у виробництві батарей. У майбутньому це дозволить зробити ЕБ більш конкурентоспроможними за ціною в порівнянні з дизельними аналогами.

Для комплексного розв'язання наявних проблем в транспортній галузі у травні 2018 р. урядом нашої країни схвалено «Національну транспортну стратегію України до 2030 року» (НТСУ) [68]. Основними принципами НТСУ є

конвергенція з актами ЄС та лібералізація ринків транспортних послуг. А саме, пропонується концепція енергоефективного міського транспорту згідно якої «...міська транспортна інфраструктура потребує оновлення...», «...впровадження сучасних технологій...». До того ж визначено, що «метою України є скорочення рівня смертності на 50 % та зменшення у 4 рази кількості постраждалих внаслідок ДТП» [68].

Тому актуальним завданням є підвищення експлуатаційних властивостей міського міського транспорту.

1.2 Переваги та недоліки експлуатації електробусів у порівнянні з існуючим міським дорожнім транспортом

Одним з основних видів міського пасажирського транспорту України є тролейбус. Згідно з офіційними даними станом на 01.01.2018 р. в Харкові експлуатується 224 тролейбуси, які курсують 20 маршрутами [69]. Сумарна довжина маршруту складає 478,2 км, а довжина контактної мережі – 543,5 км (в однопрохідному вимірі).

Дослідження, проведені в харківському тролейбусному депо № 3, показали наявність серйозних проблем, пов'язаних з недоліками тролейбусів і їх експлуатації, а саме:

- спостерігається висока кількість онкозахворювань у водіїв;
- тролейбуси є частою причиною обмеження руху, через систематичні зупинки у зв'язку з втратою контакту з мережею, що може призводити до ДТП;
- рекуперація енергії неефективна через нездатність контактної мережі отримувати енергію;
- нестача водіїв категорії Т;
- необхідне підвищення кваліфікації і додаткове навчання водіїв тролейбусів. Теоретична підготовка водіїв триває протягом трьох місяців на території тролейбусного депо; навчальне водіння – 287 год. [70];
- мінімальна маневреність тролейбуса;

- впровадження нового маршруту чи переніс маршруту вимагає величезних ресурсів;
- складність ремонту сучасних тролейбусів (наприклад, високовольтної системи, електроніки), а через це нестача спеціалістів ремонтників в Україні;
- 90 % зношеність тролейбусних мереж;
- дороге електрообладнання чутливе до статичної електрики;
- обслуговування тролейбусної мережі вимагає багато як матеріальних, так і людських ресурсів;
- неефективне використання тролейбусів через обмежену мобільність тролейбусних мереж (простої або багатокілометровий об'їзд при виникненні перепони на дорозі);
- кількість тролейбусів, що відпрацювали свій ресурс – близько 80 %.

Недоліки використання автобусів з ДВЗ:

- автобус з ДВЗ є неекологічним видом транспорту;
- використовує багато палива;
- більш шумний на відміну від тролейбусів і електробусів;
- в холодну пору року потребує розігріву двигуна, що веде до збільшення використаного палива і часу підготовки до виїзду на маршрут;
- транспортні засоби з ДВЗ мають більш складну конструкцію, складаються з більшої кількості деталей, а це призводить до того, що вони є менш надійними у використанні;
- існуючі маршрутні автобуси, що використовуються у містах України, є маломісткими і незручними для пасажирів.

Натомість впровадження електробусів відкриває великі можливості і має суттєві переваги як перед тролейбусами, так і перед автобусами з ДВЗ:

- це новітній вид екологічного ТЗ, що покращує естетику міста і робить зразком впровадження сучасних технологій у відповідності до НТСУ;
- виключається вплив магнітних полів контактної мережі на людей через відсутність цієї мережі;
- впровадження електробусів сприятиме зменшенню ДТП;

- електробуси повністю використовують енергію від рекуперації;
- спрощенні вимоги до водіїв у порівнянні з водіями тролейбусів;
- електробуси мають високу маневреність, що дозволяє з легкістю долати перешкоди, які виникають на дорозі;
- впровадження нового маршруту чи переніс маршруту є менше ресурсовитратним (в залежності від автономності електробуса може з'явитися потреба у зарядних станціях);
- не потрібні контактні мережі, тому виключається їх обслуговування;
- суттєво підвищується ефективність використання транспортних засобів, бо вони не прив'язані до контактної мережі;
- електробуси мають високу мобільність;
- є можливість переробки старих автобусів і тролейбусів в електробуси, що дозволить прискорити процес переходу на електробуси і зменшити загальні витрати [36].

Порівняльний аналіз ЕБ з різними способами зарядки накопичувачів тягових джерел енергії.

Для подальшого порівняння тролейбусів і автобусів з ЕБ необхідно більш детально розглянути види ЕБ з урахуванням їх пасажиро місткості, часу автономного ходу, часу зарядки і, що не менш важливо, їх вартості. Тому розглянемо три основні види ЕБ представлені в таблиці 1.2.

Аналізуючи таблицю 1.2 та різні види ЕБ, розглянуті в роботах автора [15, 36], можна зробити такі висновки.

З одного боку нічна зарядка ЕБ є економічно вигіднішою, ніж зарядка вдень через те, що оплата за спожиту ЕЕ здійснюється за нічними тарифами (згідно з постановою НЕК “Укренерго” від 01.12.2017 № 01/14392 [71]), до того ж, зменшується навантаження на міські електричні мережі у денний час. Але при цьому виникає така проблема, як необхідність встановлення потужних зарядних станцій на території депо. І чим більше ЕБ буде впроваджено в експлуатацію, тим більша кількість зарядних станцій буде потрібна. Тобто, коли всі тролейбуси будуть замінені на ЕБ, то, наприклад, у двох харківських

тролейбусних депо (№2 та № 3) необхідно буде забезпечити одночасну зарядку 200 ЕБ. Це приблизно по 100 одиниць ТЗ на кожне депо, а значить необхідно мати по 100 зарядних станцій на території кожного депо.

Таблиця 1.2 – Порівняльні характеристики різних видів електробусів

	Електробус з нічною зарядкою	Електробус з зарядкою на кінцевих зупинках	Електробус на суперконденсаторах
Ємність батарей, кВт·год	від 250	35-120	від 15
Час зарядки	3-10 год.	5-20 хв.	десятки секунд
Пробіг, км	150 і більше	10-70	2-50
Зарядний струм, А	60-90	350-500	60-250
Інфраструктура	КТП і зарядні станції в депо	ЕТП і зарядні станції на кінцевих зупинках	ЕТП і зарядні станції на маршруті
Вартість, тис. доларів	390-570	360-500	220-290

Крім цієї проблеми існує і інша – це використання у ЕБ з нічною зарядкою акумуляторних батарей як накопичувачів енергії. Найбільш поширений тип батарей, що використовуються в електромобілях різних виробників – це літій-іонні (Li-ion) і нікель-метал-гідридні акумулятори (NiMH) [18]. Вони мають малий ресурс експлуатації. Витримують до 1000 зарядів/розрядів. Тобто при щоденному використанні у найкращому випадку акумулятор прослужить менше трьох років. Після цього необхідно буде міняти його на новий. А вартість нового акумулятора складає близько половини вартості всього ЕБ.

Ще одним суттєвим недоліком використання акумуляторів є їх залежність від температури навколишнього середовища. Наприклад, літій-кобальтові (LiCoO₂) акумулятори – це акумулятори, що широко застосовуються на транспорті – при температурах нижче -20°C незворотно втрачають свою ємність, а при високих температурах представляють небезпеку займання або вибуху [18]. До того ж, глибокий розряд цих акумуляторів призводить до повної їх непридатності.

На відміну від акумуляторних батарей, суперконденсатори (СК) (їх також називають іоністори або ультраконденсатори) мають більший робочий ресурс

(до мільйона циклів заряд/розряд), нечутливі до температурних коливань (діапазон робочих температур від -40°C до $+65^{\circ}\text{C}$), здатні швидко заряджатися (від декількох секунд до десятків хвилин) великими струмами і допускають повний розряд. Але вони не призначені для довгого зберігання енергії і можуть забезпечити невелику автономність ходу електробуса (до 50 км).

Тепер що стосується ЕБ з зарядкою на кінцевих зупинках. Вони можуть використовувати у якості накопичувачів енергії і АКБ, і СК. При використанні АКБ, виникають ті самі проблеми з акумуляторами, що були зазначені вище. З тією відмінністю, що зарядні станції треба встановлювати на кінцевих зупинках, а час зарядки буде складати від 20 хв. в залежності від ємності акумулятора і потужності зарядної станції.

При використанні СК, у цих видах ЕБ, час зарядки складатиме до 7 хв. при можливості автономного ходу до 20 км.

Вибір виду ЕБ і ємності накопичувача енергії залежить від декількох факторів: від довжини маршруту; від інфраструктури (можливості встановлення зарядних станцій); від кількості транспортних засобів, які потребують одночасної зарядки на кінцевих зупинках тощо.

Враховуючи всі недоліки і переваги різних видів ЕБ, а також особливості конкретного маршруту, пропонується у містах України впроваджувати нові маршрути з використанням ЕБ на СК, що будуть заряджатися під час посадки/висадки пасажирів на зупинках.

Розрахунок енерговитрат для ЕБ на базі міського автобуса «Богдан» А091.

Робочий цикл руху по замкненому маршруту для міського транспорту включає: розгін – пробіг – гальмування – стоянка. Енергія, необхідна для розгону, включає кінетичну енергію розгону з урахуванням втрат [72]:

$$E_1 = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u}, \quad (1.1)$$

де m – маса транспортного засобу;

K_u – сумарний коефіцієнт, що враховує всі втрати при русі транспорту;

V_1 – швидкість транспортного засобу.

Доступна для рекуперації енергія становить:

$$E_2 = \frac{K_p \cdot m \cdot V_1^2}{2}. \quad (1.2)$$

де K_p – сумарний коефіцієнт, що враховує всі втрати при гальмуванні;

Для робочого циклу руху міського транспорту ККД рекуперації при наявності накопичувача можна представити у вигляді:

$$\eta_p = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot K_p^2 \cdot V_2^2}{V_1^2}. \quad (1.3)$$

де η – ККД роботи накопичувача в циклі заряд-розряд;

φ – ККД роботи DC/DC перетворювача;

V_2 – швидкість транспорту після вибігу.

Враховуючи, що в розглянутому циклі руху енергоспоживання необхідно тільки на розгін транспортного засобу, отримуємо:

$$E_{nm} \cdot S = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u}, \quad (1.4)$$

де E_{nm} – питоме енергоспоживання електробуса;

S – довжина маршруту в циклі.

Так як тролейбуси мають такі ж електротехнічні умови експлуатації, як і розглянутий міський ЕБ, то для порівняння будемо спиратися на даний вид транспорту [73, 1, 74].

Досвід експлуатації тролейбусів на міському маршруті ($S \approx 350$ м, $V_1 \approx 13,9$ м/с, час розгону 20...25 с, час циклу ≈ 60 с) дає величину $E_{nm} = 85 \dots 100$ Вт·год/(т·км); $\varphi = 0,95$; $\eta = 0,8$. Як правило, для тролейбусів $V_2 / V_1 = 0,85$, $K_u = 0,65$ [1, 73].

За виразом (1.3) знаходимо ефективність рекуперації у випадку, коли ЕБ працює у режимі розгін – гальмування:

$$\eta_p = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot K_p^2 \cdot V_2^2}{V_1^2} = 0,23.$$

Розрахункова енергія, необхідна для розгону автобуса з масою 8 т до швидкості 13,89 м/с, складе $E_1 = 1,19$ МДж.

При ефективності рекуперації $\eta_p = 0,23$ енергія, яку буде рекуперовано в кожному робочому циклі при зупинці зі швидкості 13,9 м/с (50 км/год) складе, МДж:

$$E_{рек} = 1,19 \cdot 0,23 = 0,275.$$

Необхідна енергія для здійснення циклу з урахуванням рекуперації складе, МДж:

$$E_{цик} = 1,19 - 0,275 = 0,916.$$

Середня потужність електродвигуна при розгоні для забезпечення часу розгону 20 с повинна становити:

$$P_{сер} = 1190 / 20 = 59,5 \text{ кВт.}$$

Для того щоб СК забезпечив розгін автобуса протягом необхідного часу (25 с), необхідно, щоб енергія, що віддається при розряді була не менше 1,19 МДж. При гальмуванні накопичувач може отримати 0,275 МДж [1, 73].

Згідно з проведеними розрахунками визначаємо технічні вимоги для компонентів електричної силової установки у складі міського автобуса «Богдан А091». Результати розрахунків зведені в таблиці 1.3...1.4. [1, 33, 73].

Розрахунки показують, що для того, щоб підзарядити блок СК, на обраному маршруті («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 276е, м. Харків), необхідно буде встановити 5 зарядних пристроїв [1, 33, 73].

Таблиця 1.3 – Технічні вимоги для електробуса «Богдан» А091

Найменування	Значення
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	60
Максимальна потужність електродвигуна, кВт	120 (два по 60)
Номінальна потужність накопичувача, кВт	90
Енергія накопичувача при номінальній потужності, МДж	більше 1,44
Ресурс, цикл	< 1000 000
ККД в циклі заряд/розряд (η),	< 0,8
Термін служби, років	10
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача, км	до 5

Таблиця 1.4 – Накопичувач на основі ЭК404 для електричного приводу міського автобуса «Богдан» А091

Найменування	Значення
Модель накопичувача	14×30ЭК404
Номінальна напруга, В	630
Ємність, Ф	28,6
Об'єм, л	420
Маса, кг	520
Номінальна потужність, кВт	90
ККД в циклі заряд/розряд (η)	> 0,8
Конденсаторний модуль	30ЭК404
Номінальна напруга, В	45
Ємність, Ф	400
Внутрішній опір, мОм	12
Маса, кг	37
Габаритний розмір, мм	560x219x245
Температура зберігання, °С	-50...+70
Робоча температура, °С	-50...+65

Розрахований час заряду СК буде складати від декількох десятків секунд (20...30 с) до декількох хвилин (до 5 хв). Цей час визначається потужністю зарядного пристрою [1, 33, 73].

Таблиця 1.5 – Характеристики міського автобуса «Богдан А091» з електроприводом

Найменування	Значення
Довжина, м	7,2
Повна маса, т	8
Пасажиромісткість, чол.	45
Номінальна потужність тягового електродвигуна, кВт	60
Габаритний обсяг, л	420
Маса, кг	520
Максимальна швидкість, км/год	70
Час розгону до швидкості 50 км/год, с	25
Середня ефективність рекуперації	0,23
Середня питома витрата енергії, Вт·год/(т·км)	80-84
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача км	до 5

Проведені розрахунки дозволяють зробити такі висновки.

Розрахунковий час зарядки СК складе від 20-30 с до 300 с. Цей час визначається ємністю зарядного пристрою і можливостями мережі.

Пропонується встановити зарядний пристрій за схемою компанії АВВ, оскільки вона відповідає всім стандартам, протоколам безпеки і нормам, які потрібні для громадського транспорту в країнах ЄС [1, 33, 73].

Для проведення порівняльного аналізу експлуатаційних витрат ЕБ і розрахунку енергетичних показників був обраний типовий маршрут в Харкові (маршрут № 276е). «Типовий» означає, що умови руху на інших маршрутах в основному аналогічні обраним. На маршруті є контактна електромережа, призначена для тролейбусів. Тобто електрична мережа вже доступна, а її номінальна потужність відповідає вимогам, визначеним у процесі розрахунку ЕБ. Використання зарядних станцій компанії АВВ (потужність 150 кВт) відповідає специфікаціям контактних мереж тролейбусів [1, 33, 73].

1.3 Аналіз витрат енергоресурсів для порівняння автобусів різних типів

Слід зазначити, що метою дослідження є звітування про індикативну інформацію, що стосується витрат на паливо для різних типів автобусів, що дасть можливість провести їх ґрунтовний порівняльний аналіз.

Щоб з'ясувати, який автобус буде споживати менше палива (або електричної енергії), проведено порівняння:

- дизельного автобуса «Богдан» А091;
- гібридного автобуса;
- електробуса з акумуляторами;
- електробуса з СК на базі автобуса «Богдан» А091.

Для кращої демонстрації даних було обрано один з маршрутів у місті Харкові (Україна) (вул. 12 Квітня – житловий район Горизонт, маршрут № 276е). Проїзд в одну сторону становить 4,23 км. Час їзди – 10 хвилин. Кількість зупинок – 7 (рис. 1.3) [36, 75].

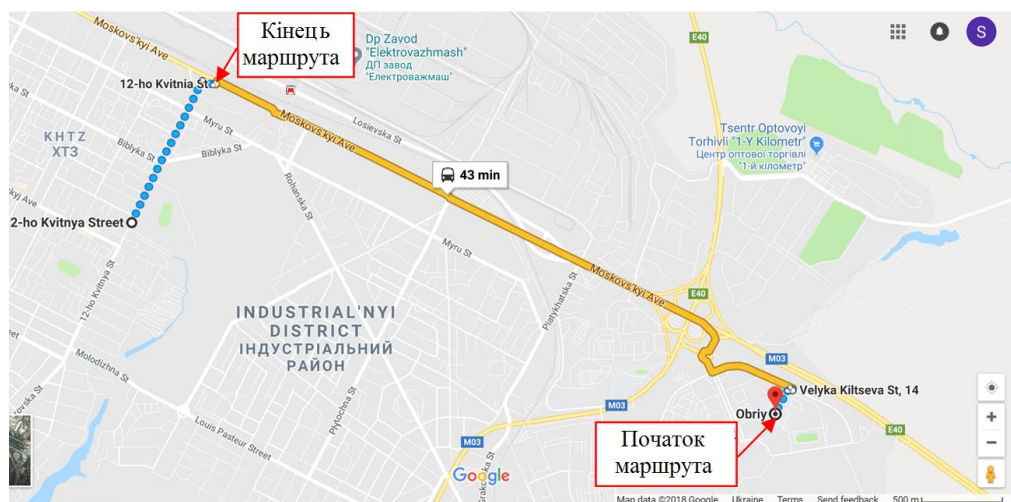


Рисунок 1.3 – Автобусний маршрут № 276е, Харків, Україна

На цьому маршруті працює дизельний автобус «Богдан» А091. Витрата палива становить 20...25 літрів на 100 км. Автобус робить 25-30 таких поїздок на день. Середня ціна 1 літра дизельного палива по Україні становить 28,37 грн., що відповідає 1,07 \$ (середня ціна станом на 08.04.2019 р.).

Розрахуємо добові витрати автобуса «Богдан» на заданому маршруті при середніх значеннях вартості пального – 1,07 \$, добового пробігу – 200 км та витрат палива на 100 км – 22,5 л. Розрахунки показують, що добові витрати автобуса «Богдан» на паливо становлять приблизно 50 \$.

Провівши аналогічні розрахунки для гібридного автобуса, який використовує не тільки дизельне паливо, але і електродвигун потужністю 180 кВт·год отримаємо, що приблизна економія дизельного палива складе порядку 40 % [15, 36, 37, 76]. При цьому витрати на дизельне паливо для гібридного автобуса на даному маршруті становитимуть 30 \$. До цієї суми слід додати близько 10 \$ за електричну енергію, яка потрібна для зарядки акумуляторів, тому загальні витрати на добу для гібридного автобуса становлять 40 \$ [1, 33, 73].

У випадку з ЕБ, який приводиться в рух ЕД потужністю 230 кВт, експлуатаційні витрати за один робочий день будуть значно меншими. Наприклад, львівський автобус «Електрон» Е 19101 працює без підзарядки до 210 км і потребує лише 15...20 хвилин для зарядки на 70 % (такий автобус підходить для цього маршруту). В автобусі «Електрон Е 19101» встановлені АКБ (Li-Ion) потужністю 120 кВт·год. Так за один робочий день електробус витрачає 120 кВт·год.

У відповідності до тарифів на послуги з розподілу ЕЕ для побутових споживачів, що діють з 01 січня 2019 року (Постанова НКРЕКП № 1845 від 11.12.2018 року), АТ «Харківобленерго» продає ЕЕ за ціною 519,45 грн/МВт·год. Виходячи з цього, розрахунки показали, що за день на зарядку електробуса «Електрон» Е 19101 буде витрачено приблизно \$ 15.

Таким чином, ЕБ «Електрон» Е 19101 є найбільш економічним в порівнянні з іншими автобусами, але цей автобус використовує звичайні літій-іонні батареї в якості накопичувачів енергії. Термін їх служби з такою інтенсивною роботою складе приблизно 5 років. Це серйозний недолік таких накопичувачів енергії. При такому аналізі необхідно також звернути увагу на вартість літій-іонних акумуляторів. Все це значно зменшує економічний ефект від електричного транспорту на акумуляторах.

Розглянемо ЕБ, що використовує СК замість звичайних акумуляторів. Період обслуговування СК набагато довший в порівнянні з літій-іонними батареями. Як зазначалося раніше, типовий період експлуатації акумуляторної батареї сучасного автобуса становить 5 років, а термін служби самого автобу-

са – 10...12 років. Це означає, що в період експлуатації тягова батарея повинна буде замінена хоча б один раз. На відміну від АКБ, СК не потребують заміни протягом усього періоду експлуатації автобуса [33, 73].

Основними перевагами СК є:

- велика питома вага і об'єм ємності;
- здатність витримувати високі зарядні струми без загрози для безпеки та виходу з експлуатації;
- низький рівень саморозряду;
- широкий діапазон робочих температур, немає потреби в обслуговуванні при експлуатації;
- висока надійність агрегатів, що підтверджується багаторічними випробуваннями і відгуками споживачів.

Робота міського автобуса має свою специфіку – часті зупинки, уповільнення і прискорення руху. Це вимагає від АКБ витримувати велику кількість циклів розряду/заряду [33, 73].

Кількість циклів розряду/заряду СК, в залежності від інтенсивності їзди, становить 500...1000 на добу, і це більше мільйона циклів протягом 10 років використання, що гарантує виробник. Таким чином, СК батареї мають кращі техніко-економічні показники, ніж АКБ. СК характеризуються найдовшим терміном служби, найменшою вагою, більш широким діапазоном робочих температур і відсутністю необхідності в обслуговуванні [33, 73].

Таким чином, проведений аналіз показує, що з точки зору експлуатаційних витрат ЕБ на АКБ є найбільш економічними, але висока ціна і короткий період використання літій-іонних акумуляторних батарей можуть серйозно знизити їх привабливість. Таким чином, ЕБ на СК є дуже перспективним для міського транспорту. До того ж, якщо він буде вироблятися на місці, накопичувачі енергії такого типу будуть мати собівартість, набагато меншу, ніж у літій-іонних акумуляторних батарей. При тому що строк служби СК набагато довший, ніж самого автобуса [33, 73].

1.4 Обґрунтування напрямків дослідження і постановка завдань

Технічний розвиток і світова урбанізація призвели до виникнення серйозних проблем великих міст, а саме: екологічних; паливно-ресурсних; до збільшення захворювань, пов'язаних з забрудненням оточуючого середовища; до перенасичення міст автотранспортом, що стає причиною заторів, ДТП і веде до зниження мобільності населення. Вирішення цих питань є актуальною задачею. У багатьох розвинених країнах світу приймаються різноманітні заходи задля цього. І перше, на що акцентується увага – це на зменшення кількості автотранспортних засобів з ДВЗ у містах за рахунок впровадження енергоефективного громадського транспорту.

Зазначені проблеми є не менш актуальними і для українських міст, а використання електробусів є одним з способів їх вирішення. Для визначення шляхів підвищення експлуатаційних властивостей міського ЕБ на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації на рис. 1.4 представлено структуру тягового привода електробуса та допоміжних систем.

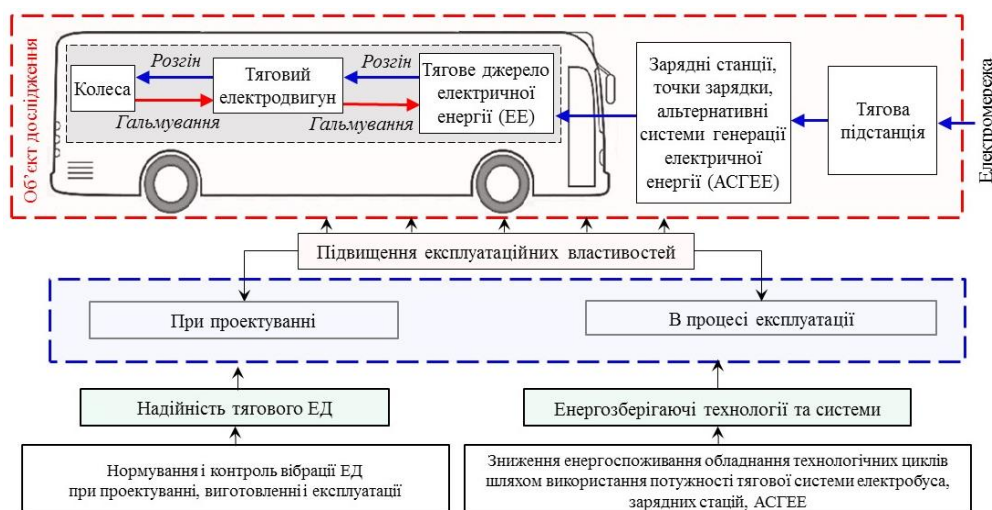


Рисунок 1.4 – Структура тягового привода електробуса та систем, що забезпечують підвищення його експлуатаційних властивостей

Модель проблеми підвищення експлуатаційних властивостей міського транспорту застосуванням електричного приводу представлено на рис. 1.5.

Дієвим і простим шляхом вирішення зазначеної проблеми є використання у містах екологічних сучасних ЕБ і розширення відповідної зарядної інфраструктури. Здійснення заміни міського дорожнього транспорту на ЕБ можливе декількома шляхами, а саме: використанням закордонних існуючих аналогів; переобладнанням автобусів і тролейбусів в ЕБ; розвитком вітчизняного виробництва ЕБ.

Незважаючи на те, що виробництвом електробусів займаються такі відомі компанії як: «BYD», «Skywell» (КНР), «Proterra» (США), «Белкомунмаш» (Білорусь), «Volvo» (Швеція), «Solaris» (Польща), «VDL Bus&Coach» (Нідерланди), ЗАО «Тролза» (Росія), використання закордонних ЕБ має серйозні недоліки. А саме: високу ціну на рухомий склад і додаткове обладнання; вони не завжди пристосовані до умов експлуатації в Україні; не використовується існуючий рухомий склад міського транспорту тощо.

Переобладнання уживаних автобусів і тролейбусів та виробництво нових вітчизняних електробусів є більш перспективним шляхом. Але для цього необхідно вирішити ряд питань. Треба обрати найважливіші складові тягової системи електробуса – це тяговий електродвигун і тягове джерело електричної енергії та облаштувати зарядну інфраструктуру.

Від якості тягового ЕД безпосередньо залежить ефективність експлуатації електробуса, тому до ЕД ставляться серйозні вимоги. Він повинен відповідати критерію якості за показником надійності (рис. 1.6) до якого відноситься: безвідмовність, довговічність, контроле- та ремонтпридатність [77]. Для досягнення цієї мети на стадіях проектування, виробництва і експлуатації необхідне нормування і контроль вібродіагностичних характеристик ЕД. Це потребує розробки методів оцінки якості проектування і експлуатації ЕД.

Далі по тексту під виразом «якість ЕД» матиметься на увазі показник якості – надійність, у відповідності до рис. 1.6 та ДСТУ ISO 9000:2007 [78]. Важливо відмітити, що питанням розробки електробуса та його системами живлення займається український науковець В. І. Заруденко [79]; дослідженням і вибором електродвигунів у якості тягових – О. О. Мельник, С. М. Пересада [80], О. В. Драга, С. М. Ковбаса, Ю. Л. Крайник, О. І. Гула, В. Я. Двадненко, О. П. Смірнов і інші.

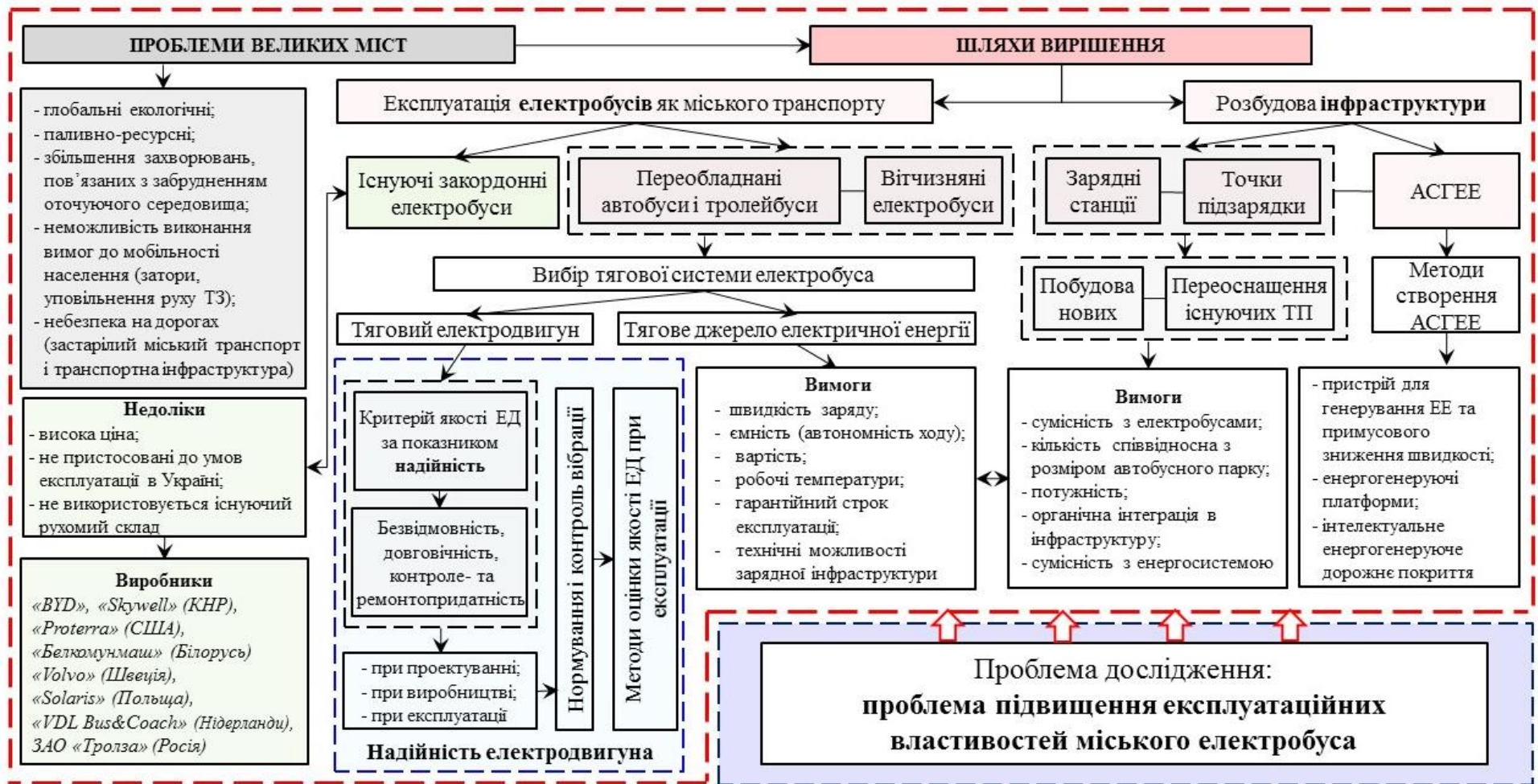


Рисунок 1.5 – Модель проблеми підвищення експлуатаційних властивостей міського електробуса

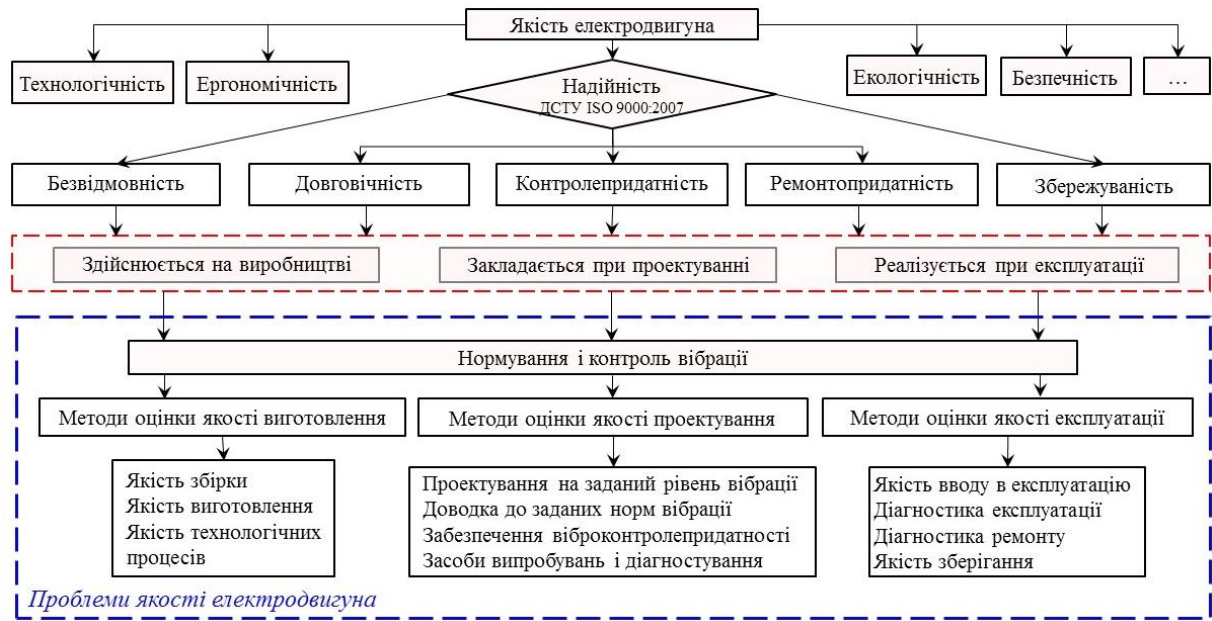


Рисунок 1.6 – Модель проблеми дослідження ЕД тягового електроприводу

Не дивлячись на те, що існують державні і міжнародні стандарти щодо електричних обертових машин [81], питанню удосконалення методів визначення їх якості, пошуку критеріїв, які найбільш широко описують стан двигуна і розробці способів їх діагностування приділяється багато уваги науковцями і інженерами всього світу. Наприклад, італійські вчені Болонського університету А. Cavallini, G. C. Montanari, M. Tozzi [82], аналізуючи результати випробувань електродвигуна за процедурами технічного стандарту IEC 60034-18-41 (оцінка якості електродвигунів за допомогою випробування з частковим розрядом) недосконалість стандарту підтверджують тим, що двигун, який міг би пройти випробування, після подачі живлення через ШІМ-інвертор, їх не пройшов, бо був пошкоджений саме під час випробувань.

Існують різні методи діагностування електродвигунів, наприклад, метод діагностики на основі аналізу параметрів їх зовнішнього магнітного поля, який досліджував В. Г. Тонких в роботі [83]. Недоліком цього методу є те, що він може діагностувати лише механічні пошкодження ЕД.

Дослідженнями методів контролю стану ізоляції ЕД займалися: В. В. Грабко [84], В. Петухов і В. Соколов [85]; О. Ю. Вовк, А. Ю. Вовк, Л. М.

Безменнікова і С.О. Квітка [86], О. В. Шефер, В. М. Галай, В. В. Крицький [87], Пен Ван, Цзянь Ван, Хон'їн Сюй, Андреа Кавалліні [88] та інші. Але ці методи не дають можливості виявити причину перегріву ізоляції, тобто діагностувати неполадки ЕД.

Ще одним важливим елементом електробуса, крім тягового ЕД, є тягове джерело електричної енергії. Його вибір залежить від експлуатаційних вимог до електробуса, технічних характеристик маршруту на якому буде працювати електробус і фінансових обмежень.

Дослідженнями тягових накопичувачів енергії для електробусів і електромобілів займалися такі науковці як: В. А. Войтенко, В. А. Водічев, К. И. Семенов, М. В. Матковский [89, 90], С. В. Войтків [91], Л. А. Скрипко [92], А. А. Исупов, С. П. Якубович і А. И. Кункевич [93].

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 і точки підзарядки, а також АСТЕЕ.

Для підвищення експлуатаційних властивостей міського електробуса в процесі експлуатації необхідно будувати нові ЗС і точки підзарядки або, за наявності технічних можливостей, переобладнувати існуючі ТП. При цьому важливо враховувати, що ЗС повинні бути сумісними з електробусами і з енергосистемою; кількість ЗС повинна бути співвідносною з розмірами автобусного парку; вони повинні мати достатню потужність; повинні вписуватися в інфраструктуру міста.

Дослідженнями і розробкою зарядних станцій і точок для підзарядки ТЗ на електричній тязі займалися такі вчені як: Ю. К. Толстокорова [94], Д. О. Затилюк [95], В. Будко [96], Л. Петраковский [97], Т. В. Голубчик [98], А. Н. Чусов [99], Y. Zheng, Z. Y. Dong, Y. Xu, K. Meng [100] і інші.

Крім звичайних зарядних станцій, що живляться від мережі, необхідно розробляти АСГЕЕ, які стануть додатковим джерелом енергії і сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації міського електробуса.

Питанням використання сонячної енергії для покращення експлуатації електромобілів займаються такі науковці як Л. Д. Стадник, В.О. Колесніков [101], О. П. Смирнов [102], А. І. Басараб [103], S. H. I. Jaffery, M. Khan, L. Ali, H. A. Khan, R. A. Mufti [104] і багато інших.

Також у якості додаткових джерел енергії являє неабиякий інтерес використання вітрової енергії. Цьому питанню приділяє увагу багато дослідників, наприклад, такі науковці як Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк [105], В. І. Будько [106] і інші. На жаль, у містах використання вітрогенераторів неможливе, але на автострадах чи на автомагістралях вітрова енергія може стати додатковим джерелом енергії для підзарядки ТЗ на електричній тязі.

Крім вище названих, існують і інші джерела електричної енергії, які теж можуть використовуватися на транспорті. Наприклад, це перетворення кінетичної енергії в електричну, що досліджували Р. Fairley [107], M. Ramadan, M. Khaled, H. El Hage [108], N. Chen, H. J. Jung, H. Jabbar, T. H. Sung, T. Wei [109] і інші.

Об'єднання різних АСГЕЕ в єдину систему дозволить підвищити ефективність і покращити експлуатацію міського електробуса.

Для вирішення проблеми енергозбереження при експлуатації міського електробуса було розроблено структурно-логічну схему дослідження, представлену на рис. 1.7.

Поставлені завдання були вирішені і розкриті в шести розділах дисертаційної роботи.

Отримані практичні результати повністю підтвердили висунуту гіпотезу, яка полягає в тому, що: підвищення ефективності експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту забезпечується застосуванням електричного приводу і альтернативних систем генерації електричної енергії як в електробусі, так і на транспортній інфраструктурі.

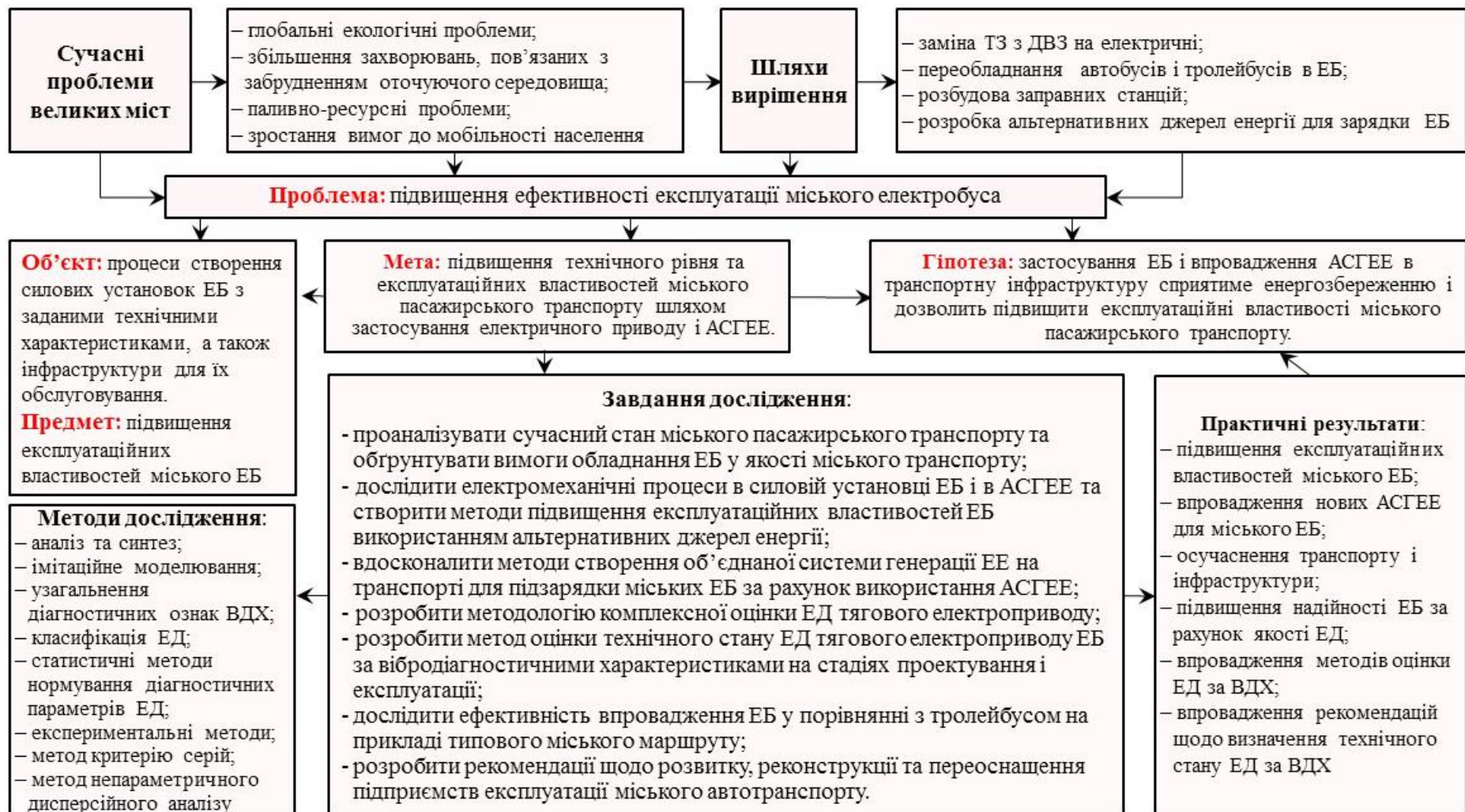


Рисунок 1.7 – Структурно-логічна схема дослідження енергозбереження при експлуатації міського електробуса

Висновки за розділом 1

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. Проведене дослідження способів стимулювання розвитку автомобільного транспорту на електричній тязі в світі показало, що це є актуальними і пріоритетними питаннями для більшості розвинених країн, в тому числі і для України (у відповідності до «Національної транспортної стратегії України до 2030 року», схваленої урядом у 2018 р.).

3. Представлено порівняльний аналіз експлуатаційних витрат автобусів одного класу (дизельних, гібридних і електричних) для міських умов експлуатації. Розрахунки показали, 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.

5. Обчислено кількість використаної і виробленої енергії в процесі руху електробуса в міських умовах. Оцінка дозволяє визначити технічні вимоги до електроенергетичного обладнання автобуса з СК. Розрахунок показав, що для розгону електробуса до максимально допустимої швидкості 13,9 м/с потрібно 1,19 МДж. Визначено, що електробус при гальмуванні, завдяки рекуперативній енергії, може генерувати до 0,274 МДж. Ці дані дозволяють розрахувати параметри блоку СК для конкретної відстані пробігу електробуса на одному заряді.

7. Розроблено модель проблеми підвищення експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту застосуванням електричного приводу.

Результати даних досліджень були опубліковані в роботах [1, 2, 4, 6, 15, 17, 27, 31, 33, 35, 36].

РОЗДІЛ 2

СИЛОВА УСТАНОВКА ЕЛЕКТРОБУСА ЯК ОБ'ЄКТ УПРАВЛІННЯ

Існує чотири основні типи електробусів: гібридні, на паливних елементах, на акумуляторах та гібридні тролейбуси. Кожен з цих типів в залежності від конструкції діляться на підтипи, рис. 2.1.

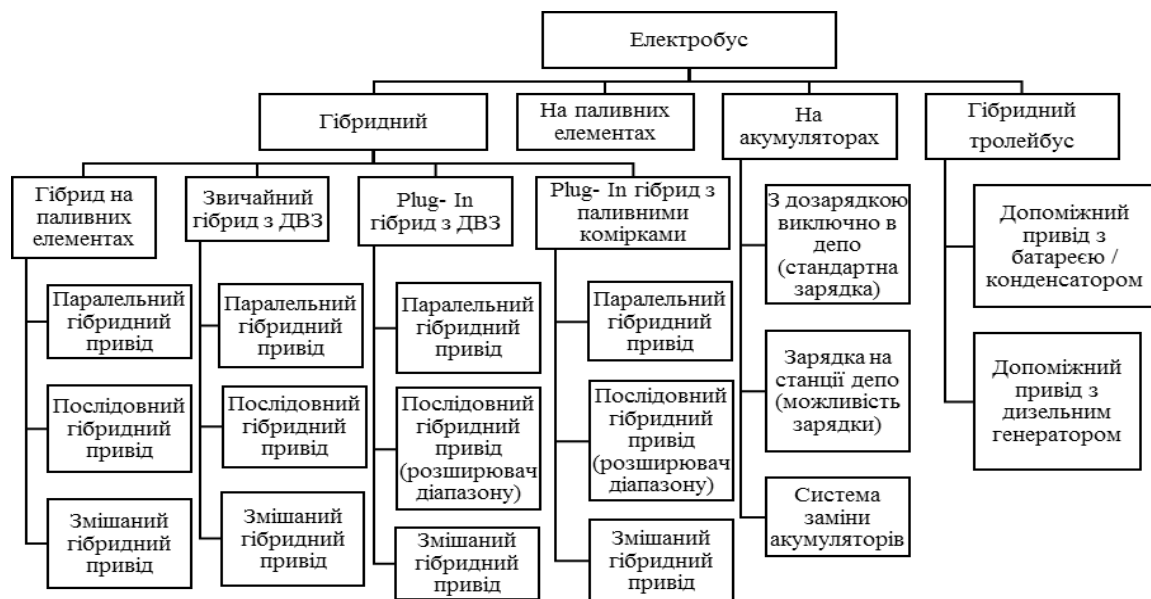


Рисунок 2.1 – Типи електробусів

Для використання у якості міського транспорту найбільш перспективними є електробуси на акумуляторах/суперконденсаторах і гібридні. Тож для осучаснення міського електротранспорту шляхом використання електробусів необхідно вирішити декілька принципових питань, а саме:

- вибір найбільш ефективного накопичувача енергії як з економічної, так і з технічної точки зору;
- вибір тягового електродвигуна;
- вибір способу зарядки електробусу з урахуванням: часу зарядки, технічної реалізації зарядного пристрою, мінімізації експлуатаційних витрат, підвищення надійності.

2.1 Конфігурації електричних транспортних засобів. Основні конструкції електробусів

Сучасні електробуси побудовані на основі оригінальних конструкцій кузова і рами [110]. Схематичне зображення загальної конфігурації електробуса представлено на рис. 2.2 [110].



Рисунок 2.2 – Схематичне зображення загальної конфігурації електробуса

Привод електробуса складається з трьох основних підсистем:

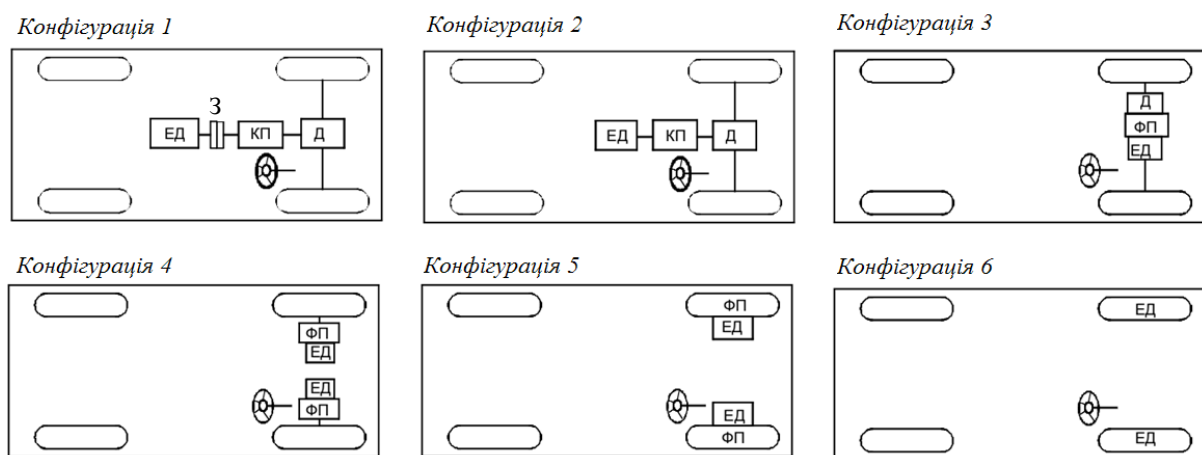
- електроприводної підсистеми;
- підсистеми джерела енергії;
- допоміжної підсистеми.

Електроприводна підсистема складається з контролера ТЗ, силового електронного перетворювача, електродвигуна, механічної трансмісії і ведучих коліс.

Підсистема джерела енергії включає в себе: джерело ЕЕ, блок управління енергією і блок зарядки. Ця підсистема складається з блоку гідропідсилювача керма, блоку клімат-контролю і блоку допоміжного джерела живлення.

Грунтуючись на керуючих входах педалей акселератора і гальма, контролер електробуса подає відповідні сигнали на електронний перетворювач потужності, який призначений для регулювання потоку потужності між ЕД і джерелом ЕЕ. Зворотний потік енергії обумовлений рекуперативним гальмуванням електробусу. Ця рекуперативна енергія може бути використана для підзарядки АКБ або напряму для живлення електроприладів. Більшість АКБ в тому числі суперконденсатори (СК) легко здатні приймати рекуперативну енергію. Блок управління енергією взаємодіє з контролером електробуса для управління рекуперативним гальмуванням і його рекуперативною енергією. Він також працює для управління блоком підзарядки і контролю використання ЕЕ. Допоміжне джерело живлення забезпечує необхідну потужність на різних рівнях напруги для всіх допоміжних приладів електробусів, особливо для пристрою клімат-контролю і підсилювачів рульового керування.

Існує багато можливих конфігурацій електробусів, які відрізняються характеристиками електричної тяги і джерел енергії, рис. 2.3 [110].



З – зчеплення; Д – диференціал; ФП – фіксована передача;
КП – коробка передач; ЕД – електродвигун

Рисунок 2.3 – Можливі конфігурації електробусів [110]

Конфігурація 1. В ній електричний привод замінює традиційну трансмісію ТЗ з ДВЗ. Він складається з ЕД, зчеплення, коробки передач і диференціала. Зчеплення і коробка передач можуть бути замінені

автоматичною коробкою передач. Муфта використовується для підключення або відключення живлення ЕД від ведучих коліс. Коробка передач забезпечує набір передавальних чисел для зміни профілю швидкості-потужності (крутного моменту) відповідно до вимог навантаження. Диференціал являє собою механічний пристрій (зазвичай набір планетарних шестерень), який дозволяє колесам з обох сторін рухатися з різними швидкостями, коли транспортний засіб рухається по криволінійній траєкторії.

Конфігурація 2 з ЕД, який має постійну потужність у великому діапазоні швидкостей, фіксована передача може замінити багатошвидкісну коробку передач і зменшити необхідність в зчепленні. Це не тільки зменшує розміри і вагу механічної трансмісії, але також спрощує управління трансмісією, оскільки перемикання передач не потрібно.

Конфігурація 3 подібна до приводної передачі (конфігурації 2), має ЕД, фіксовану передачу і диференціал, які можуть бути додатково об'єднані в єдиний вузол, в той час, як обидві осі спрямовані на обидва ведучі колеса. Вся трансмісія ще більше спрощується і ущільнюється.

Конфігурація 4. Механічний диференціал замінений двома тяговими ЕД. Кожен з них веде одне бічне колесо і працює з різною швидкістю, коли автомобіль рухається по кривій дорозі.

Конфігурація 5. Для спрощення трансмісії тяговий ЕД може бути розміщений всередині колеса (повний привод). Зубчаста передача може бути використана для зменшення швидкості ЕД і підвищення крутного моменту. Зубчастий редуктор має перевагу через високошвидкісне передавальне число, а також вбудованим розташуванням вхідного і вихідного валів.

Конфігурація 6. В ній повністю відсутня будь-яка механічна передача між ЕД і ведучими колесами. Ротор тихохідного ЕД в мотор-колесі може бути безпосередньо з'єднаний з ведучим колесом. Регулювання швидкості ЕД еквівалентно контролю швидкості обертання колеса і, отже, швидкості автомобіля. Однак ця схема вимагає, щоб ЕД мав більш високий крутний момент для запуску і прискорення ТЗ.

Розглянемо основні конструкції електробусів.

Для простоти аналізу можна виділити три основні види електробусів, що відрізняються компоновкою накопичувачів ЕЕ, часом зарядки і автономністю ходу [111]:

- з автономним ходом до 250 км, з накопичувачами ЕЕ великої ємності;
- з автономним ходом до 50 км з накопичувачами ЕЕ обмеженої ємності. Зарядка здійснюється на кінцевих зупинках протягом 10-30 хв.;
- з накопичувачами ЕЕ, що забезпечують автономний хід до 5 км. Зарядка здійснюється на зупинках під час посадки-висадки пасажирів. Час зарядки – десятки секунд.

Силова підстанція для електробуса, так саме, як і для тролейбуса, буде складатися з трансформатора і зарядного пристрою (замість випрямляча для тролейбуса). Незважаючи на невелику відміну, ефективність цих пристроїв становить 0,93...0,98.

На відміну від перетворювачів енергії ефективність накопичувача енергії визначається як співвідношення енергії заряду за певний період до енергії розряду за той же період. Значення ККД основних типів електричних накопичувачів складають:

- для літій-іонних акумуляторів, наприклад, марки КОКАМ [112], ККД=0,908...0,955 в залежності від конфігурації батареї;
- для суперконденсаторів ККД=0,9 [113].

Інвертор і тяговий ЕД в електробусі може застосовуватися аналогічний тим, що і в тролейбусах.

Електробуси з великим автономним ходом. Вони мають ряд переваг і недоліків, які є визначальними у виборі сфери їх застосування. До їх головної переваги відноситься автономність ходу без підзарядки. Але для цього на борту електробусу встановлюються важкі і габаритні АКБ, що веде за собою збільшення загальної ваги, а значить і збільшення енерговитрат на здійснення руху. Крім того, зарядка АКБ вимагає багато часу – до 8 год. Не менш важливий недолік – це висока вартість АКБ. Саме це є суттєвою перепорою для

широкого вжитку цього виду електробусів в Україні. Окрім того, варто відмітити, що для внутрішніх міських перевезень використання таких електробусів не є економічно виправданим.

Загальне схематичне зображення послідовності перетворення енергії від мережі в електробусі представлено на рис. 2.4.

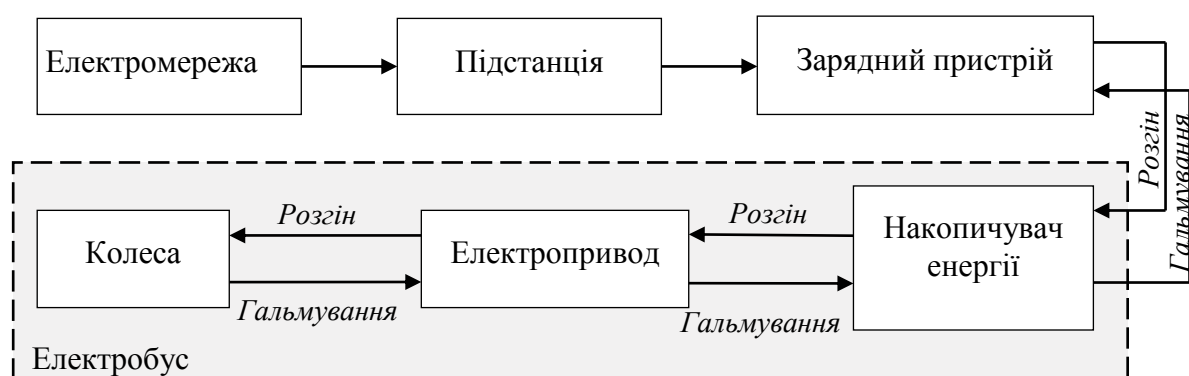


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення послідовності перетворення енергії від мережі в електробусі

Електробус з автономним ходом до 50 км. Послідовність перетворення енергії від мережі для даного типу електробусів виглядає так само, як і для електробусів з великим автономним ходом, рис. 2.4, але є деякі відмінності на які треба звернути увагу. Хоч силова підстанція і зарядний пристрій, що розташовані на кінцевій зупинці маршруту, будуть функціонувати таким же чином, як і для попереднього випадку, однак перетворювач матиме вищу пропускну потужність і/або струм для швидкої зарядки, внаслідок чого можливе незначне підвищення його ККД на 0,2...0,3 % в порівнянні з попередньою конструкцією [111].

У електробусах з зарядкою на кінцевих зупинках застосовуються аналогічні накопичувачі енергії, що і в попередній конструкції, але на даний час вже є сенс для накопичування енергії використовувати СК.

Електробуси з підзарядкою на проміжних зупинках. Послідовність перетворення енергії від мережі при даній стратегії енергозабезпечення представлено на рис. 2.5.

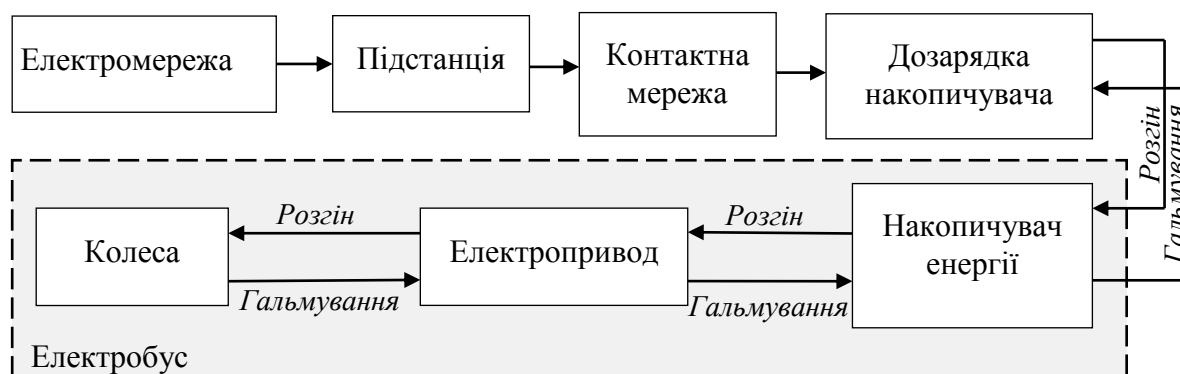


Рисунок 2.5 – Схематичне зображення послідовності перетворення енергії від мережі в електробусі

Відмінності даної конструкції від вищеописаних конструкцій електробусів. Підстанція повинна забезпечувати подачу ЕЕ на фідери контактної мережі. Випрямляч в даній схемі відсутній. Контактна мережа має таку ж саму структуру, як і для тролейбусів – фідери, що підводять струм до сегментів. Але сегменти мають більш коротку довжину, а фідери підводять струм до зупинок, при цьому використовується змінний струм, бо це є більш ефективним і дозволить збільшити ККД цієї частини до 98 % [111].

Зарядний пристрій для даної концепції може бути як стаціонарний і розташовуватися на зупинці, так і мобільним – знаходитись в електробусі. Так як в обох випадках одночасно заряджається тільки один транспортний засіб, то характеристики в обох випадках будуть однаковими. Зарядний пристрій повинен швидко заряджати електробус, що знаходиться на зупинці, і має забезпечувати великий струм. ККД такого зарядного пристрою буде дорівнює ККД перетворювача і складе приблизно 97-98 % [111].

Ще один варіант конструкції самого зарядного пристрою – зі своїм власним буферним накопичувачем енергії. Це дозволить зменшити споживаний струм від мережі, накопичувати енергію, поки немає електробуса, і швидко віддавати її електробусу під час зарядки, але ККД такого зарядного пристрою впаде за рахунок ККД буферного накопичувача. В описуваному типі електробуса може застосовуватися будь-який накопичувач енергії, тільки меншого масштабу. Найбільш ефективним слід визнати використання су-

перконденсаторів, що забезпечують дуже високі струми зарядки і розрядки.

Беручи до уваги загальні значення ККД зарядки і рекуперації, отримані в ході проведеного аналізу ефективності перетворення ЕЕ для кожної концепції енергозабезпечення безрейкового електричного пасажирського транспорту, були визначені середні значення споживаної потужності автотранспортних засобів по розрахунковому їздовому циклу без урахування і з урахуванням рекуперації, які представлені в таблиці 2.1 [111].

Таблиця 2.1 – Ефективність перетворення ЕЕ та енергоспоживання електричного міського транспорту

Параметр		Тролейбус	Електро- бус	Електробус з зарядкою на кінцевих зупинках	Електробус з підзарядкою на проміжних зупинках
Загальний ККД заряду		0,702	0,823	0,825	0,779
Загальний ККД рекуперації		0,691	0,848	0,848	0,848
Середня споживана потужність без урахування рекуперації, кВт		36,64	34,8	32,06	33,43
Середня споживана потужність з урахуванням рекуперації, кВт		30,04	25,73	23,78	25,28
Питома споживана потужність з урахуванням рекуперації	кВт/км	2,22	1,9	1,76	1,87
	кВт/ год	2,66	2,28	2,11	2,24

Наведені дані показують, що найбільш ефективному споживанню електроенергії від електромережі, а також більш високому ступеню рекуперації електроенергії (до 26 % від необхідної для руху транспортного засобу енергії) відповідають електробуси.

2.2 Дослідження основних технічних характеристик електробусів

Ефективність водіння автомобіля зазвичай оцінюється часом його розгону, максимальною швидкістю і здатністю долати підйоми. У конструкції трансмісії електромобілів номінальна потужність електродвигуна і параметри

трансмисії є основними характеристиками для перевірки на відповідність технічним характеристикам, які залежать в основному від швидкісних характеристик (крутного моменту) тягового двигуна.

2.2.1 Основні характеристики тягових електродвигунів

Електродвигуни зі змінною швидкістю обертання зазвичай мають характеристики, представлені на рис. 2.6.

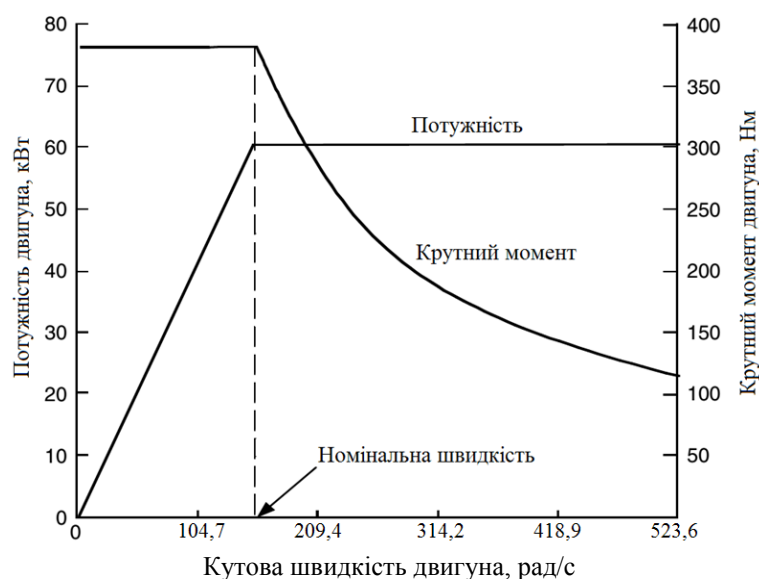


Рисунок 2.6 – Типові характеристики електродвигуна зі змінною швидкістю

В області низьких швидкостей (нижче базової швидкості, як показано на рис. 2.6), ЕД має постійний крутний момент. В високошвидкісній області (вище базової швидкості) ЕД має постійну потужність. Ця характеристика зазвичай представлена відношенням швидкості x , яка визначається як відношення максимальної швидкості двигуна до його базової швидкості. У низькошвидкісних режимах подача напруги на ЕД збільшується зі збільшенням швидкості через електронний перетворювач, в той час як магнітний потік підтримується постійним. У точці базової швидкості напруга ЕД досягає напруги джерела. Після базової швидкості напруга ЕД підтримується постійною, а потік слабшає, гіперболічно знижуючись зі збільшенням швидкості. Отже, його крутний момент також падає гіперболічно зі збільшенням швидкості [110].

На рис. 2.7 представлено графічну залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт з різними швидкісними коефіцієнтами x ($x_1 = 2$, $x_2 = 4$, $x_3 = 6$).

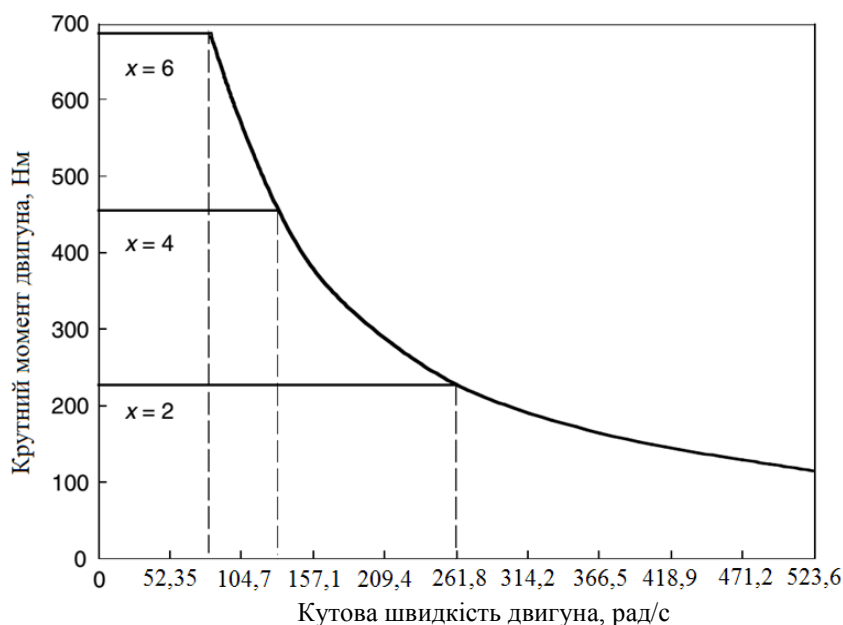


Рисунок 2.7 – Графічна залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт зі швидкісними коефіцієнтами $x_1 = 2$, $x_2 = 4$, $x_3 = 6$

Зрозуміло, що з великою областю постійної потужності максимальний крутний момент двигуна може бути значно збільшений, і, отже, можна поліпшити характеристики прискорення та потужність ТЗ, а також спростити передачу. Проте, кожен тип ЕД за своєю природою має свої обмеження максимальної швидкості. Наприклад, ЕД з постійними магнітами мають низьке значення $x < 2$ через труднощі послаблення поля внаслідок наявності постійного магніту. У вентильно-індукторних ЕД швидкісні коефіцієнти x можуть досягти значень більше 6, а асинхронних ЕД близько $x=4$.

2.2.2 Тягові сили і вимоги до передачі

Тягове зусилля F_T , що розвивається тяговим двигуном на ведучих колесах, і швидкість транспортного засобу V , м/с, виражаються виразами [110]:

$$F_T = \frac{T_d \cdot i_{II} \cdot i_0 \cdot \eta_T}{r_B}; \quad (2.1)$$

$$V = \frac{\pi \cdot N_d \cdot r_B}{30 i_{II} \cdot i_0}, \quad (2.2)$$

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

i_{II} – передавальне відношення передачі;

i_0 – передавальне число кінцевого приводу;

η_T – ефективність всієї трансмісії від двигуна до ведучих коліс;

r_B – радіус ведучих коліс.

Використання багатоступеневої або одноступеневої коробки передач залежить в основному від швидкості ЕД (характеристик крутного моменту). Тобто при номінальній потужності ЕД, якщо він має велику область постійної потужності, буде достатньо одноступеневої коробки передач для високого тягового зусилля на низьких швидкостях. В іншому випадку потрібна трансмісія з декількома передачами (більше двох). На рис. 2.8 показано тягове зусилля електромобіля, а також швидкість ТЗ з тяговим ЕД $x=2$ і триступеневою коробкою передач.

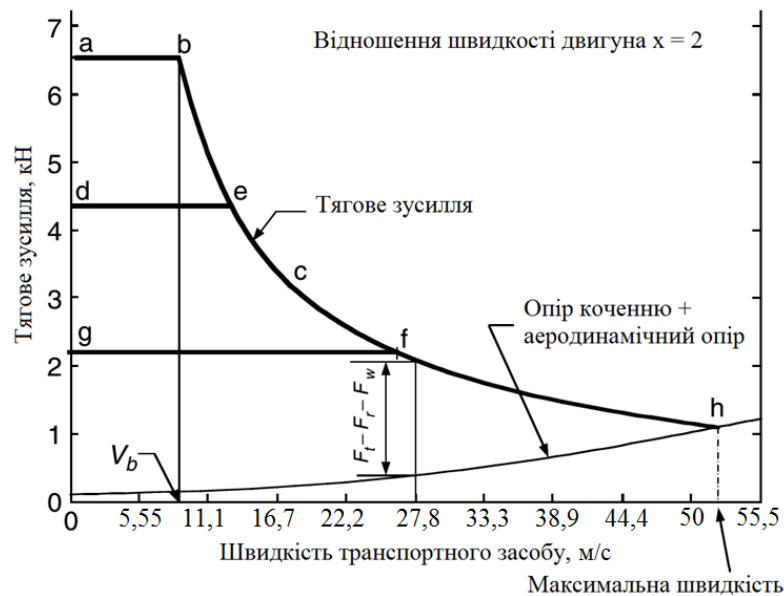


Рисунок 2.8 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $x=2$ і триступеневою коробкою передач

Перша передача охоплює область швидкості a-b-c, друга передача d-e-f, а третя g-f-h [110].

На рис. 2.9 показано тягове зусилля з тяговим двигуном $\chi=4$ і двоступеневою коробкою передач. Перша передача покриває область швидкості a-b-c, а друга передача – d-e-f [110].

На рис. 2.10 показано тягове зусилля з тяговим двигуном $\chi=6$ і одноступеневою коробкою передач.

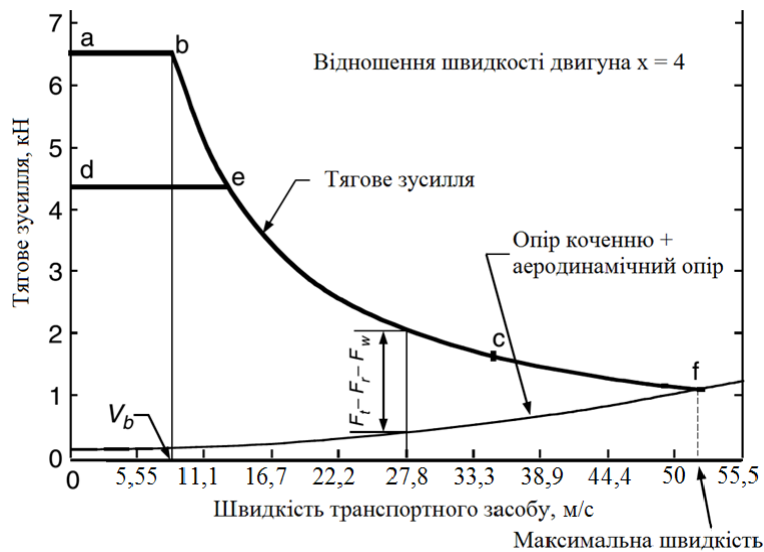


Рисунок 2.9 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $\chi=4$ і двоступеневою коробкою передач

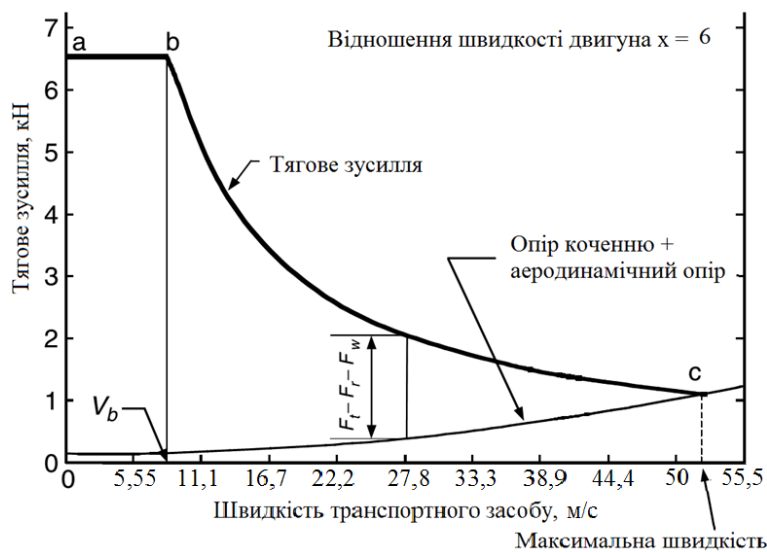


Рисунок 2.10 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном $\chi=6$ і одноступеневою коробкою передач

Ці три конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості транспортного засобу. Отже, транспортні засоби будуть мати однакові показники прискорення і здатність долати підйоми.

2.2.3 Визначення ефективності електробуса

Основні характеристики електробуса включають максимальну крейсерську швидкість, здатність долати підйоми і прискорення. Максимальна швидкість транспортного засобу може бути легко знайдена точкою перетину кривої тягового зусилля з кривою опору (опір коченню плюс аеродинамічний опір) на діаграмі тягового зусилля в залежності від швидкості транспортного засобу, рис. 2.8...2.10 [110]. Слід зазначити, що в деяких конструкціях такої точки перетину не існує. Це стосується конструкцій в яких зазвичай використовується великий тяговий двигун або велике передавальне число. В цьому випадку максимальна швидкість електромобіля визначається максимальною швидкістю тягового двигуна [110]:

$$V_{\max} = \frac{\pi \cdot V_{\text{д max}} \cdot r_{\text{в}}}{30 i_{\text{п min}} \cdot i_0}, \quad (2.3)$$

де V_{\max} – максимальною швидкістю тягового двигуна, м/с;

$V_{\text{д max}}$ – максимально допустима швидкість тягового ЕД, об/хв;

$i_{\text{п min}}$ – мінімальне передавальне відношення трансмісії (найвища передача).

Похибка визначається чистим тяговим зусиллям транспортного засобу, $F_{\text{T-net}}$, як показано на рис. 2.8...2.10. На середніх і високих швидкостях здатність долати підйом менша, ніж на низьких швидкостях. Максимальний підйом, який транспортний засіб може подолати на даній швидкості, може бути розрахований [110] за допомогою виразу (2.4):

$$i = \frac{F_{\text{T-net}}}{M_{\text{T.3}} \cdot g} = \frac{F_{\text{T}} - (F_r + F_{\omega})}{M_{\text{T.3}} \cdot g}; \quad (2.4)$$

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

де F_T – тягове зусилля на ведучих колесах;

F_r – опір коченню шини;

F_ω – аеродинамічний опір;

$M_{Т.з}$ – 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):

$$\sin \alpha = \frac{d - f_r \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2}, \quad (2.5)$$

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

f_r – коефіцієнт опору коченню електробуса.

Ефективність прискорення ТЗ оцінюється часом, який потрібен для його прискорення від низькошвидкісного (зазвичай від нуля) до більш високої швидкості (100 км/год для легкових автомобілів).

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

2.2.4 Тягове зусилля в міському циклі руху електробуса

Характеристики ТЗ, описані раніше, визначають його можливості щодо швидкості, здатності долати підйом і прискорення, таким чином визначаючи потужність силової передачі ЕД. Однак у звичайних умовах водіння ці максимальні можливості використовуються не часто. Протягом більшої частини робочого часу, силовий агрегат працює з частковим навантаженням. Фактичне тягове зусилля (потужність) і швидкість ТЗ сильно різняться залежно від умов експлуатації, таких як прискорення або уповільнення, рух вгору або вниз тощо. Ці зміни пов'язані з дорожньою обстановкою, а також з типом ТЗ. Міські

та дорожні умови руху сильно розрізняються, як і різні призначення ТЗ.

Важко точно і кількісно описати зміни тягового зусилля і швидкості ТЗ в усіх можливих умовах руху. Тим не менш, для емуляції типового транспортного середовища існують типові цикли руху (графіки руху). Ці цикли руху представлені швидкостями ТЗ в залежності від часу роботи при русі по рівній дорозі. Через те, що запропонований електробус планується експлуатувати саме у місті, представимо типовий міський цикл руху на рис. 2.11 [110].

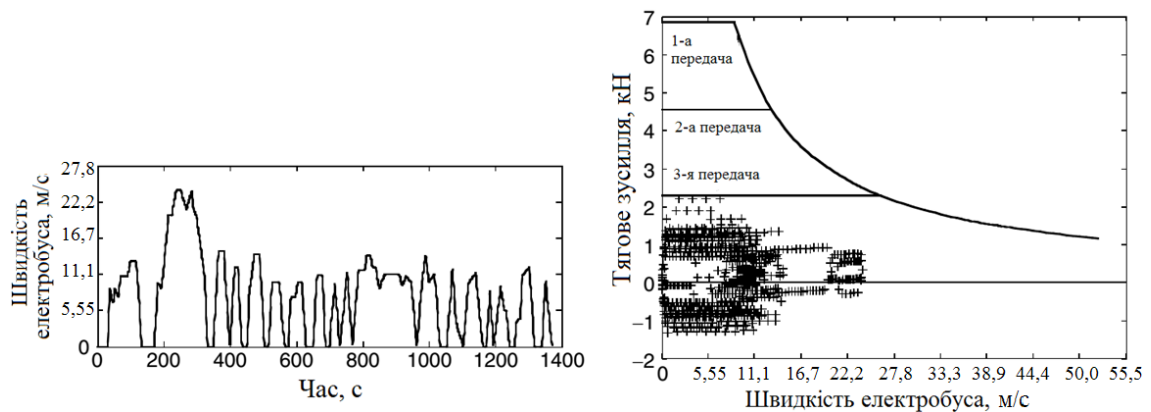


Рисунок 2.11 – Графік швидкості і тягового зусилля в міському циклі руху

Розподіл часу за швидкістю ТЗ і тяговим зусиллям в міському циклі представлено на рис. 2.12 [110].

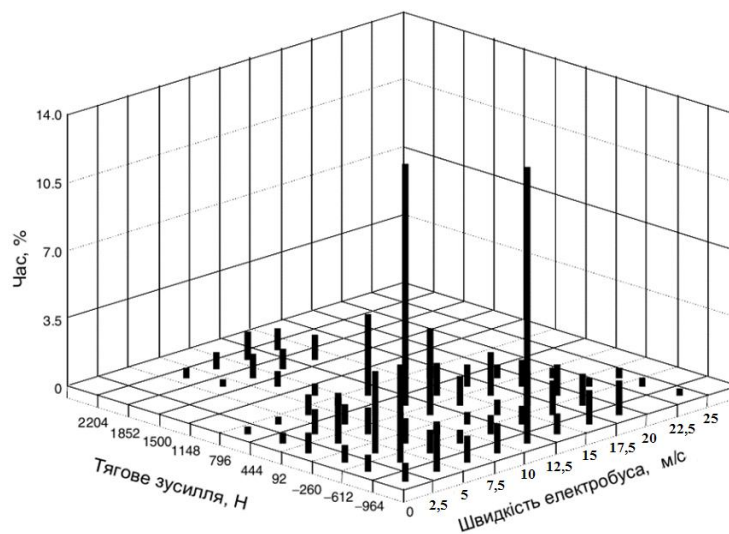


Рисунок 2.12 – Розподіл часу за швидкістю електробуса і тяговим зусиллям в міському циклі

2.2.5 Енергоспоживання електробуса

Для оцінки енергії, споживаної електричним ТЗ на одиницю відстані, використовують кВт·год/км. Для автомобілів з ДВЗ – використовується одиниця виміру – фізична одиниця споживання палива на одиницю відстані, наприклад, літрів на 100 км. Для електромобілів з електроприводом від батареї більше підходить вихідна одиниця енергоспоживання в кВт·год, виміряна на клеммах батареї. Енергетична ємність батареї зазвичай вимірюється в кВт·год, при цьому може бути розрахована дальність руху авто на один заряд батареї.

Споживана енергія – це загальна вихідна потужність на клеммах акумулятора. Для приведення електробуса в рух вихідна потужність АКБ 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 (η_t і η_d відповідно).

Таким чином, вихідна потужність батареї може бути виражена як [110]:

$$P_{б.вих} = \frac{V}{\eta_t \eta_d} \left(M_{Т.З} g (f_r + \xi) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right) \quad (2.6)$$

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

A_f – фронтальна зона електробуса;

ρ – щільність повітря;

δ – коефіцієнт маси, який представляє собою вплив обертових компонентів в силовій передачі.

В даному випадку нетягове навантаження (допоміжне) не враховується. У деяких випадках додаткове навантаження може бути доволі значними, щоб його можна було ігнорувати і його слід додавати до тягового навантаження.

До того ж, через наявність рекуперації в ЕБ, частина енергії гальмування (витрачена даремно на звичайних ТЗ) може бути відновлена шляхом використання приводу ЕД в режимі генератора.

Потужність рекуперативного гальмування на клеммах акумулятора може бути виражена як [110]:

$$P_{\text{б.вх}} = \frac{\alpha V}{\eta_{\text{т}} \eta_{\text{д}}} (M_{\text{т.з}} g (f_r + \xi) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}), \quad (2.7)$$

де ξ – нахил дороги або прискорення dV/dt , або обидва вони негативні;

α – коефіцієнт рекуперативного гальмування – це процентна частка від загальної енергії гальмування, яка може бути використана ЕД ($0 < \alpha < 1$).

Коефіцієнт рекуперативного гальмування α залежить від прикладеної сили гальмування і конструкції силового агрегату.

Чисте споживання енергії від батарей становить:

$$E_{\text{вих}} = \int_{\text{тяга}} P_{\text{б.вих}} dt + \int_{\text{гальмування}} P_{\text{б.вих}} dt. \quad (2.8)$$

Слід зазначити, що потужність гальмування у виразі (2.7) має негативний знак. Коли споживання енергії акумулятора досягає загальної енергії виміряної на клеммах акумулятора, батареї розряджені (потребують зарядки). Відстань між двома зарядками (ефективний діапазон руху) визначається загальною енергією, що переноситься батареями, опором потужності і ефективністю рекуперативного гальмування α .

Ефективність тягового ЕД залежить від його робочих точок на площині швидкість-крутний момент (швидкість-потужність), як показано на рис. 2.13, де існує найбільш ефективна робоча область [110].

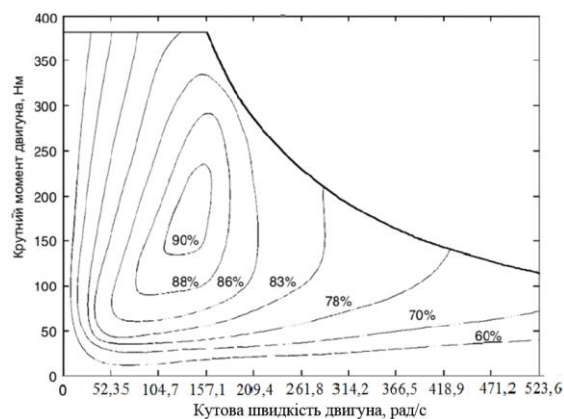


Рисунок 2.13 – Типові характеристики ефективності електродвигуна

При проектуванні силового агрегату ця зона повинна перекриватися або, принаймні, бути якомога наближеною до зони найбільшої ефективності.

2.3 Вибір тягового джерела електричної енергії для електробуса

Перед автовиробниками стоїть вимога переходити на виробництво автомобілів на електричній тязі. Але важливою умовою цього переходу є збереження усіх технічних характеристик, що мають автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) [18].

Однією з таких характеристик є відстань, яку може подолати авто без підзарядки – ефективний діапазон руху. Тобто, коли мова йде про електромобілі – важливою є ємність джерела ЕЕ – акумуляторної батареї.

Питання вибору АКБ для електромобілів і електробусів як було актуальним раніше, так і залишається досі. Це пов'язано з поширенням електротранспорту у всьому світі і постійною динамікою у розвитку накопичувачів енергії.

В найближчому майбутньому електромобілі, включаючи гібридні авто і інші «чисті» ТЗ, домінуватимуть на світовому авторинку [18].

На початку 1990-х років Міністерство енергетики США сформувало Розширений Консорціум (USABC) для прискорення розробки сучасних батарей для електромобілів. USABC передбачає галузеве партнерство між DOE, трьома автомобільними виробниками (Daimler-Chrysler, Ford і General Motors) і Дослідницьким інститутом електроенергетики [18].

Метою такого партнерства була розробка і виробництво АКБ, призначених для того, щоб електромобілі могли конкурувати з авто з ДВЗ в ціні і дальності пробігу. Слід зазначити, що розробки USABC були спрямовані на свинцево-кислотні (Pb-acid), нікель-метал-гідридні (NiMH), літій-іонні (Li-ion) і літійово-полімерні (lithium-polymer) батареї. Було таке розподілення: Daimler-Chrysler, Ford і General Motors випускатимуть автомобілі, в яких використовується Pb-acid батареї; Honda і Toyota – NiMH, а Nissan – Li-ion акумулятори [18].

Вже сьогодні можна відмітити, що середньострокові цілі USABC, за винятком відпускної ціни, були досягнуті першим поколінням Ovonic Battery Company NiMH, який був встановлений на EV-1 [50].

Зараз є важливим визначення найбільш ефективних акумуляторних батарей для використання як тягових джерел струму для міських електробусів. Для цього необхідно: провести огляд існуючих АКБ; зробити порівняльний аналіз їх технічних і експлуатаційних характеристик [18].

2.3.1 Вимоги до тягового джерела струму

Як відомо, вартість АКБ складає близько 40 % від загальної вартості електромобіля [114]. Тому правильний вибір АКБ і визначення оптимальних характеристик експлуатації дозволить найдовше зберегти джерело енергії не погіршивши технічні характеристики автомобіля.

При виборі тягової АКБ для електробуса важливо враховувати такі характеристики [18]:

- висока щільність енергії, яка може бути досягнута за один заряд – для забезпечення великої дальності пробігу;
- висока щільність енергії, що дозволяє досягти стабільної потужності з глибокими характеристиками розряду – для збільшення потужності електробуса;
- тривалий термін служби без обслуговування і складних захисних систем, вбудованих в акумулятор;
- можливість використання як вторинної батареї (екологічність).

Але, окрім цього, важливими характеристиками АКБ є маса-габаритні розміри, робоча температура та ціна.

Існує декілька видів АКБ, які більш детально описані в роботі автора дисертації [18]. Деякі з них розглянемо більш детально.

2.3.2.1 Свинцево-кислотний акумулятор – Pb-acid. Основні типи Pb-acid: стартерні; герметизовані (AGM); гелієві батареї (GEL); тягові. Pb-acid застосовують для: запуску автомобілів; освітлення і запалення; у великих резервних джерелах живлення; у вигляді тягових АКБ у візках для гольфу і інших електромобілях. Потужні Pb-acid використовують: для живлення

ЕД на дизель-електричних підводних човнах; при зануренні у воду; як джерела аварійної потужності на атомних підводних човнах; в резервних джерелах живлення для електричних скутерів, електричних інвалідних колясок, електрифікованих велосипедів тощо.

Порівняння основних характеристик AGM і GEL Pb-acid представлено у таблиці 2.2, а більш детально розглянуті у роботі автора [18].

Як показав більш детальний аналіз AGM і GEL акумулятори мають загальні недоліки: мала кількість циклів заряду-розряду, чутливі до перевищення напруги і до перегріву. Це заважає їх поширеному використанню як тягових джерел струму для електромобілів.

Таблиця 2.2 – Порівняння основних характеристик AGM і GEL акумуляторів

Показник	AGM	GEL
Ресурс, циклів	біля 300	600-900
Заряд	перевищення напруги при заряді може привести до кипіння і здуття батареї	вимогливі до точності заряду – перевищення може привести до спучення батареї.
Саморозряд	інтенсивніший, ніж у GEL	невеликий
Перегрів	не такий критичний, як у GEL, але теж небезпечний	може викликати вибух батареї
Глибокий розряд	бажана експлуатація при глибині розряду не більше 30%.	добре витримують глибокий розряд
Пусковий і максимальний струм	пускові струми більші, ніж у GEL	нездатні дати великі струми, особливо стартові (є високий внутрішній опір)
Чутливість до короткого замикання	менш чутливі, ніж GEL	дуже чутливі
Експлуатація	у будь-якому положенні, окрім «догори дном»	

2.3.2.2 Нікель-кадмієві – NiCd. Ці акумулятори досягають оптимальної продуктивності після декількох циклів заряду-розряду, що є частиною нормальної експлуатації. Пік енерговіддачі доводиться на діапазон між 100 і 300 циклами, після чого продуктивність акумулятора починає падати [18].

Виявлення повної зарядки герметичних NiCd є складнішим, ніж Pb-acid та Li-ion. Будь-яка тривала температура вище 45°C несприятливо позначається на терміні їх службі.

2.3.2.3 Нікель-метал-гідридний акумулятор – NiMH. При їх експлуатації алгоритм заряду схожий з методом заряду NiCd.

Деякі сучасні зарядні системи застосовують первинний заряд при струмі 1С. Досягши певного порогу по напрузі, відбувається витримка часу на протязі декількох хвилин за відсутності заряду, що дозволяє батареї знаходитися в оптимальному температурному діапазоні. Далі заряд вже триває при нижчому значенні струму при періодичному повторенні цих циклів до повного заряду. Цей метод відомий як «крок диференціального заряду». Він добре працює для усіх АКБ на основі нікелю. Зарядні пристрої, що використовують покроковий диференціал або інші агресивні методи заряду, дозволяють скоротити загальний час заряду батареї, проте надмірний заряд разом з високими струмами неодмінно має негативний ефект, що полягає в скороченні терміну служби батареї. Замість досягнення очікуваних 1000 циклів обслуговування швидкісні способи заряду можуть вичерпати ресурс батареї вже після 400 циклів [18].

2.3.2.4 Літій-іонні акумулятори – Li-ion. Вони поділяються на декілька типів у відповідності до використаних матеріалів у їх виробництві і технологій, що реалізуються [18].

1. Літій-кобальтові – LiCoO₂ – традиційні літій-іонні акумулятори, що широко застосовуються для живлення цифрових фотокамер, відеокамер, у батареях для ноутбуків, ліхтарів та на транспорті [18].

Як і усі літієві акумулятори, мають малу вагу. Здатні віддавати струм до 2С, але рекомендований тривалий струм розряду не повинен перевищувати 1С. Схильні до старіння з втратою ємності навіть коли не використовуються. Середній термін зберігання і використання складає 5 років [18].

При низьких негативних температурах (нижче -20⁰С) акумулятори незворотно втрачають ємність. Представляють небезпеку займання або вибуху при перезаряді або перегріванні, тому завжди забезпечуються облаштуванням захисту. Глибокий розряд призводить до повної непрацездатності.

2. Літій-марганцеві – LiMnO₂. Вони безпечніші, стійкіші до швидкого за-

ряду великими струмами і здатні віддавати струми до 5С. Використовуються в обладнанні, що споживає великий струм: потужні ліхтарі, керовані радіо-моделі.

За рахунок низького внутрішнього опору менше нагріваються при використанні, безпечніші. Обов'язкова наявність захисної електроніки в зарядному пристрої.

Термін служби і інші характеристики LiMnO_2 АКБ схожі з LiCoO_2 .

Преваги: здатність переносити великі струми заряду/розряду, безпека, великий термін служби (більше 500 циклів), зручні для зборки батарей з декількох елементів.

Недоліки: відносно низька ємність, ще більша чутливість до низьких температур (охолоджувати нижче -10°C не рекомендується).

LiMnO_2 використовується для електроінструментів, медичних інструментів, а також гібридних і електричних транспортних засобах.

3. Літій-залізофосфатні – LiFePO_4 . Вони за своїми властивостями схожі на LiMnO_2 . Відмінність в пониженій ємності, здатності працювати під ще більшими навантаженнями (струм до 10С), нижчій вартості комплектуючих. Так само поліпшені безпека і термін служби. Ці елементи зроблені таким чином, що навіть при критичних навантаженнях не відбувається утворення кисню, отже, не росте тиск усередині елемента. Термін служби може перевищувати 3000 циклів. Вони майже не чутливі до негативних температур.

Преваги: стійкість до низьких температур, безпека, довгий термін служби, непримхливість, здатність переносити великі струми заряду/розряду.

Основний недолік: мала ємність.

4. Літій-полімерні – Li-poly . Зазвичай це побутові акумулятори призначені для пристроїв з низьким енергоспоживанням, але існують промислові моделі і моделі здатні віддавати струм до 45С. Інші характеристики схожі із звичайними LiCoO_2 моделями. Термін служби 300-500 циклів, чутливі до низьких температур, старіють, вибухонебезпечні при перевантаженнях, часто мають вбудовану електроніку захисту.

Преваги: вони існують різних форм і розмірів Деякі модифікації здатні

віддавати дуже великий струм. Мала вага, велика щільність запасеної енергії, відсутність «ефекту пам'яті», низький саморозряд.

Недоліки: втрата ємності при низьких температурах, вибухонебезпека при перезаряді/перевищенні допустимого навантаження, схильні до старіння.

5. Літій-титанатні – LT. Вони мають площу поверхні аноду близько $100 \text{ м}^2/\text{г}$, в порівнянні з $3 \text{ м}^2/\text{г}$ для вуглецю, що забезпечує швидку перезарядку і високі струми при необхідності, і щільність енергії до 177 Вт/л [18].

Недоліком літій-титанатних АКБ є те, що вони мають нижчу внутрішню напругу ($2,4 \text{ В}$), що призводить до нижчої питомої енергії ($\approx 30 \dots 110 \text{ Вт/кг}$), чим звичайні літій-іонні батареї (які мають власну напругу $3,7 \text{ В}$) [18].

Переваги у літій-титанатних АКБ є значними, і вони включають ряд економічних і екологічних аспектів, які важливі для майбутнього, обумовленого поновлюваними джерелами зеленої енергії. LT мають життєвий цикл до $20\,000$ в порівнянні з $2\,000$ циклів у стандартних літійєвих батареях.

Крім того, LT мають найвище співвідношення енергії і ваги, яке зараз доступне, створюючи можливості їх застосування для електромобілів.

2.3.2.5 Суперконденсатор (іоністор, ультраконденсатор). Це електричний компонентом, що може утримувати в сотні раз більше електричного заряду, ніж стандартний конденсатор. Ця характеристика робить СК корисними в пристроях, які вимагають відносно невеликого струму і низької напруги. У деяких ситуаціях СК може замінити низьковольтну електрохімічну АКБ.

СК здатні працювати при температурах від -40°C до $+60^\circ\text{C}$.

Основним недоліком СК, в порівнянні із старими конструкціями конденсаторів, є те, що СК не витримують високої напруги. Щоб використати СК при більш високій напрузі, декілька компонентів мають бути з'єднані послідовно – їх номінали напруги складаються, так само, як напруга батареї додається при послідовному з'єднанні. Проте, коли декілька конденсаторів будь-якого типу з'єднані послідовно, потрібні спеціальні запобіжні заходи для вирівнювання напруги по окремих компонентах.

До переваг СК відноситься: висока швидкість заряду-розряду, стійкість

до сотень тисяч циклів перезаряду в порівнянні з акумуляторами, мала вага в порівнянні з електролітичними конденсаторами, низький рівень токсичності, допустимість розряду до нуля.

Використання СК, як правило, здійснюється в умовах, що вимагають багато швидких циклів зарядки/розрядки, а не в довгостроковому компактному зберіганні енергії: в автомобілях, автобусах, потягах, кранах і ліфтах, для рекуперативного гальмування, короткочасного накопичення енергії або подання живлення в імпульсних режимах. Також вони використовуються як резервна копія пам'яті для статичної пам'яті з довільним доступом (SRAM).

Варто відмітити, що СК розділяються на [17]: двошарові конденсатори для резервного копіювання пам'яті (ДУК); СК для силових застосувань (СУК); псевдо- і гібридні конденсатори (літій-іонні конденсатори) (ГУК).

2.3.2 Аналіз накопичувачів енергії різних типів

Перед проведенням порівняльного аналізу необхідно звернути увагу на світових виробників електрокарів з точки зору використання ними акумуляторних батарей. З таблиці 2.3 видно, що передові позиції займають Li-ion та NiMH акумулятори [18]. Але майже не використовують суперконденсатори і літій-титонатні акумулятори. Щоб зрозуміти цю тенденцію треба подивитися на характеристики АКБ, представлені в таблиці 2.4 [18].

Проведений аналіз накопичувачів енергії дозволив звести основні технічні характеристики, на які необхідно орієнтуватися при виборі накопичувача енергії у таблиці 2.4 [18].

Для визначення найбільш прийняттого типу накопичувача енергії як тягового джерела енергії були вибрані такі характеристики:

- компактність – порівняльна характеристика, що визначає ваго-габаритні властивості;
- швидкий процес заряду – можливість батареї заряджатися максимальними для неї струмами;
- простота утилізації – складнощі технологічного процесу, пов'язані з

утилізацією або неможливістю відновлення корисних хімічних елементів;

– ефект пам'яті – оборотна втрата ємності, що має місце в деяких типах електричних акумуляторів при порушенні рекомендованого режиму заряду, зокрема, при заряджанні акумулятора, що не повністю розрядився;

– допустимий перезаряд – кількісне свідчення, що визначає допустиме значення при заряді акумулятора понад 100%;

– глибина розряду (DOD) – реальна кількість (від заявленої) енергії, яку АКБ може віддати без збільшення температури.

Таблиця 2.3 – Батареї, що використовуються в електромобілях обраних автовиробників

Виробник	Країна	Модель авто	Тип АКБ
GM	США	Chevy-Volt; Chevy-Bolt	Li-ion
		Saturn Vue Hybrid	NiMH
Ford	США	Escape, Fusion, MKZ HEV, Focus Electric	NiMH Li-ion
		Escape PHEV	Li-ion
Honda	Японія	Civic, Insight	NiMH
Hyundai	Південна Корея	Sonata, IONIQ Electric	Li-ion (Li-pol)
Chrysler	США	Chrysler 200C EV	Li-ion
BMW	Німеччина	X6	NiMH
		Mini E (2012), i3; i8	Li-ion
BYD	Китай	E6	Li-ion
Daimler Benz	Німеччина	ML450, S400	NiMH
		Smart EV (2010), Mercedes B-Class Electric Drive	Li-ion
Mitsubishi	Японія	iMiEV (2010)	Li-ion
Nissan	Японія	Altima	NiMH
		Leaf EV (2010), e-NV200	Li-ion
Tesla	США	Roadster (2009), Model S (2012), Model X (2015)	Li-ion
Think	Норвегія	Think EV	Li-ion, Sodium / Metal Chloride
Toyota	Японія	Prius, Lexus	NiMH
KIA	Південна Корея	Soul EV	Li-ion (Li-pol)
Volkswagen	Німеччина	e-Golf	Li-ion
Renault	Франція	Zoe, Kangoo, Fluence ZE, Twizy	Li-ion
Citroen	Франція	Berlingo Electric (Electrique)	Li-ion

Таблиця 2.4 – Порівняння характеристик АКБ та СК різних типів

Параметр\тип АКБ	Pb-acid	NiCd	NiMH	Літій-іонні акумулятори					СК		
				LiCoO ₂	LiMnO ₂	LiFePO ₄	Li-pol	LT	ДУК	СУК	ГУК
Номінальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,6	3,8	3,3	3,6	2,4	1,2-3,3	2,2-3,3	2,2-3,8
Питома енергоємність, Вт·год/кг	20-40	40-60	30-80	150-190	100-135	90-120		30-110	1,5-3,9	4-9	10-15
Питома потужність, Вт/кг	100-300	150	250-1000	800-3000			800-900	3000-7000	2·10 ³ -10·10 ³	3·10 ³ -10·10 ³	3·10 ³ -14·10 ³
Середній час заряду, годин	більше 10	8	6	2-4	≤1		2	0,1-0,17	секунди-хвилини		
Кількість циклів розряду/заряду (термін служби)	500-800	2000	800	500-1000	500-1000	1000-3000	300-500	20000	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁵ -10 ⁶	2·10 ⁴ -10 ⁵
Середній саморозряд за місяць, %	4	10	30	менше ніж 10			5%				
Середня вартість за кВт·год, \$	50-120	400-800	250	400-670				1000-2000	100		
Компактність	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Швидкий процес заряду	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Простота утилізації	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Термін зберігання більше 3 років	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+
Ефект пам'яті	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Допустимий перезаряд	високий	середній	низький	низький							
Глибина розряду (DOD)	50%	50-80%	50-85%	80%				85%	100%		
Обслуговування	передбачене			не передбачене							

Проведений аналіз зарядних характеристик з кількісним і якісним порівнянням показників накопичувачів енергії різних видів показав, що для використання у якості тягових джерел енергії більше усього підходять: Li-pol акумулятори, LT акумулятори і СК.

Усі вони мають:

- високі показники питомих характеристик;
- високі значення допустимих зарядних і розрядних струмів;
- можливість швидкого заряду;
- відсутність необхідності обслуговування; максимальний термін служби; низькі свідчення саморозряду;
- відсутність «ефекту пам'яті».

Кожен з трьох вище зазначених типів накопичувачів енергії має свої особисті недоліки і переваги, а тому вибір конкретного типу в подальшому буде залежати від умов експлуатації і інших факторів.

Тож перед вибором накопичувача енергії як тягового джерела струму необхідно відповісти на такі питання:

- для якого споживача з фінансової точки зору розробляється електромобіль, бо між вартістю зазначених АКБ є великі розбіжності, а вартість джерела струму становить майже половину вартості всього авто;
- для яких цілей буде використовуватися електрокар (поїздки на невеликій відстані у міському режимі експлуатації чи міжміські);
- для роботи в яких кліматичних умовах (максимальні і мінімальні температури);
- використання для особистих потреб чи для комерційних перевозок (окупність) тощо.

Тільки після отримання відповідей на ці питання можна буде чітко визначити який тип накопичувача енергії необхідно використовувати.

Для міського громадського транспорту (електробусів, тролейбусів з автономним ходом) у якості тягового накопичувача енергії краще всього використовувати суперконденсатори, бо вони здатні без шкоди для себе миттєво сприймати дуже великі струми, що робить їх незамінними, наприклад, при різкому уповільненні транспортного засобу. До того ж СК можуть дуже швидко заряджатися (наприклад, під час посадки/висадки пасажирів) і мають найбільший термін служби (кількість зарядів/розрядів при правильній експлуатації може досягати мільйона). Але треба відмітити і те, що для безперебійної

і надійної роботи такого виду транспорту необхідно налаштувати інфраструктуру – встановити на зупинках зарядні станції, що потребує додаткових матеріальних вкладень.

Якщо мова йде про розробку малолітражного електромобіля для громадянина, то, для зменшення вартості, як АКБ більше підходять літій-іонні акумулятори. Серед них особливо виділяється своїми перевагами літій-титанатний акумулятор. До цих переваг відноситься: час заряду – 10...15 хв; кількість циклів розряду/заряду досягає 20000, що в 10 разів більше ніж звичайні АКБ; він безпечний в експлуатації; добре переносить низькі температури. Але на сьогодні LT акумулятор має серйозний недолік – це його вартість, що більша в 2...2,5 рази за інші Li-ion акумулятори.

Варто відмітити, з кожним роком ціна АКБ неупинно зменшується. Передбачається, що їх майбутнє здешевлення може відбуватися навіть швидше, ніж це прогнозується сьогодні, а це відкриває нові можливості для розвитку і популяризації електромобілів в світі [18].

Варто відмітити, що після вибору типу АКБ необхідно провести аналіз чинників, які впливають на її ресурс, щоб в подальшому мати змогу вибрати оптимальний режим експлуатації джерела струму.

Відомо, що одним з таких чинників є саморозряд, бо усі основні накопичувачі енергії схильні до саморозряду. Цьому сприяють і витрати енергії на системи захисту АКБ від перезарядки. Окрім цього на процеси саморозряду впливають такі механізми: розкладання електроліту на електроді; спонтанне впровадження літію в об'єм позитивного електроду; розчинення матеріалу електроду [18].

Крім того на ресурс АКБ впливають: процеси деградації в Li-ion; глибина розряду; зарядні-розрядні струми; температура тощо.

У подальших роботах планується проведення детальшого аналізу всіх вище зазначених чинників з метою винайдення способів зменшення їх впливу на життєвий цикл АКБ.

Проведений огляд і аналіз сучасних накопичувачів ЕЕ показав, що при

виборі тягової АКБ для електромобіля треба визначити пріоритетність характеристик за якими буде здійснюватися вибір. Вибір АКБ залежить від майбутніх умов експлуатації електромобілю і його кінцевої вартості.

Для міського громадського транспорту (електробусів, тролейбусів з автономним ходом) як тягового накопичувача енергії краще всього використовувати СК.

Для малолітражного міського електромобілю як тягової АКБ більше підходять літій-іонні акумулятори. Серед них особливо виділяється своїми перевагами літій-титанатний акумулятор.

2.3.3 Електрична модель суперконденсатора

Суперконденсатори – це компоненти для накопичення енергії. Їх використовують в електричних або гібридних транспортних засобах [115]. Отже, дуже важливо визначити та зрозуміти характеристики СК, особливо в реакціях напруги та енергії під час заряду та розряду.

СК є високоенергетичною версією звичайного конденсатора, що містить у сотні разів більше енергії на одиницю об'єму або маси, це електрохімічний пристрій, що складається з двох пористих електродів, занурених у розчин електроліту. Ємність СК визначається так само, як і в звичайному конденсаторі. Звичайний конденсатор отримує свою площу від пластин плоского, електропровідного матеріалу, тоді як суперконденсатор отримує свою площу від пористого вуглецевого електродного матеріалу. Пориста структура дає дуже високу ефективну площу поверхні в порівнянні зі звичайною пластинчастою структурою. Це також забезпечує мінімальну відстань між «пластинами». Ці два фактори призводять до дуже високої ємності порівняно зі звичайними електролітичними конденсаторами. У СК ємності на одиницю об'єму у 100-1000 разів більше порівняно зі звичайним електролітичним конденсатором [116].

Суперконденсатор може бути представлений еквівалентною схемою [117], що використовується для звичайних конденсаторів, рис. 2.14.

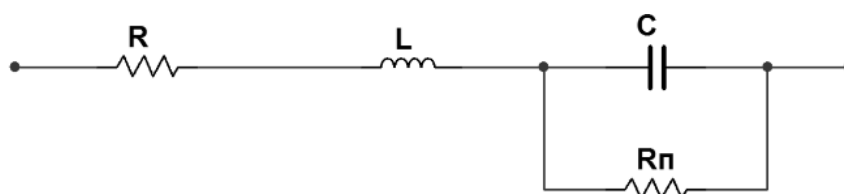


Рисунок 2.14 – Еквівалентна схема (модель першого порядку) суперконденсатора

Існує чотири ідеальні елементи схеми (рис. 2.14), а саме: ємність C , послідовний резистор R , паралельний резистор R_n і послідовна індуктивність L . Під час зарядки та розрядки послідовний резистор, який також називають еквівалентним послідовним резистором (ЕПР) сприяє втраті енергії. Опір струму витoku, який є паралельним опором R_n , також спричиняє витрати енергії через саморозряд конденсатора. У реальності у конденсаторі опір R_n завжди набагато вищий за R , тому опором R_n можна нехтувати, особливо у потужних пристроях.

Комірка СК може бути змодельована за допомогою деяких стандартних компонентів кола, як показано на рис 2.15. Елементарна структура СК заснована на технології двошарового конденсатора і складається з двох електродів на основі активованого пористого вуглецю [127].

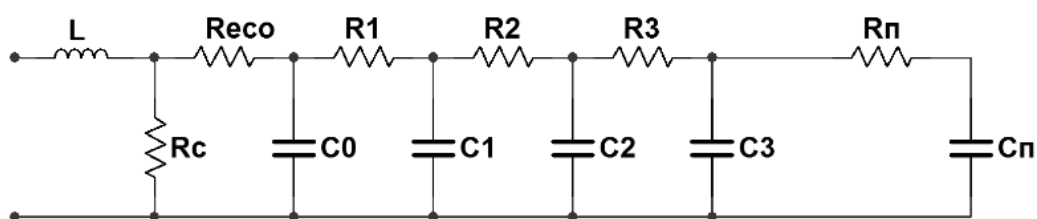


Рисунок 2.15 – Еквівалентна схема суперконденсатора

Пориста структура цього матеріалу дозволяє наближати його площу до 2000 м^2 на грам. Виміряна ємність активованого вугілля показує нелінійну залежність від площі їх поверхні, що зумовлено, насамперед, пористим матеріалом, що використовується для формування електродів, які спричиняють розподіл опору та ємності, електричні характеристики яких еквівалентна

схемі, показаній на рис. 2.15, яка є більш точною ілюстрацією еквівалентної схеми СК [118]. Отже, теоретичну модель СК можна розглядати як лінію передачі з розподіленою ємністю, що залежить від напруги.

Однак в цьому дослідженні запропоновано спрощену еквівалентну схему СК (рис. 2.16), де нехтують іншими гілками RC-кола. Класичну модель еквівалентної схеми, представлено на рис. 2.16. Це є найпростіша з моделей суперконденсаторів, яка може адекватно описати роботу конденсаторів у пристроях з повільним розрядом (порядку декількох секунд). Ця схема моделі використовується для опису СК.

Загальна ємність СК залежить від напруги СК, значення якої можна виразити як через постійний, так і змінний конденсатор, що лінійно змінюється залежно від напруги комірки (U_c). Отже, еквівалентну ємність можна виразити як $C_k = C_0 + k \cdot U_c$.

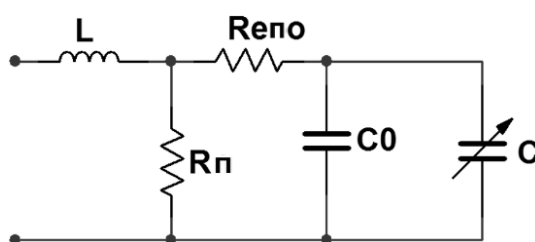


Рисунок 2.16 – Спрощена еквівалентна схема суперконденсатора

На рис. 2.16 прийняті такі позначення:

R_{epo} – еквівалентний послідовний опір, який спричиняє втрату енергії під час заряду та розряду СК;

R_{n} – еквівалентний паралельний опір, який імітує втрати енергії за рахунок саморозряду СК. Опір резистора R_{n} завжди вище, ніж R_{epo} , і ним можна знехтувати під час швидкого заряду/розряду;

L – індуктивність, що виникає, головним чином, від фізичної побудови СК, і, як правило, дуже мала.

Суперконденсаторний модуль, використаний у цьому дослідженні, складається з 14 СК, з'єднаних послідовно. Кожен СК має робочу напругу

45 В, тому загальна напруга становить 630 В. Загальна спрощена запропонована електрична модель суперконденсатора, нехтуючи паралельним опором та індуктивністю, представлена на рис. 2.17.

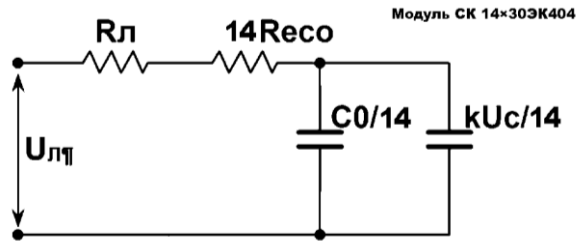


Рисунок 2.17 – Спрощена електрична модель СК 14×30ЭК404

Загальна ємність 14 послідовних СК знаходиться з виразів (2.9) і (2.10):

$$C_{\text{заг.}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_{14}}}; \quad (2.9)$$

$$C_{\text{заг.}} = \frac{C}{14} = \frac{C_0 + kU_c}{14} \quad (2.10)$$

Повний еквівалентний послідовний опір знаходиться з виразу:

$$R_{\text{ЕСО}} = 14 \cdot R_{\text{есo}} \quad (2.11)$$

У відповідності до закону Кірхгофа, повна напруга в замкненому контурі дорівнює нулю. Таким чином, застосовуючи цей закон до схеми на рис. 2.17, отримаємо рівняння заряду суперконденсатора:

$$(R_{\text{л}} + R_{\text{ЕСО}})i + \frac{1}{C_{\text{заг.}}} \int idt = U_{\text{заг.}}. \quad (2.12)$$

Виразимо рівняння (4) в диференційному вигляді з точки зору заряду q :

$$(R_{\text{л}} + R_{\text{ЕСО}}) \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C_{\text{заг.}}} q = U_{\text{заг.}},$$

де $q = CU$ – заряд.

Таким чином, це рівняння можна виразити в термінах напруги СК U_c :

$$(R_{\text{л}} + R_{\text{ЕСО}})(C_0 + 2kU_c) \frac{du(t)}{dt} + u(t) = U_{\text{зар.}}$$

або

$$\frac{du(t)}{dt} = \frac{U_{\text{зар.}} - u(t)}{(R_{\text{л}} + R_{\text{ЕСО}})(C_0 + 2kU_c)}. \quad (2.13)$$

Рівняння для напруги на внутрішньому опорі (де $U_{\text{к}}$ – напруга на клеммах СК) має вид:

$$R_{\text{ЕСО}}i(t) - \frac{1}{C_{\text{зар.}}} \int i(t)dt = U_{\text{к}}. \quad (2.14)$$

У момент перемикання, тобто коли $t = 0^+$, маємо:

$$R_{\text{ЕСО}}i(0^+) - \frac{1}{C_{\text{зар.}}} \int i(t)dt = U_0.$$

Помноживши праву у ліву частину цього виразу на $C_{\text{зар.}}$ і взявши похідну отримаємо:

$$C_{\text{зар.}} \cdot R_{\text{ЕСО}} \frac{di(t)}{dt} - i(t) = 0$$

Помноживши праву і ліву частину на $R_{\text{ЕСО}}$, враховуючи, що $u_r(t) = R \cdot i(t)$, отримаємо наступний вираз:

$$R_{\text{ЕСО}} \cdot C_{\text{зар.}} \frac{du_r(t)}{dt} - u_r(t) = 0. \quad (2.15)$$

Далі отримаємо рішення рівняння (2.15):

$$u_r(t) = ke^{\frac{1}{R_{\text{ECO}} \cdot C_{\text{зар.}}} t} \quad (2.16)$$

Отже, напруга на клеммах суперконденсатора буде дорівнювати:

$$u_{\text{к}}(t) = u_r(t) + u(t). \quad (2.17)$$

Для розряду суперконденсатора отримаємо рівняння:

$$\frac{du}{dt} = \frac{-u}{(R_{\text{л}} + R_{\text{ECO}})(C_0 + 2ku)}. \quad (2.18)$$

Кінцева напруга на суперконденсаторі при розряді становить:

$$u_{\text{к}}(t) = u(t) - u_r(t). \quad (2.19)$$

Як було зазначено, одним з основних параметрів СК є величина його послідовного опору, яким обумовлені всі внутрішні втрати. Багатьом виробникам вдалося зменшити значення цього опору, але все-таки воно знижує енергоефективність і призводить до зменшення доступної потужності. Енергоефективність суперконденсатора слід особливо враховувати при виборі для використання як накопичувача енергії для електробуса. Також продуктивність СК залежить від того як вони заряджаються або розряджаються [119]. Тому на стадії вибору параметрів СК дуже важливо оцінити їх енергоефективність на різному рівні робочих напруг. Це буде основою для розробки силової електроніки, яка контролюватиме струм і напругу для навантаження та розвантаження, що оптимізує продуктивність СК.

На енергоефективність впливають значення внутрішнього опору R та ємності C . Взаємозв'язок між ефективністю та часом розрядки СК встановлено за результатами експериментів [120].

$$\eta_{\text{еф.}} = e^{\left(\frac{2R_{\text{ЕСО}} \cdot C_{\text{зар.}}}{t_{\text{розр.}}} \right)} \quad (2.20)$$

Час розряду може бути вираженням у співвідношенні напруги розряду, яка може бути отримана з еквівалентної схеми СК, підключеного до навантаження, як показано на рис. 2.18.

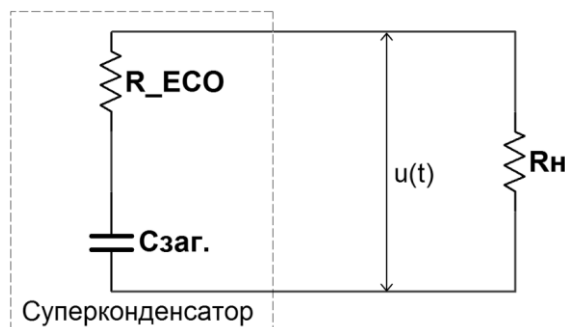


Рис. 2.18 – Еквівалентна схема розряду суперконденсатора

Напруга $u(t)$ може бути визначена з рівняння паралельної схеми RC з урахуванням початкової умови, що $u(0) = U_0$, [121], $u_c(t)$ вищевказаного контуру можна обчислити і виразити у виді:

$$u_c(t) = U_0 e^{-t/R_{\text{зар.}} \cdot C_{\text{зар.}}}; \quad (2.21)$$

$$u(t) = u_c(t) + u_{R_{\text{ЕПО}}}(t);$$

$$u(t) = U_0 \left(1 + \frac{R_{\text{ЕПО}}}{R_{\text{зар.}}} \right) e^{(-t/R_{\text{зар.}} \cdot C_{\text{зар.}})} \quad (2.22)$$

Коефіцієнт напруги розряду може бути виражений виразом:

$$d = \frac{u(t)}{U_0} = \left(1 + \frac{R_{\text{ЕПО}}}{R_{\text{заг.}}}\right) e^{-t/R_{\text{заг.}}} \cdot C_{\text{заг.}} \quad (2.23)$$

З рівняння (2.23) отримаємо рішення для часу розряду:

$$t_{\text{розр.}} = -(R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}}) C_{\text{заг.}} \ln \left[\frac{(R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}}) d}{2R_{\text{ЕПО}} + R_{\text{н}}} \right], \quad (2.24)$$

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

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

2.4 Критерії оптимальності вибору електродвигуна для тягового електропривода міського електробуса

Електродвигун є основним елементом електропривода [5]. У деяких режимах роботи електропривода електродвигун здійснює зворотне перетворення енергії, тобто працює в режимі електричного генератора.

По виду механічного руху ЕД існують обертові, лінійні, крокові та інші. Залежно від використовуваного електричного струму ЕД діляться на дві групи: постійного струму і змінного струму.

Електродвигуни постійного струму на цей час застосовуються не так масово, як, наприклад у ХХ столітті. Їх практично витіснили двигуни змінного струму.

Головний недолік електродвигунів постійного струму – можливість експлуатації виключно за наявності джерела постійного струму або перетворювача змінної напруги в постійний струм. У сучасному промисловому виробництві забезпечення цієї умови вимагає додаткових фінансових витрат. Проте, при істотних недоліках цей тип двигунів відрізняється високим пус-

ковим моментом і стабільною роботою в умовах великих перевантажень. Приводи даного типу найчастіше застосовуються в металургії і верстатобудуванні, встановлюються на електротранспорт (особливо на першому етапі електромобілебудування [5, 6, 50]).

ЕД змінного струму поділяються на синхронні і асинхронні. У кожній підгрупі є свої конструктивні і експлуатаційні особливості.

Синхронні двигуни (СД) – це оптимальне рішення для обладнання з постійною швидкістю роботи: генераторів постійного струму, компресорів, насосів тощо.

Технічні характеристики СД різних моделей відрізняються. Швидкість обертання змінюється в діапазоні від 125 до 1000 об/хв, потужність може досягати десятків мегават.

У конструкції приводів передбачена короткозамкнена обмотка на роторі. Її наявність дозволяє здійснювати асинхронний пуск ЕД. До переваг обладнання даного типу відносяться високий ККД і невеликі габарити. Експлуатація СД дозволяє скоротити втрати потужності в мережі до мінімуму.

Також до СД можна віднести крокові двигуни. Кроковий двигун не є окремим класом двигуна. За своєю конструкцією він є СД з постійними магнітами (СДПМ) або синхронним реактивним двигуном (СРД) чи гібридним СРД (СРД-ПМ).

Асинхронні електродвигуни (АД) змінного струму набули найбільшого поширення в промисловому виробництві. Особливістю даних приводів є більш висока частота обертання магнітного поля в порівнянні зі швидкістю обертання ротора.

У сучасних двигунах для виготовлення обмоток ротора використовується алюміній. Легка вага цього матеріалу дозволяє зменшити масу електродвигуна, скоротити собівартість його виробництва. ККД асинхронного двигуна падає майже вдвічі при експлуатації в режимі низьких навантажень (до 30...50 % від номінального показника). Ще один недолік таких електроприводів полягає в тому, що параметри пускового струму в 5...7 разів перевищують робочі показники. Для зменшення пускового струму АД використовуються частотні перетворювачі або пристрої плавного пуску.

Отже перевагами асинхронних двигунів є:

- масо-габаритні показники;
- низька вартість виробництва;
- надійна і практична конструкція;
- проста схема управління;
- високий ККД;
- високий коефіцієнт потужності.

Асинхронні двигуни змінного струму мають такі недоліки:

- неможливе регулювання швидкості без втрат потужності;
- при збільшенні навантаження – зменшується швидкість обертання;
- відносно невеликий пусковий момент;
- великий пусковий струм.

Окремо слід виділити вентильні ЕД. Група вентильних ЕД включає в себе приводи, в яких регулювання режиму експлуатації здійснюється за допомогою вентильних перетворювачів. Вентильний двигун може бути визначений як електричний двигун, який має датчик положення ротора, що керує напівпровідниковим перетворювачем, через який подаються струми в обмотки двигуна.

Вентильний електродвигун постійного струму – це електродвигун постійного струму, в якому вентильним комутуючим пристроєм є інвертор. Останній керується або за положенням ротора, або за фазою напруги на обмотці якоря, або за положенням магнітного поля [122].

До переваг даного обладнання відносяться:

- високий експлуатаційний ресурс;
- простота обслуговування за рахунок безконтактного управління;
- висока перевантажувальна здатність (в п'ять разів перевищує пусковий момент);
- широкий діапазон регулювання частоти обертання, який майже вдвічі вище діапазону АД;
- високий ККД при будь-якому навантаженні (більше 90 %);
- невеликі габарити.

Приведену класифікацію ЕД можна звести до таблиці 2.5 [122].

В таблиці 2.5 наведені такі скорочення: КДПС – колекторний ЕД постійного струму; БДПС – безколекторний двигун постійного струму; ВРД – вентильний реактивний двигун; АДКР – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором; АДФР – асинхронний двигун з фазним ротором; СДОЗ – синхронний двигун з обмоткою збудження; СДПМ – синхронний двигун з постійними магнітами; СДПМП – синхронний двигун с поверхневої установкою постійних магнітів; СДВПМ – синхронний двигун із вбудованими постійними магнітами; СРД – синхронний реактивний двигун; ПМ – постійні магніти.

Таблиця 2.5 – Класифікація електродвигунів

Внутрішня комутація			Зовнішня комутація	
З механічною комутацією (колекторний)		З електронною комутацією (вентильний)	АД	СД
Змінного струму	Постійного струму	Змінного струму	Постійного струму	
- універсальний; - репульсивний	- КДПС з різними обмотками збудження; - КДПС з ПМ	- БДПС; - ВРД; - СРД з ротором з явними полюсами	- АДКР; - АДФР;	- СДОЗ; - СДПМ; - СДВПМ; СДПМП - гібридний - СРД; - СРД-ПМ; - СРД-ПМ реактивно-гістерезисний; - кроковий
проста електроніка	випрямлячі	більш складна електроніка	складна електроніка	

Аналізуючи характеристики рис. 2.18 та наведену класифікацію ЕД (таблиця 2.5) можна провести експертну оцінку тягових ЕД для електричної трансмісії автотранспортних засобів (таблиця 2.6). При проведенні експертної оцінки вважається: 1 – найкращій показник, 3 – найгірший показник.

Згідно з наведеними показниками, якщо враховувати тільки електромеханічні властивості ЕД, гібридний СД, а саме синхронний реактивний ЕД з вбудованими постійними магнітами, є найбільш придатним для застосування у якості тягового ЕД в електробусі.

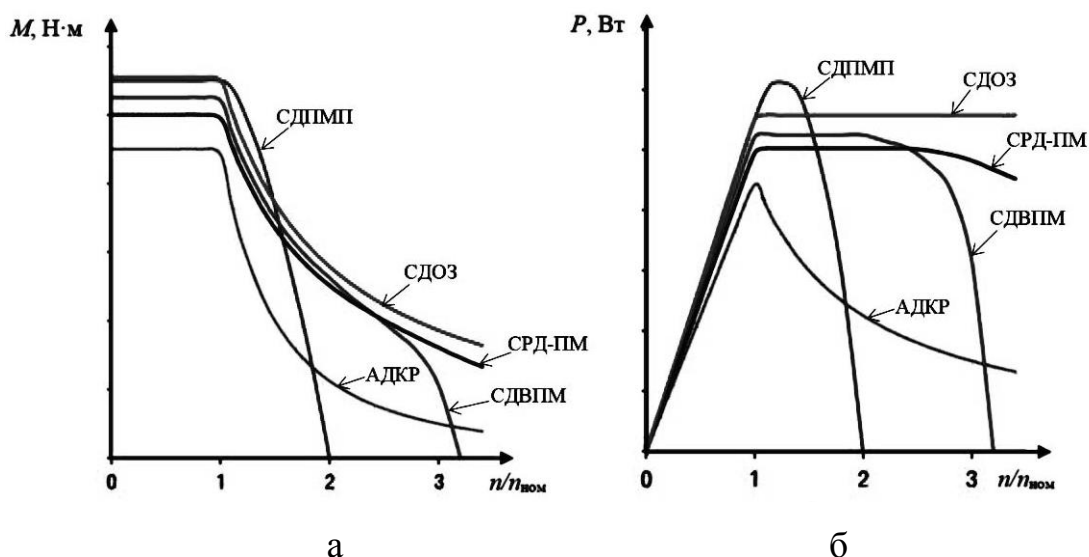


Рисунок 2.18 – Характеристики зовні комутованих електродвигунів: а – порівняння механічних характеристик електродвигунів різних типів при обмеженому струмі статора; б – залежність потужності від швидкості обертання валу для двигунів різних типів при обмеженому струмі статора

Таблиця 2.6 – Сукупність експертних оцінок

Параметр	АДКР	СДПМП	СДВПМ	СРД-ПМ (гібридний)	СДОЗ
Постійність потужності у всьому діапазоні швидкостей	2	3	2	1	1
Момент до току статора	2	1	1	1	1
Ефективність (ККД) в всьому робочому діапазоні	2	2	2	1	1
Питома потужність, кВт/год,	3	2	1	2	2
Надійність	1	2	3	3	2
Виробництво	1	3	3	3	3
Ціна	1	3	3	3	2
Разом	12	16	15	14	12

Використання реактивного моменту забезпечує високу потужність у верхньому діапазоні швидкостей. Більш того, такий ЕД забезпечує високу ефективність (ККД) в широкому робочому діапазоні [5, 123].

Але при проведенні комплексної оцінки з урахуванням не тільки електро-механічних показників, а й економічних, найбільш привабливим виявився АД з короткозамкненим ротором. В першу чергу найбільш вагомими показниками

тут є надійність та місцеве виробництво. Отже, маємо надійний силовий агрегат, який вже серійно виробляється на території України, має найменшу ціну (в декілька разів у порівнянні з закордонними аналогами [5]) і може бути використаний, як тяговий електродвигун для електричної трансмісії електробуса.

Далі проведемо розрахунок основних характеристик тягового АД для електричної трансмісії міського електробуса.

При проектуванні тягових ЕД використовують різні критерії оптимальності. Для тягового ЕД електробуса або гібридного автомобіля основним критерієм оптимальності можуть бути мінімальні втрати або максимальний ККД. Це пов'язано з тим, що збільшення ККД безпосередньо впливає на збільшення пробігу електробуса протягом одного циклу розряду акумуляторної батареї. При цьому відбувається найбільш повне використання енергії АКБ для корисної роботи. Досягненню цієї мети також служить здатність електродвигуна забезпечити рекуперативне гальмування і забезпечити мінімальний опір обертанню в знеструмленому стані [124]. Цим критеріям досить добре задовольняє АДКР.

Слід зазначити, що ККД у вентильних ЕД з ПМ трохи вище, ніж у АДКР, однак опір обертанню в знеструмленому стані у АДКР істотно менше. Електричне гальмування з рекуперацією енергії в АКБ найбільш просто і ефективно досягається в вентильних двигунах, а у асинхронних здійснення цього режиму вимагає більш складних алгоритмів управління.

Залежно від призначення електроприводу регулювання швидкості обертання і зміни навантаження АДКР виконується векторним або скалярним управлінням. У статичному (сталому) режимі роботи електроприводу обидва ці варіанти регулювання практично еквівалентні. Але векторне регулювання забезпечує оптимальний режим роботи електродвигуна не тільки в стаціонарних режимах, але і в перехідних (динамічних) режимах. Таким чином запобігає затягуванню переходу на новий оптимальний режим при різких змінах навантаження або кутової швидкості, і, крім того, захищаються силові електронні ключі від перенапруги і перевантажень за струмом [125–127]. У тяго-

вому електроприводі електробуса тривалість перехідних електромагнітних процесів, як правило, набагато менша, ніж тривалість перехідних процесів режиму руху ТЗ. Це дозволяє в більшості випадків розглядати тяговий електропривод як статичний об'єкт [155].

Тяговий АД з короткозамкненим ротором в ЕБ навіть при роботі в скалярному режимі контролера частоти-напруги поєднує в собі ряд переваг. А саме: він простий; має хороші пускові і регульовальні властивості двигуна постійного струму. Але тому що в АД при векторному регулюванні є можливість роздільного управління моментом і полем, це дозволяє гнучко адаптувати механічну характеристику під умови руху. Тому векторне управління більш перспективне саме в асинхронному тяговому ЕД [128].

Значення компонентів вектора напруги статора в нерухомій трифазній системі координат (фазних напруг) формуються за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Частота ШІМ вибирається виходячи з мінімуму втрат в феромагнітному матеріалі і силових електронних ключах. Алгоритм ШІМ (векторна ШІМ) в сучасних асинхронних керованих двигунах забезпечує максимальне використання напруги джерела постійного струму, що дозволяє зменшити фазні струми, а значить і теплові втрати в фазних обмотках. При векторній ШІМ, реалізація вектора фазної напруги здійснюється за допомогою базових векторів в трифазній системі координат [125–127].

Поряд з цим, важливими критеріями вибору ЕД є мінімальна вартість, мінімальна маса, мінімум провідникових і феромагнітних матеріалів. Цього можна досягти, підвищуючи робочі оберти ЕД. В електробусах робота ЕД, як правило, відбувається в широкому діапазоні обертів ЕД. Асинхронний ЕД має просту і міцну конструкцію ротора, що дозволяє розширити робочий діапазон в область високих обертів і, тим самим, оптимізувати ЕД за зазначеними критеріями. У зв'язку зі складними умовами експлуатації, з підвищенням обертів тягового ЕД ускладняється завдання забезпечення мінімальних вібрацій і шумів, тому у наступних розділах дисертаційної роботи питанню вібростійкості асинхронного ЕД приділено особливу увагу.

2.5 Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса

Розрахунок основних характеристик тягового АД для електричної трансмісії міського електробуса складається з зображення його природної механічної характеристики в режимі двигуна і генераторних режимах.

Вибираємо АД типу: АИР 225М2 (ІМ 1081) 55 кВт, 3000 об/хв. Для вибраного за класом та призначенням автобуса (клас – малий; призначення – міський) у відповідності до досвіду побудови вже існуючих конструкцій електробусів достатньо застосувати два вибраних ЕД (по одному на кожен колісний вісь) [129]. Технічні характеристики даного ЕД приведені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні технічні характеристики АИР 225М2 (ІМ 1081)

Параметр	Показник
Потужність, P	55 кВт
Частота обертання ротора, n	314,2 рад·с ⁻¹
Напруга мережі, U	380 В
Номінальний струм, I	103 А
Частота мережі, f	50 Гц
Число полюсів, p	2
Ступінь захисту	IP55
Ізоляція класу нагрівостійкості	F(155°C)
Кліматичне виконання	У2
Режим роботи	S1 (тривалий)
Спосіб монтажу	ІМ 1081(лапа)
Маса	325·кг

Для розрахунку використовуються заводські технічні дані АД:
 $R_1 = 0,0549$ Ом; $R_2 = 0,0332$ Ом; $X_1 = 0,16$ Ом; $X_2 = 0,0704$ Ом.

Для проведення розрахунків використаємо П-подібну схему заміщення АД рис. 2.19 [5].

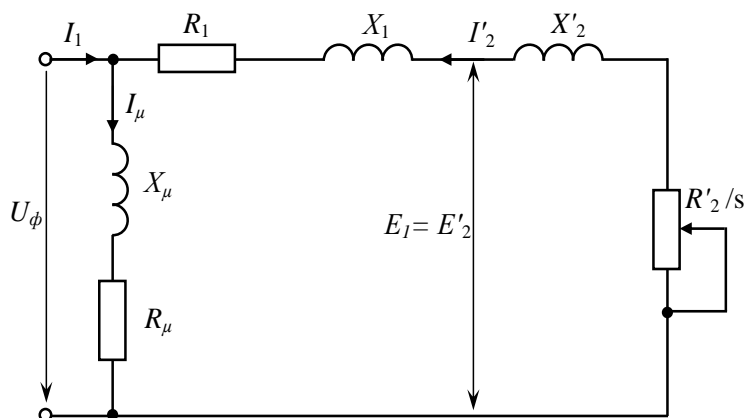


Рисунок 2.19 – Схема заміщення асинхронного двигуна

На рис. 2.19 прийняті такі позначення:

U_1, U_ϕ – діючі значення лінійної і фазної напруги мережі;

I_1, I_μ, I'_2 – фазні струми статора, намагнічування і приведений струм ротора;

X_1, X'_2 – індуктивні опори від потоків розсіювання фази обмотки статора і приведеної фази ротора;

X_μ – індуктивний опір контуру намагнічування;

R_μ – активний опір контуру намагнічування;

$R_c, R_{1д}, R_1 = R_c + R_{1д}$ – активні фазні опори обмотки статора, додаткового резистора і сумарний опір статора;

$R'_p, R'_{2д}, R'_2 = R'_p + R'_{2д}$ – активні приведені до обмотки статора фазні опори обмотки ротора, додаткового резистора і сумарний опір ротора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – ковзання АД;

$\omega_0 = 2\pi f / p$ – кутова швидкість магнітного поля АД (швидкість ідеального холостого ходу);

f_1 – частота напруги живлення;

p – число пар полюсів АД.

Відповідно до приведеної схеми заміщення можна отримати вираз для вторинного струму:

$$I'_2 = \frac{U_\phi}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.25)$$

Момент АД може бути визначений з рівняння втрат, звідки:

$$M = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{\omega_0 s}. \quad (2.26)$$

Підставляючи значення струму I'_2 з виразу (2.25) в вираз (2.26) :

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right] s}. \quad (2.27)$$

Крива моменту $M = f(s)$ має два максимуми: один – в генераторному режимі, інший – в режимі двигуна.

Визначаємо значення критичного ковзання $s_{кр}$, при якому двигун розвиває максимальний (критичний) момент:

$$s_{кр} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}. \quad (2.28)$$

Підставляючи значення $s_{кр}$ в рівняння (2.27), знаходимо вираз для максимального моменту:

$$M_{кр} = \frac{3U_\phi^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}. \quad (2.29)$$

Знак «+» в рівняннях (2.28) і (2.29) відноситься до режиму двигуна (або гальмуванню противмикання), знак «-» до генераторного режиму роботи паралельно з мережею (при $\omega > \omega_0$).

Якщо рівняння (2.27) розділити на вираз (2.29) і провести відповідні перетворення, то можна отримати таке рівняння:

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}(1 + as_{\text{кр}})}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s} + 2as_{\text{кр}}}, \quad (2.30)$$

де $M_{\text{кр}}$ – максимальний момент двигуна;

$s_{\text{кр}}$ – критичне ковзання, відповідне максимальному моменту;

$$a = R_1 / R'_2.$$

Отже, коефіцієнт трансформації від статора до ротора визначається в виді [5]:

$$k = \frac{E_1}{E_{2\kappa}} = \frac{0,95 \cdot U}{E_{2\kappa}}; \quad (2.31)$$

$$k = \frac{0,95 \cdot U}{E_{2\kappa}} = \frac{0,95 \cdot 380}{253} = 1,427.$$

Приведені опори визначаються таким чином:

$$\begin{cases} R'_2 = R_2 \cdot k^2; \\ X'_2 = X_2 \cdot k^2; \\ X_{\kappa} = X_1 + X'_2, \end{cases} \quad (2.32)$$

$$R'_2 = R_2 \cdot k^2 = 0,0332 \cdot 1,427^2 = 0,0676 \text{ Ом};$$

$$X'_2 = X_2 \cdot k^2 = 0,0704 \cdot 1,427^2 = 0,1433 \text{ Ом};$$

$$X_{\kappa} = X_1 + X'_2 = 0,704 + 0,1433 = 0,3033 \text{ Ом}.$$

Значення критичного ковзання знайдемо за формулою (2.28):

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \pm \frac{0,676}{\sqrt{0,0549^2 + (0,704 + 0,1433)^2}} = \pm 0,2193.$$

Кутова швидкість (рад/с) визначається виразом:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (2.33)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314.$$

Максимальний момент в режимі двигуна визначаємо за виразом (2.29), кН·м, в виді:

$$M_{\text{кр}} = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314 \left[0,0549 + \sqrt{0,0549^2 + (0,704 + 0,1433)^2} \right]} = 3,1833.$$

Максимальний момент в генераторному режимі визначаємо, кН·м:

$$M_{\text{кр}(\Gamma)} = M_{\text{кр}} \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}{R_1 - \sqrt{R_1^2 + X_{\kappa}^2}}, \quad (2.34)$$

$$M_{\text{кр}(\Gamma)} = 3,1833 \frac{0,0549 + \sqrt{0,0549^2 + 0,3033^2}}{0,0549 - \sqrt{0,0549^2 + 0,3033^2}} = -4,5628.$$

За виразом (2.30) розраховуємо механічну характеристику АД (залежність моменту від ковзання).

Результати розрахунків зведені в таблиці 2.8. За даними таблиці 2.8 побудована природна характеристика АД, рис. 2.20.

Залежність моменту навантаження для електричної трансмісії міського електробуса є досить складною та залежить від багатьох чинників, основні з яких описані в [5]. Загальний характер такої залежності при русі електробуса на його крейсерській швидкості визначає сила опору повітря.

Таблиця 2.8 – Результати розрахунків механічної характеристики АД

$M, \text{кН} \cdot \text{м}$	s	$M, \text{кН} \cdot \text{м}$	s
0,49851776	0,015	-1,41549329	-1,2
1,01968	0,032	-1,54348824	-1,1
1,55905	0,052	-1,69565731	-1
2,07057	0,075	-1,87902401	-0,9
2,49568	0,1	-2,10325831	-0,8
2,84531	0,13	-2,38166296	-0,7
3,1311	0,18	-2,73196	-0,6
3,18056	0,21	-3,1748	-0,5
3,16004	0,25	-3,72017	-0,4
2,99916	0,32	-4,1939	-0,32
2,74883	0,4	-4,5154	-0,25
2,4392	0,5	-4,557392	-0,21
2,16909	0,6	-4,4565	-0,18
1,94227	0,7	-3,8991	-0,13
1,75303	0,8	-3,2711	-0,1
1,59444	0,9	-2,5775	-0,075
1,46043	1	-1,8301	-0,052
1,34613	1,1	-1,129	-0,032
1,24773	1,2	-0,5233	-0,015
1,16228	1,3	0	0

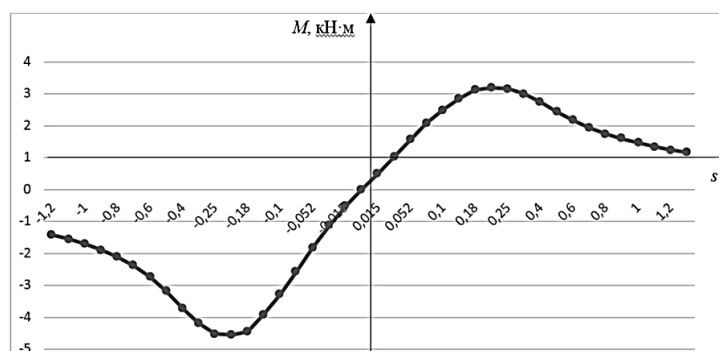


Рисунок 2.20 – Природна механічна характеристика АД, АИР 225М2

Отже, для приблизного визначення характеру механічної характеристики електричної трансмісії задаємося залежністю для моменту навантаження, як для механізмів, що працюють з вентиляторним навантаженням:

$$M = M_0 + \Delta M, \quad (2.35)$$

де M_0 – момент холостого ходу;

$\Delta M = c\omega^2$ – момент, який створює робочий орган механізму при виконанні корисної роботи (c – постійний коефіцієнт, ω – кутова швидкість валу механізму).

Метою даних розрахунків є визначення характеру механічної характеристики АД в складі електричної трансмісії електробуса. Отже, прийемо постійний коефіцієнт $c = 0,02$. Моменту холостого ходу відповідає розрахо-

вана природня механічна характеристика АД, рис. 2.20 [5].

Визначаємо кутову швидкість АД в залежності від ковзання s :

$$\omega = \omega_0 (1 - s). \quad (2.36)$$

Розрахунок кутової швидкості АД за виразом (2.36) приведено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Залежність кутової швидкості АД від ковзання

s	-1,2	-1,1	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,32	-0,25	-0,21	-0,18	-0,13	-0,1	-0,075	-0,052	-0,032	-0,015	0
ω , рад/с	-62,8	-31,4	0	31,4	62,8	94,2	125,6	157	188,4	213,52	235,5	248,06	257,48	273,18	282,6	290,45	297,672	303,952	309,29	314
s	0,015	0,032	0,052	0,075	0,1	0,13	0,18	0,21	0,25	0,32	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3
ω , рад/с	309,29	303,952	297,672	290,45	282,6	273,18	257,48	248,06	235,5	213,52	188,4	157	125,6	94,2	62,8	31,4	0	-31,4	-62,8	-94,2

За отриманими даними (табл. 2.8, табл. 2.9 і рис. 2.20) проведемо побудову механічної характеристики для електричної трансмісії міського електробуса в режимі двигуна і в генераторному режимі, рис. 2.21 [5].

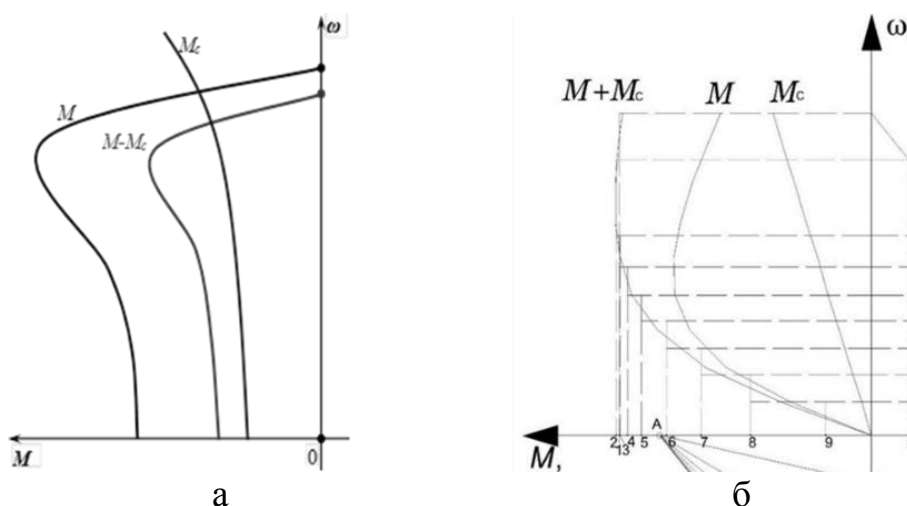


Рисунок 2.21 – Механічна характеристика АД, АИР 225М2 при роботі в електричній трансмісії міського електробуса: а – в режимі двигуна; б – в генераторному режимі

2.6 Автоматичне управління тяговим асинхронним двигуном

Експлуатаційні властивості електробуса безпосередньо залежать від управління його ЕД. На основі проведеного аналізу можна сформулювати основні вимоги, що пред'являються до автоматичної системи управління АСУ двигунами ЕБ:

– АСУ повинна забезпечувати відповідність поточної швидкості руху центру мас ЕБ і необхідної швидкості руху, що задається водієм за допомогою педалі акселератора;

– АСУ повинна забезпечувати напрямок руху, що задається водієм.

Перша вимога до АСУ означає, що в перехідному процесі відхилення поточної швидкості ЕБ $v(t)$ від бажаної $v_0(t)$, що задається водієм за допомогою педалі акселератора, повинно бути мінімальним. Ця вимога задовольняється, якщо АСУ доставляє мінімум інтегрального квадратичного функціоналу:

$$\begin{aligned} J_v &= \int_0^T \left[(v(t) - v_0(t))^2 + \Delta U_{\Pi}^2(t) + \Delta U_{\text{Л}}^2(t) \right] dt = \\ &= \int_0^T \left[\Delta U^2(t) + \Delta U_{\Pi}^2(t) + \Delta U_{\text{Л}}^2(t) \right] dt, \end{aligned} \quad (2.39)$$

де $\Delta U_{\Pi}(t), \Delta U_{\text{Л}}(t)$ – управляючі сигнали на входах інверторів по правому і лівому бортах ЕБ;

T – час регулювання.

При русі електробуса, внаслідок зазначених вище причин, виникає явище дивергенції, що складається у ввіді ЕБ від траєкторії руху, що задається водієм. Якщо електробус здійснює рівномірний поворот рис. 2.22, то його поточна траєкторія руху 1 відрізняється від необхідної траєкторії 2, що являє при рівномірному повороті дугу кола радіусом R_0 . Міра відхилення дійсного руху від необхідного руху може бути оцінена значенням інтеграла:

$$\int_0^T \left[\Delta\psi^2(t) + \Delta x^2(t) + \Delta y^2(t) \right] dt, \quad (2.40)$$

$$\Delta\psi(t) = \psi(t) - \psi_0(t);$$

$$\Delta x(t) = x(t) - x_0(t);$$

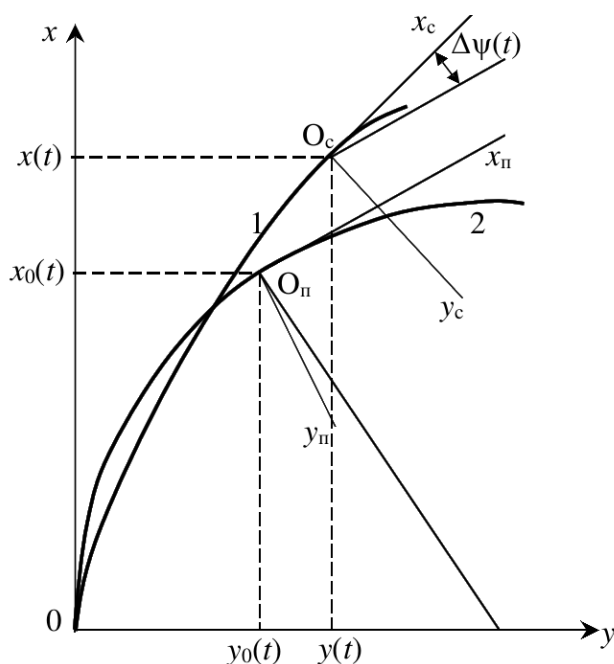
$$\Delta y(t) = y(t) - y_0(t),$$

де $\Delta\psi(t)$, $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$ – відхилення поточних значень кута повороту ЕБ $\psi(t)$ і координат центру мас в нерухомій системі x, y від необхідних законів їх зміни $\psi_0(t)$, $x_0(t)$, $y_0(t)$, які при рівномірному повороті ЕБ записуються у вигляді:

$$\psi_0(t) = \frac{v_0}{R_0} t; \quad (2.41)$$

$$x_0(t) = R_0 \cdot \sin \frac{v_0}{R_0} t; \quad (2.42)$$

$$y_0(t) = -R_0 \cdot \left[1 - \cos \frac{v_0}{R_0} t \right]. \quad (2.43)$$



1 – поточна траєкторія; 2 – необхідна траєкторія руху

Рисунок 2.22 – Відхилення дійсного руху електробуса від необхідного

Відхилення поточної траєкторії руху ЕБ від необхідної траєкторії буде мінімальним, якщо АСУ доставляє мінімум інтегрального квадратичному функціоналу:

$$J(\psi) = \int_0^T \left[\Delta\psi^2(t) + \Delta x^2(t) + \Delta y^2(t) + \Delta U_{II}^2(t) + \Delta U_{II}^2(t) \right] dt. \quad (2.44)$$

Проблема стабілізації рухомих об'єктів виникла з появою перших робіт з теорії автоматичного керування, обумовлених появою парових машин в першій половині ХІХ сторіччя. Вдосконалення систем автоматичних об'єктів викликало появу сучасної теорії керування, заснованої на використанні метода простору станів. Методи сучасної теорії керування являються ефективним засобом аналізу і синтезу систем стабілізації складних технічних об'єктів у порівнянні з класичною теорією автоматичного керування. Більш детально питання параметричного синтезу систем стабілізації електробуса під час руху представлені в Додатку А.

Метод розрахунку основних параметрів АД для автоматичного управління.

Найважливішою характеристикою АД є механічна характеристика. Усі характерні точки та ділянки цієї характеристика мають конкретний фізичний зміст, що дозволяє використовувати АД як елемент автоматичних систем управління [122]. Необхідно вірно та точно розраховувати механічні характеристики як для серій АО і 4А, так і особливо для АД серії АИ, оскільки їх механічні характеристики в області закритичних ковзань мають інший характер, оскільки в них є ярко виражений мінімальний момент.

Аналіз АД як об'єкту автоматичного управління розглядався деякими авторами, але не з точки зору розрахунку та порівняння способів визначення критичного ковзання, як однієї з основних характеристик АД.

Для регулювання швидкості, АД потребують спеціальних безконтактних регуляторів, в першу чергу – тиристорних.

Найбільше поширення мають дешеві у виробництві й надійні в експлуатації двигуни з короткозамкненою обмоткою (короткозамкнені двигуни). Ці двигуни мають жорстку механічну характеристику, тобто при зміні навантаження від холостого ходу до номінального їхня частота обертання зменшується всього на 2...5%. Двигуни з короткозамкненою обмоткою на роторі також мають досить високі початкові пускові обертові моменти.

Їхні основні недоліки:

- труднощі здійснень плавного регулювання частоти обертання в широких межах;
- споживання більших струмів з мережі при пуску (в 5...7 разів перевищуючий номінальний струм).

Двигуни з фазною обмоткою на роторі (або двигуни з контактними кільцями) позбавлені цих недоліків ціною ускладнення конструкції ротора, що приводить до їхнього помітного подорожчання в порівнянні з короткозамкненими двигунами (приблизно в 1,5 рази). Тому ці двигуни знаходять застосування лише при важких умовах пуску, а також при необхідності плавного регулювання частоти обертання.

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

При необхідності використання АД в системах автоматичного управління (САУ) практично завжди необхідно вирішити декілька питань:

- проаналізувати і за потреби доопрацювати методику побудови механічної характеристики;
- уточнити методику визначення опорів R_1 та R'_2 , необхідних для розрахунків критичного ковзання;
- необхідно мати методику розрахунку динамічного коефіцієнта АД з урахуванням впливу параметрів робочої машини;
- мати просту методику визначення сталої часу обмотки статора АД з обліком впливу його ротора;

- вміти проаналізувати формули для визначення критичного ковзання та дати рекомендації щодо підвищення точності його визначення;
- вміти визначати передаточну функцію АД.

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

$$n = n_1 - \frac{n_1 \omega_1 R_2}{3pU_1^2} \cdot M . \quad (2.45)$$

Зовнішній вид механічної характеристики приведений на рис. 2.23. Звичай для зображення механічної характеристики розраховують три основні точки: точку холостого ходу, точку номінального режиму та точку критичного режиму.

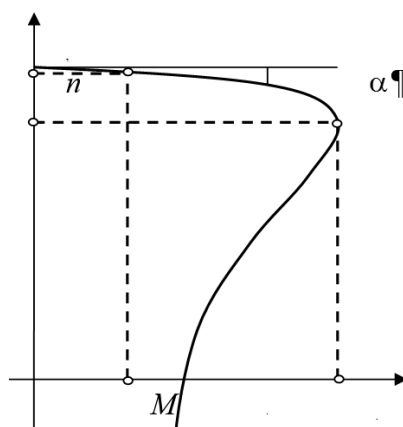


Рисунок 2.23 – Механічна характеристика АД

Усі характерні точки та ділянки цієї характеристика мають конкретний фізичний зміст, що дозволяє легко використовувати АД як елемент автоматичних систем управління.

При використанні АД в автоматичних системах управління необхідно вміти достатньо просто та точно визначати критичне ковзання. В теорії елек-

тричного приводу використовують декілька формул для визначення критичного ковзання:

$$S_k = S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1} \right); \quad (2.46)$$

$$S_k = \frac{S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} + 2S_H(M_k^* - 1) - 1} \right)}{1 - 2S_H(M_k^* - 1)}; \quad (2.47)$$

$$S_k = \frac{S_H + \sqrt{AS_H}}{1 + \sqrt{AS_H}}; \quad (2.48)$$

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

$$A = \frac{M_k^* - 1}{M_k^* / M_n^* - 1} \text{ – допоміжний коефіцієнт.}$$

$$S_k = S_H \sqrt{\frac{K_I^2 - 1}{(1 - I_0^{*2})(1 + 2S_H)}} \quad (2.49)$$

де I_0 – відносне значення струму холостого ходу. Визначається за даними таблиці 2.10.

Для того щоб оцінити точність розрахунку критичного ковзання, проведемо розрахунок для одного з серійних АД, а потім порівняємо результати з тими, що отримані при розрахунках за формулою (2.51).

Таблиця 2.10 – Відносне значення струму холостого ходу

Потужність АД, Вт	$I_o^* = I_o / I_{1H}$			
	$n_1=314,2 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$	$n_1=157 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$	$n_1=104,7 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$	$n_1=78,5 \text{ рад}\cdot\text{с}^{-1}$
0,5...1,0	0,40	0,55	0,60	-
1,1...5,0	0,35	0,50	0,55	0,60
5,1...10,0	0,25	0,45	0,50	0,55
10,1...25,0	0,20	0,40	0,45	0,50
25,1...50,5	0,18	0,35	0,40	0,45

Крім того використовуються і такі вирази:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_H(M_n^* - 1)}{1 - S_H(3M_n^* - 2)}}; \quad (2.50)$$

$$S_k = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (2.51)$$

Для розрахунків використовуємо технічні (каталожні) дані АД типу 4А80А4УЗ: потужність $P_H = 1,1$ кВт; відносне значення пускового моменту $M_{II} = 2,0$; відносне значення критичного моменту $M_k^* = 2,2$; інші дані дорівнюють: $K_1 = 5,0$; $\eta_H = 0,75$; $\cos \gamma_H = 0,81$; $n_1 = 1500$ об/хв; $n_{2H} = 1420$ об/хв; $\omega_1 = 157,5$ с⁻¹; $\omega_{2H} = 149,1$ с⁻¹; $V_{1нл} = 380$ В; $V_{1нф} = 220$ В; $I_{1н} = 2,75$ А; $I_o^* = 0,5$; $S_H = 0,053$; $I_o = 1,375$ А; $M_H = 7,38$ Нм; $M_K = 16,23$ Нм; $M_{II} = 14,76$ Нм.

Розраховуємо значення ковзання за виразами (2.46)...(2.51), отримуємо такі результати.

За формулою (2.46) отримуємо [122]:

$$S_k = S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} - 1} \right) = 0,053 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,22,$$

де $S_H = \frac{n_1 - n_{2H}}{n_1} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0,053$ – номінальне ковзання.

За формулою (2.47) розрахунки дають, що:

$$S_k = \frac{S_H \left(M_k^* + \sqrt{M_k^{*2} + 2S_H(M_k^* - 1) - 1} \right)}{1 - 2S_H(M_k^* - 1)} =$$

$$= \frac{0,053 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 + 2 \cdot 0,053(2,2 - 1) - 1} \right)}{1 - 2 \cdot 0,053(2,2 - 1)} = 0,24.$$

За формулою (2.48) результати розрахунків мають вигляд:

$$S_k = \frac{S_H + \sqrt{AS_H}}{1 + \sqrt{AS_H}} = \frac{0,053 + \sqrt{0,053 \cdot 12}}{1 + \sqrt{0,053 \cdot 12}} = 0,473,$$

де $A = (M_k^* - 1) / \left(\frac{M_k^*}{M_n^*} - 1 \right) = (2,2 - 1) / \left(\frac{2,2}{2,0} - 1 \right) = 12$.

Визначаємо критичне ковзання за формулою (2.49):

$$S_k = S_H \sqrt{\frac{K_I^2 - 1}{(1 - I_o^{*2})(1 + 2S_H)}} = 0,053 \sqrt{\frac{5^2 - 1}{(1 - 0,5^2)(1 + 20,53)}} = 0,286,$$

де $I_o^* = 0,5$ – відносне значення струму холостого ходу АД.

За формулою (2.50) отримуємо:

$$S_k = \sqrt{\frac{S_H(M_n^* - 1)}{1 - S_H(3M_n^* - 2)}} = \sqrt{\frac{0,053(2 - 1)}{1 - 0,053(3 \cdot 2 - 2)}} = 0,259.$$

Для розрахунку ковзання S_k за виразом (2.51) необхідно знайти значення активних та індуктивних опорів R_1 , R_2' , X_k . Для цього попередньо визначимо:

$$\begin{aligned} \cos \gamma_K &= \cos \gamma_H \left[\frac{M_n^* \eta_H}{(1 - S_H) K_1} + 0,33 K_1 (1 - \eta_H) \right] = \\ &= 0,81 \left[\frac{2 \cdot 0,75}{(1 - 0,053) 5} + 0,33 \cdot 5 (1 - 0,75) \right] = 0,63 \end{aligned}$$

де $K_k = Z_k \cdot \cos \gamma_K = 16 \cdot 0,63 = 10$ Ом – активний опір короткого замикання;

$$Z_k = \frac{V_{нл}}{\sqrt{3} \cdot I_{1H} K_1} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 2,75 \cdot 5} = 16 \text{ Ом} \text{ – активний опір короткого замикання АД;}$$

$X_k = Z_k \cdot \sin \gamma_k = 16 \cdot 0,776 = 12,4$ Ом – індуктивний опір короткого замикання АД;

$$R'_2 = \frac{M_n^* S_H \omega_1}{3 I_2^2} = \frac{7,38 \cdot 157,5 \cdot 0,08}{3 \cdot 2,382} = 3,6 \text{ Ом} - \text{активний опір обмотки фази}$$

ротора, приведеного до статора;

$$I'_2 = \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} = \sqrt{2,75^2 - 1,375^2} = 2,38 \text{ А} - \text{приведений струм ротора АД};$$

$$I_0 = I_0^* \cdot I_{1H} = 0,5 \cdot 2,75 = 1,375 \text{ А} - \text{струм холостого ходу АД};$$

$$R_1 = R_k - R'_2 = 10 - 3,6 = 6,4 \text{ Ом} - \text{активний опір обмотки фази статора.}$$

Знаходимо критичне ковзання за теоретичною формулою (2.51):

$$S_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} = \frac{3,6}{\sqrt{6,4^2 + 12,4^2}} = 0,259.$$

Як видно, що найбільш доцільно за каталожними даними для визначення S_k використовувати формулу (2.50), оскільки вона дає найбільш точні результати. Якщо відомі величини R_1 , R'_2 , X_k , то доцільно використовувати формулу (2.51).

Проведений розрахунок та аналіз дозволяють зробити такі зауваження.

1. Виконані розрахунки показали, що при підключенні АД до мережі живлення значення намагнічуючого струму I_0 установлюється не миттєво, а через деякий час, змінюючись по експоненціальному закону зі сталою часу, яка дорівнює T_e . Значення цього часу необхідно обов'язково враховувати при розрахунку перехідних процесів в автоматичній системі управління електроприводом з асинхронним двигуном.

2. Порівняння величин сталих часу електромагнітної (T_e) та електромеханічної ($T_M = J_D \cdot \omega_H / M_H$) 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 частину можна не враховувати.

3. Для розрахунку опору R_2' доцільно використовувати формулу:

$$R_2' = \frac{M_H \cdot \omega_H}{3I_2'^2} \text{ Ом,}$$

де $I_2'^2 = I_{1H}^2 - I_0^2$; $I = I_0^* I_{1H}$; I_0^* ;

$$I_{1H} = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi_H \eta_H}.$$

Необхідно відмітити, що одним з технічних питань, пов'язаних з асинхронною машиною, є автоматичне регулювання (або стабілізація) напруги асинхронного генератора (АГ). Принцип регулювання напруги АГ досить докладно описаний в літературі [3, 4, 8]. Він полягає в тому, що регулятор змінює значення реактивного (індуктивного) струму в колі АГ, що викликає зміну напруги. Першочергове збудження АГ здійснюється шляхом підключення на вихід АГ конденсаторів збудження.

2.7 Дослідження моделі електричної силової установки електробуса в програмному середовищі MathLAB Simulink

У всьому світі спостерігається необхідність у впровадженні електробусів для експлуатації у великих містах як громадського транспорту. Автономного ходу електробусів повинно вистачати до розташованих на зупинках зарядних станцій. До того ж, вони повинні мати такі ємнісні накопичувачі, що заряджаються за час посадки/висадки пасажирів на зупинці без втрати часу на маршруті. Цім вимогам найбільш задовольняє електробус з блоком накопичення енергії на основі суперконденсаторів. Суперконденсатори можна заряджати великими струмами. Це дозволяє проводити їх підзарядку під час висадки/посадки пасажирів [15, 130]. Ще одною перевагою СК є їх термін

служби. Він порівняний з терміном служби самого автобусу (10-15 років). Отже, зникає потреба в заміні деградованих СК в процесі експлуатації на відміну від звичайних тягових АКБ.

В статті [131] проведено моделювання роботи електробусу при його роботі в міських умовах з точки зору ефективності у порівнянні зі звичайним дизельним аналогом. За результатами моделювання виходить, що електробус значно ефективніший з точки зору прибутку для автотранспортної компанії, що його експлуатує. Це пов'язано з тим, що електробуси здатні перевозити більше пасажирів (порівняно з міським автобусом) з меншим споживанням енергії.

Для представлення повної картини роботи електробусу слід змоделювати роботу його електричної силової установки. Це дасть змогу 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 електробусу.

Тому проведено дослідження моделі функціональної силової установки електробуса в програмному середовищі MathLAB Simulink з отриманням основних характеристик протікання електричних та електромеханічних процесів в обладнанні.

Опис основних складових моделі. Моделювання проводилось для електробуса на суперконденсаторах, загальна схема компоновки якого представлена в роботі [36]. Модель силової установки електробуса для міських перевезень представлено на рис. 2.23. Запропонована схема дає можливість дослідити роботу електричної силової установки при різних навантаженнях [132].

В основі вище приведеної схеми лежить векторний принцип управління АД. Векторне управління дозволяє незалежно і практично без інерційно регулювати швидкість обертання і момент на валу електродвигуна. Головна ідея векторного управління полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу. Векторне управління в порівнянні зі скалярним має більшу продуктивність.

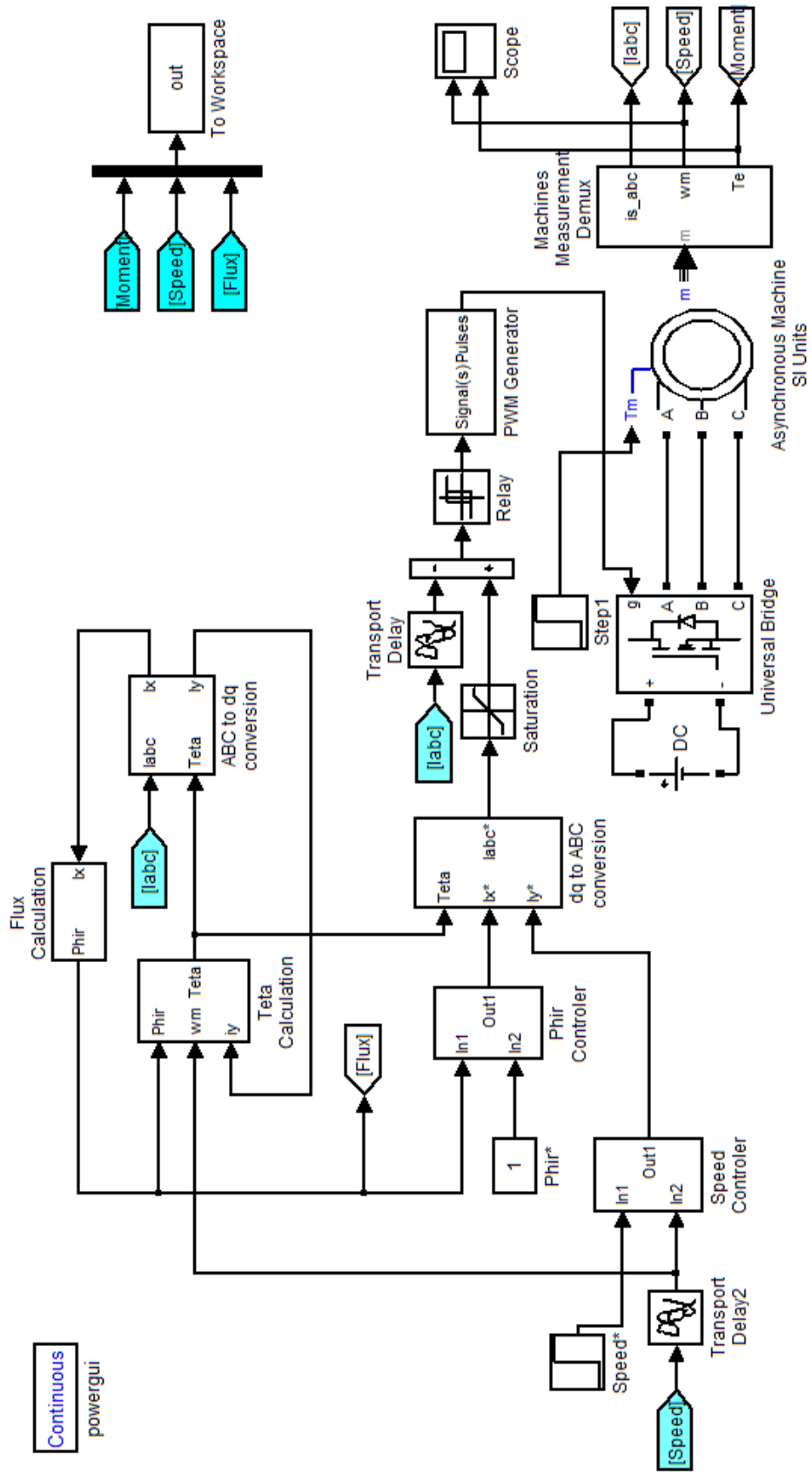
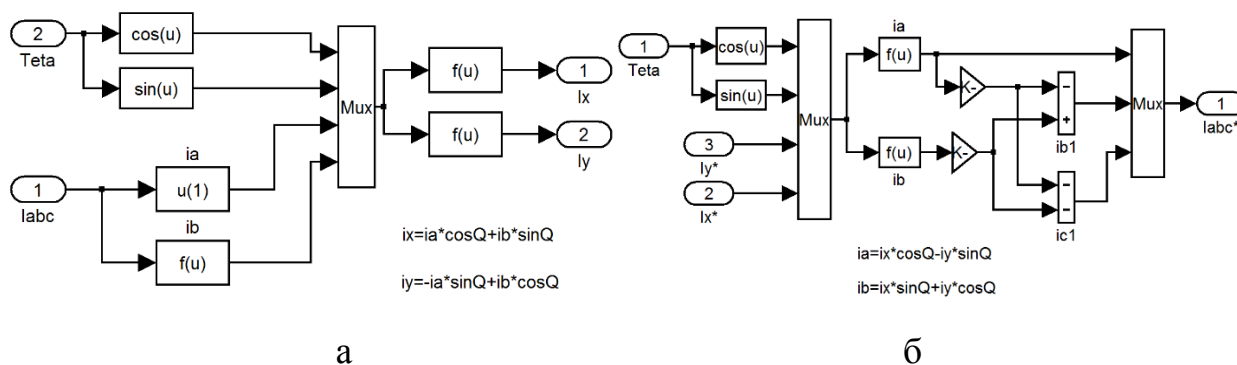


Рисунок 2.24 – Модель електричної силової установки електробуса

Векторне управління позбавлене практично усіх недоліків скалярного управління. Модель електричної силової установки електробуса (рис. 2.24) складається з:

- віртуального асинхронного двигуна (*Asynchronous Machine SI Units*);
- трифазного автономного інвертора на IGBT транзисторах (блок *Universal Bridge*). Завдяки цьому блоку можна здійснювати контроль швидкості змінного струму асинхронного двигуна;
- блоки *ABC to dq conversion* (перетворення Кларка і Парка) та *dq to ABC conversion* (зворотнє перетворення) виконують перетворення нерухомої трифазної системи координат в обертову двофазну та обертову двофазну в нерухомому трифазну. Схеми блоків перетворення представлені на рис. 2.25.



Рисункок 2.25 – Блоки перетворення: а – *ABC to dq conversion*;
б – *dq to ABC conversion*

На рис. 2.26 представлено вхідні та вихідні данні блоку *ABC to dq conversion*, де перші дві величини – це струм статора та вихідний сигнал з блоку *Teta Calculation*. Блок *ABC to dq conversion* складає ці дві величини, обробляє та результати виводить для розрахунку потокозчеплення ротора (*Flux Calculator*) та до блоку визначення кута повороту системи координат для надання коректив при обчисленні.

На рис. 2.27 представлено вхідні та вихідні данні блоку *dq to ABC conversion*. До входу цього блоку підведені виходи блоку *Teta Calculation*,

Phir Controler та *Speed Controler*. На виході цього блоку отримуємо струми фаз (I_{abc}) для подальшого перетворення сигналу в широтно-імпульсний.

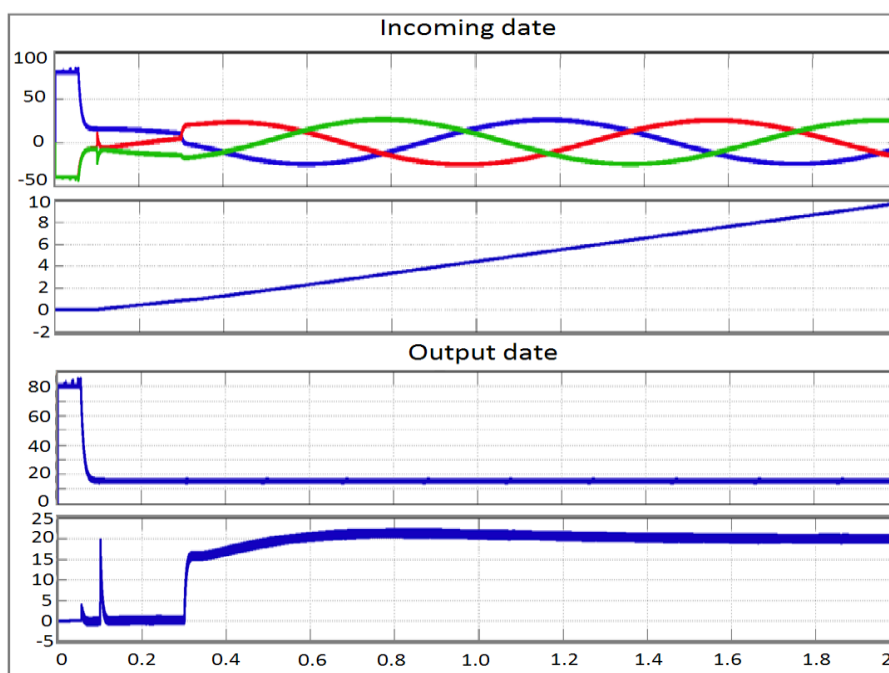


Рисунок 2.26 – Вхідні та вихідні сигнали блоку *ABC to dg conversion*

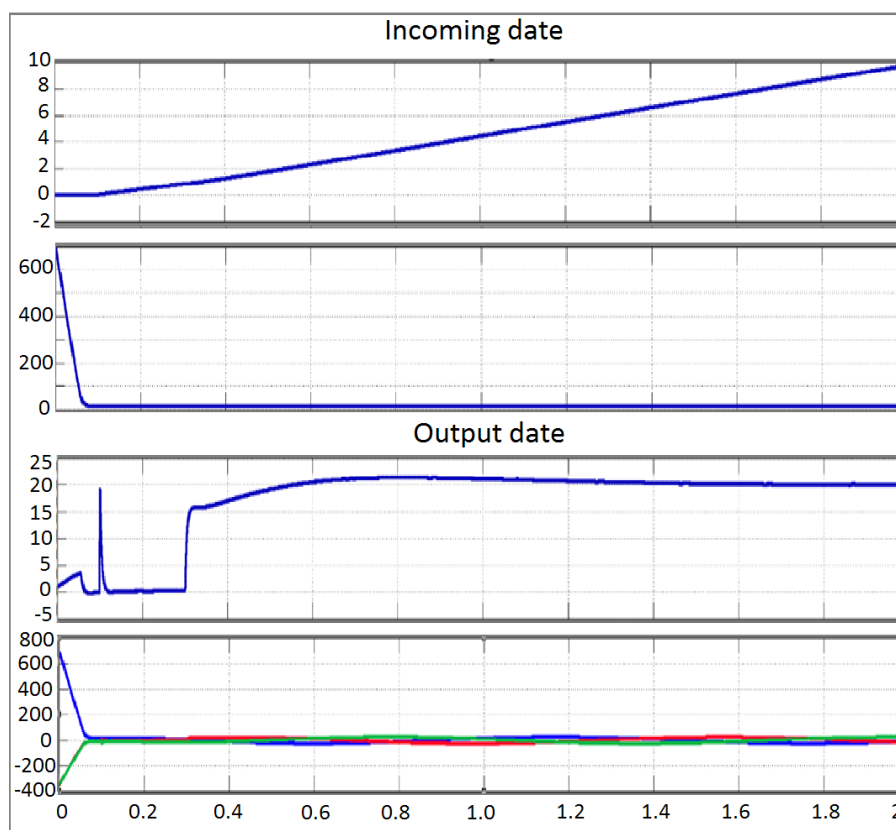


Рисунок 2.27 – Вхідні та вихідні сигнали блоку *dg to ABC conversion*

Блок визначення кута повороту системи координат (блок *Teta Calculation*) представлений на рис. 2.28). Цей блок визначає вихідну частоту та порядок фаз інвертора.

На рис. 2.29 представлено вхідні та вихідні данні блоку *Teta Calculation*. Для визначення частоти інвертора до цього блоку підведені вихід блоку *FluxCalculator, ABC to dg conversion* та момент (позначено – «wm»).

Блок завдання швидкості (*Speed*) та регулятор швидкості (*Speed Controler*, рис. 2.30) являє собою модель регулятора швидкості на основі ПІД-контролера.

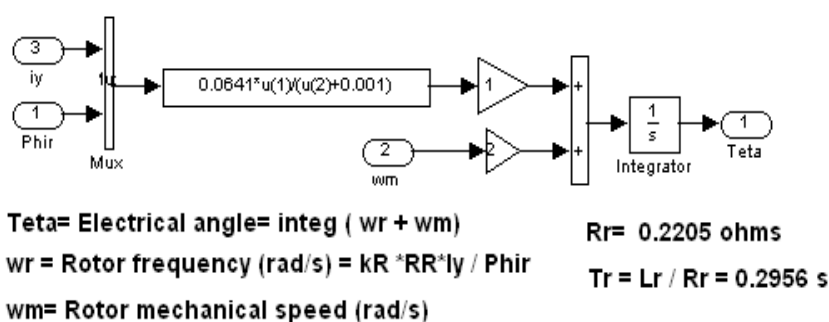


Рисунок 2.28 – Блок визначення кута повороту системи координат

На рис. 2.31 представлено вхідні та вихідні данні блоку *Speed Controler*. На входи до цього блоку підведений вихід блоку *Step*, параметри якого дозволяють регулювати швидкість обертання асинхронного двигуна.

Блок обчислення потокозчеплення (блок *Phir*) та регулятор струму по осі x (блок *Phir Controler*). Блок побудовано на основі ПІД-контролера, як і блок *Speed Controler* (рис. 2.32).

Блок *Saturation*. Цей блок виробляє вихідний сигнал, який є значенням вхідного сигналу, він здійснює обмеження вхідного сигналу на верхні і нижні значення насичення.

Блок *Transport Delay*. Він використовується для імітації затримки. На початку моделювання блок подає вихідний номінальний параметр до тих пір, поки вхідний сигнал не перевищить параметр часу затримки. Потім блок починає задавати затримку сигналу з входу.

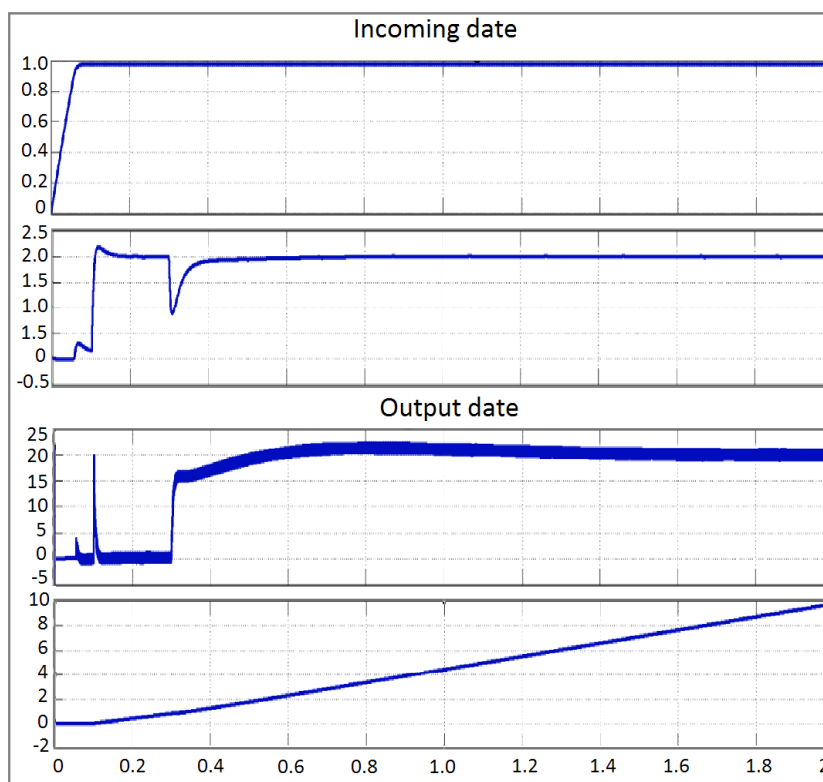


Рисунок 2.29 – Вхідні та вихідні сигнали блоку *Teta Calculation*

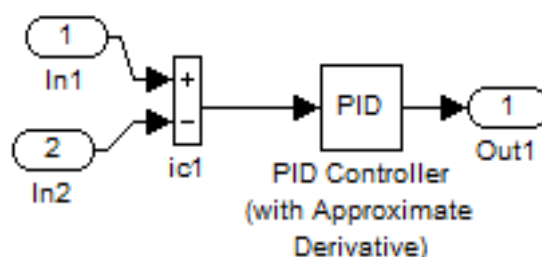


Рисунок 2.30 – Блок регулятора швидкості *Speed Controler*

Блок обчислення потокозчеплення ротора (*Flux Calculator*, рис. 2.30). На рис. 2.33 представлено вхідні та вихідні данні блоку *FluxCalculator*.

Блок *Step*. Блок визначає крок між двох певних рівнів в зазначений час. В початковий період моделювання блок *step* виводить початковий сигнал.

Блок *Machine Measurement Demux*. Блок дозволяє розділити на окремі сигнали для вимірювань вхідний сигнал, котрий надходить з машин.

Блок *DC*. Живлення системи електроприводу здійснюється від джерела напруги постійного струму *DC*. Блок реалізує ідеальне джерело напруги постійного струму.

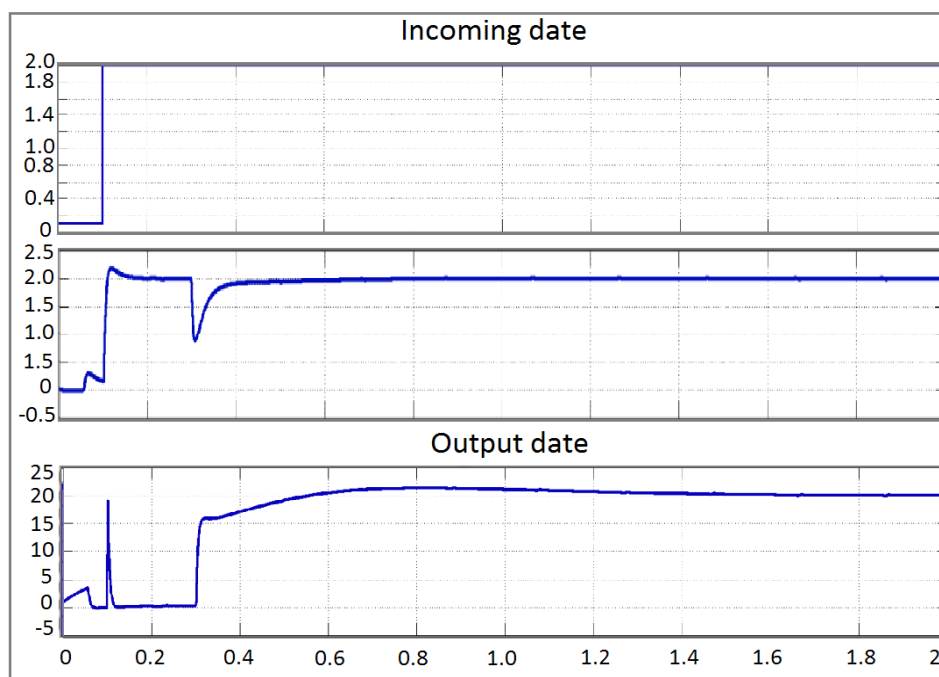
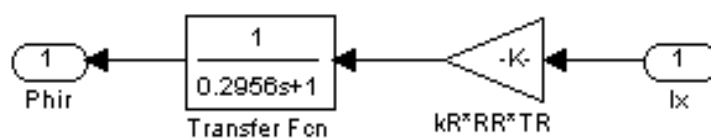
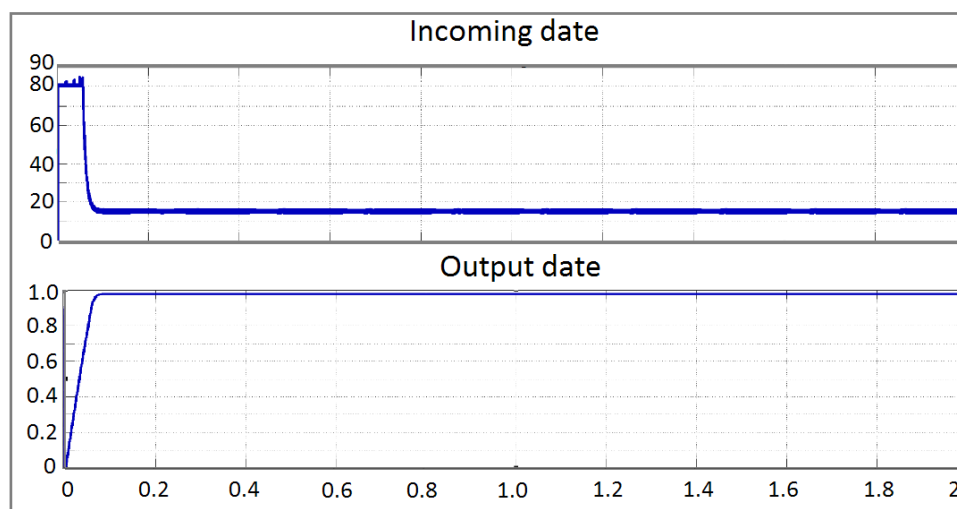


Рисунок 2.31 – Вхідні та вихідні сигнали блоку Speed Controler



$$\text{Phir} = kR \cdot RR \cdot TR \cdot Ix / (1 + TR \cdot s) \quad Tr = Lr / Rr = 0.2956 \text{ s}$$

$$RR = 0.2205 \text{ ohms}$$

Рисунок 2.32 – Блок обчислення потокозчеплення ротора *Phir*Рисунок 2.33 – Вхідні та вихідні сигнали блоку *FluxCalculator*

Блок *PWM Generator*. На основі вхідних сигналів, блок генерує імпульс широкої модуляції який використовує асинхронна машина.

Блок *Relay*. Вихідне число перемикається між двома вказаними значеннями. Реле залишається ввімкнене доки вхідний сигнал не опуститься нижче значення параметра точки виключення і навпаки, реле залишається ввімкненим, поки вхідний сигнал не перевищує значення параметра ввімкнення. Блок видає вихідне значення не нижче та не вище тих значень, які були вказані.

Блок *Scope*. Це осцилограф, який будує графіки досліджуваних сигналів в функції часу. Дозволяє спостерігати за змінами сигналів в процесі моделювання. Блок *Scope* дозволяє регулювати кількість часу та діапазон значень вхідних даних, що відображаються. В результаті, якщо відкрити вікно після моделювання, то будуть відображатися вхідні сигнали.

Для вимірювання сигналів з кожного блоку моделі була побудована розширена модель електробуса.

Обробка результатів моделювання електричної силової установки електробуса і їх аналіз.

Завдяки блоку *Workspace* (рис. 2.30) можна записувати показання ЕД, бо до цього блоку підведені відомості про його швидкість, струми статора, електромагнітний момент. Після закінчення моделювання схеми, скориставшись даними, що були записані в цьому блоку, побудована механічна характеристика АД – залежність кутової швидкості електродвигуна від електромагнітного моменту, рис. 2.34.

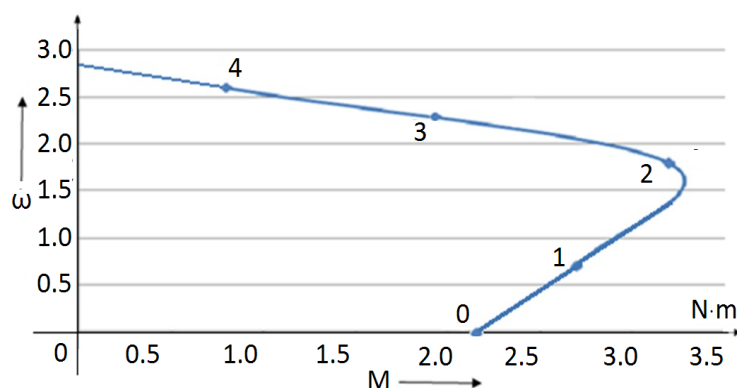


Рисунок 2.34 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

При запуску двигун розвиває пусковий момент, який відповідає точці 0, після чого розганяється по траєкторії 0 – 1 – 2 до точки 3, рис. 2.33. При цьому на ділянці 1-2 одночасно збільшуються як швидкість, так і момент, на ділянці 1-2 двигун розвиває максимальний момент. На ділянці 2-3 швидкість продовжує збільшуватися, а момент зменшується, до номінального (точка 3). Ділянка 2-4 є робочою частиною механічної характеристики АД тягового електроприводу електробуса. Це означає, що при зміні моменту в широких межах швидкість двигуна змінюється незначно.

На рис. 2.36 приведені результати дослідження роботи моделі силової установки електробуса у програмному середовищі Matlab Simulink.

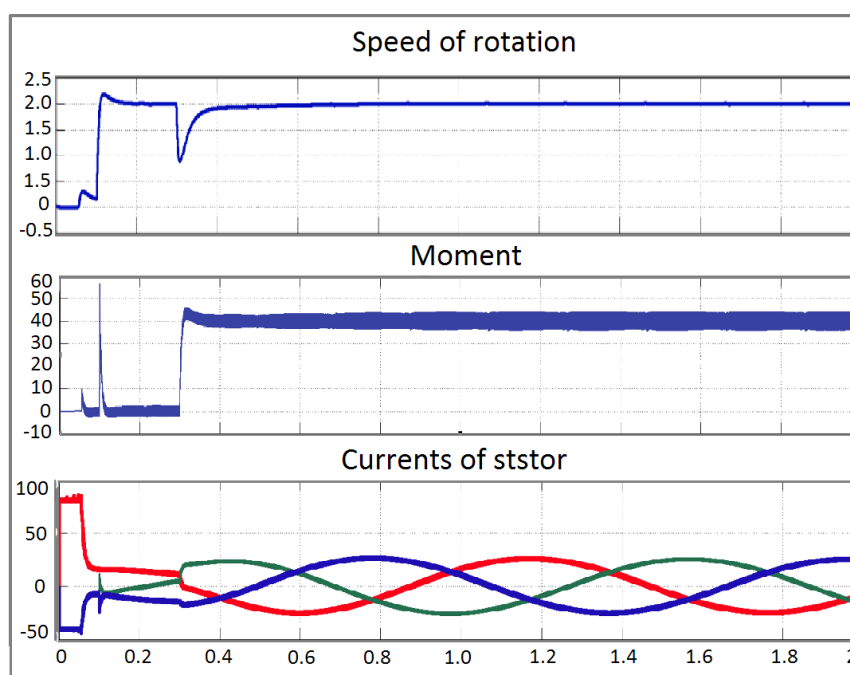


Рисунок 2.36 – Результати дослідження роботи моделі силової установки електробуса у програмному середовищі Matlab Simulink

Верхній графік цього рисунку відображає зміну швидкості, середній – електромагнітний момент, нижній – статорні струми в трифазній нерухомій системі координат. При моделюванні в початковий момент часу завдання швидкості складає 2 рад/с. Двигун запускається вхолосту і виходить на цю швидкість без навантаження. Після виходу на задану швидкість відбувається

додавання навантаження в момент часу $t = 2,4$ с. В цей момент відбувається зниження швидкості до $0,5$ рад/с, та в момент часу $t = 4$ с відбувається збільшення швидкості до 2 рад/с.

З графіків перехідних процесів швидкості, моменту і струмів (рис. 2.35) видно, що регулятори якісно обробляють різного роду сигнали, які впливають на роботу АД. АД з короткозамкненим ротором може працювати в електросиловій установці електробуса з прямим підключенням обмотки статора до трифазного автономного інвертора, але при цьому можуть спостерігатися деякі негативні явища:

- при запуску виникає великий пусковий струм, який перевищує номінальний струм в 5 разів. Це пояснюється тим, що в початковий момент запуску ротор двигуна нерухомий. Це можна спостерігати на графіку швидкості обертання на ділянці 0-1-2 (рис. 2.33);

- в момент запуску двигун розвиває відносно малий пусковий момент, який перевищує номінальний момент тільки від $1,2$ до $1,6$ рази.

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.

Аналіз отриманих характеристик перехідних процесів, показує, що запропонована електрична силова установка електробуса 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 електробуса показує, що всі розрахунки були зроблені коректно і система управління працює згідно прийнятих налаштувань. Такий висновок було зроблено

з порівняння отриманих результатів з відомими класичними характеристиками АД, що докладно описані в [127]. Зауважимо, що при отриманні результатів моделювання, що відповідають певним вимогам, слід завжди зважати на адекватність моделі та прийнятих припущень. В ході дослідження в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink реалізована структура векторного управління АД. Моделювання системи управління дозволило зробити висновок про адекватність налаштування регуляторів за параметрами схеми заміщення двигуна, а також про коректну роботу алгоритмів в блоках оцінки потокозчеплення ротора і обмеження моменту. Моделювання векторної системи управління асинхронного двигуна дозволяє виключити помилки і неточності при проектуванні системи управління двигуном, а також провести налагодження алгоритмів управління в різноманітних режимах роботи системи управління.

Висновки за розділом 2

1. Проведене дослідження електричних технологій для впровадження в автобусну техніку для міського призначення дозволило визначити основні переваги та недоліки електричних колісних транспортних засобів. Представлені результати переобладнання дизельних автобусів в електробуси і приведені технологічні рішення, що сприятимуть поширенню електротранспорту у великих містах та мегаполісах.

2. Побудована електрична модель суперконденсатора як тягового джерела енергії для електробуса і отримані вирази, що описують роботу накопичувача енергії та можуть бути використані при його виборі.

3. Проведено вибір тягового електродвигуна для електробуса за критерієм оптимальності – мінімальні втрати і максимальний ККД. Визначено, що за багатьма критеріями найбільше підходить асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, бо поєднує в собі ряд переваг, а саме: мінімальну вартість, мінімальну масу, мінімум провідникових і феромагнітних матеріалів, що можна досягти, підвищуючи робочі оберти ЕД. В електробусах робота ЕД, як правило, відбувається в широкому діапазоні обертів.

4. Проведено розрахунок основних характеристик асинхронного тягового електродвигуна електробуса, що дозволило визначити характер механічної характеристики електродвигуна тягового електроприводу електробуса в режимі двигуна і в генераторному режимі.

5. Проведено розрахунок основних параметрів для автоматичного управління асинхронним двигуном і аналіз дозволяють зробити такі зауваження:

– при підключенні АД до мережі живлення значення намагнічуючого струму I_0 встановлюється не миттєво, а через деякий час, змінюючись за експоненціальним законом зі сталою часу, яка дорівнює T_e . Значення цього часу необхідно обов'язково враховувати при розрахунку перехідних процесів в автоматичній системі управління електроприводом з асинхронним двигуном;

– порівняння величин сталих часу електромагнітної (T_e) та електромеханічної ($T_M = J_d \cdot \omega_H / M_H$) для частоти 50 Гц показує, що їх 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.

6. Дослідження закономірностей протікання електричних та електромеханічних процесів в електричній силовій установці електробуса за допомогою моделі в програмному середовищі MathLAB Simulink дозволили виявити особливості їх протікання при використанні блоку суперконденсаторів як тягового джерела енергії. При проведенні модулювання було реалізовано принцип векторного управління асинхронними двигунами. Отримані результати модулювання дозволяють виключити помилки і неточності при проектуванні системи управління асинхронним двигуном та провести налагодження алгоритмів управління в різних режимах роботи системи управління силової установки електробуса.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [3, 5, 12, 17–19, 36].

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Дослідження, розробка та впровадження нових нетрадиційних методів та способів генерації електричної енергії набули актуальності, про що свідчить велика кількість різного роду державних програм та проектів, що направлені на їх розвиток. Державна політика України має неухильний курс на енергонезалежність. Отже дослідження та розробка АСГЕЕ [133, 8, 21, 134, 4] є актуальним питанням сьогодення.

Це підтверджує необхідність розробки АСГЕЕ, що зможуть генерувати енергію для зарядки електробусів. Розробка систем генерації та збереження енергії потребує визначення основних вимог до транспортної інфраструктури, яка буде забезпечувати безперебійне функціонування електробусів.

До основних загальних вимог до зарядної інфраструктури електробусів відноситься [135]:

- сумісність електробусів із зарядними пристроями;
- масштабність, тобто відповідність кількості зарядних станцій/точок розміру автобусного парку;
- потужність ЗС (кількість електробусів, що можуть зарядитись за 1 год);
- органічна інтеграція в інфраструктуру міста: зовнішній вигляд, цивільне будівництво;
- сумісність зарядних станцій з енергосистемою: достатня потужність та доступна енергія, крім того повинна враховуватись стабільність електромережі.

Від правильного вибору типу зарядних станцій і способу зарядки залежить безперебійність і ефективність експлуатації електробусів.

3.1 Типи зарядних станцій для транспортних засобів на електричній тязі

Основні види і способи зарядки ТЗ на електричній тязі представлені на рис. 3.1 у відповідності до якого існує:

– ручна зарядка (депо зарядки). Використовуються штекери для зарядки змінним струмом і бортові зарядні пристрої, а також стаціонарні швидкі зарядні пристрої потужністю 50...300 кВт зі стандартизованим інтерфейсом (CCS);

– автоматична зарядка, що ділиться на:

а) зарядку через пантограф. Пантограф може встановлюватися на даху електробуса або на самій зарядній станції (перевернутий пантограф);

б) підключення з-під автомобіля;

в) підключення з боку автомобіля;

г) індуктивну зарядку.

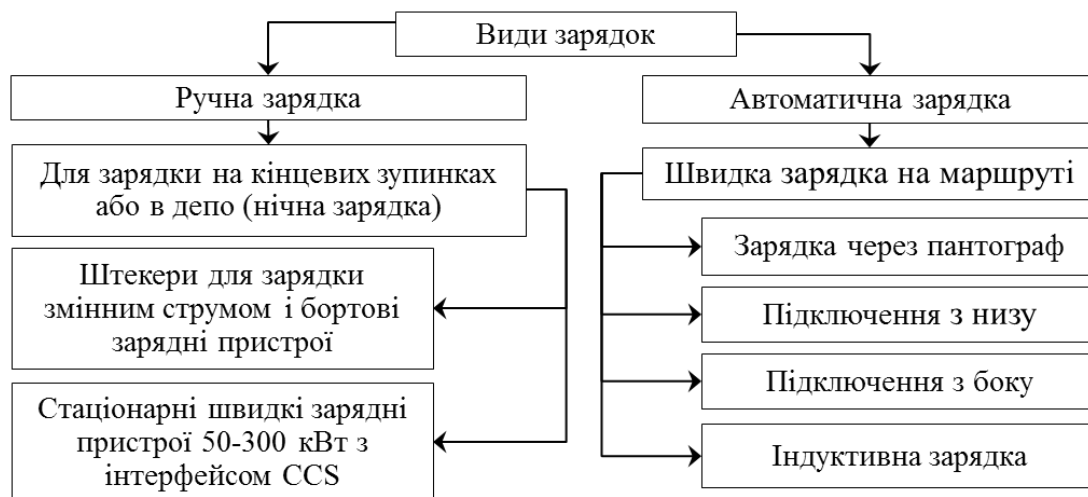


Рисунок 3.1 – Основні типи зарядок електробусів

Ручну зарядку доцільно використовувати для ЕБ, що заряджаються або на кінцевих зупинках, або в депо вночі (тобто при довготривалій зарядці). Якщо електробус треба заряджати швидко, наприклад, на зупинках під час посадки/висадки пасажирів, то необхідно встановлювати автоматичну зарядку і обирати найбільш придатний спосіб в залежності від конструкції електробуса, фінансових і технічних можливостей.

Важливим є те, що при розбудові транспортної інфраструктури, треба враховувати, що зарядний пристрій не повинен псувати естетику інфраструктури, обладнання повинно вписуватися в дизайн міської архітектури. Також це стосується і мережевого обладнання (трансформатору, розподільного при-

строю середньої напруги тощо). Крім того, повинно бути облаштовано дистанційне обслуговування і спостереження за пантографом/стовпом (при використанні зарядки на маршруті); повинні бути передбачені способи запобігання вандалізму і протиаварійній системі.

Виробництвом зарядних станцій для транспортних засобів на електричній тязі займається багато всесвітньо відомих фірм [135].

Пантографи, що монтуються на даху, виробляють наступні компанії: Heliox (NL), Ekoenergetyka (PL), Schunk (DE). Перевернуті пантографи виробляють: ABB (CH), Siemens (DE), Heliox (NL), Schunk (DE), Stemmann Technik (DE). Також достатньо перспективними є рішення за концепцією фірми Volvo Oppcharge. Індуктивні зарядки виробляють: Bombardier (DE), Conductix-Wampfler (DE). Бічний контакт: Multi-Contact (FR). Зарядку під автомобілем: Alstom (FR). А також варто відзначити американського виробника – фірму Proterra (США).

При проектуванні зарядної інфраструктури необхідно враховувати, що по мірі збільшення автобусного парку, потужність зарядки терміналу стає більш критичною. Крім того, важливим критерієм є відповідність вимогам до надійності системи зарядки, бо при недотриманні цих вимог через недостачу зарядних пристроїв або через їх поломку можливі затримки електробусів.

Необхідно також враховувати можливості електромережі – чи зможе вона витримувати зростаюче число електробусів, чи не вплине це на стабільність її роботи. Та для вирішення цієї проблеми існує безліч способів. Мова йде про альтернативні стаціонарні джерела енергії. Це дозволить суттєво розширити паливну базу електробусів.

В залежності від струму, який подається на електробус, зарядні станції поділяються на дві групи: змінного струму і постійного струму. На рис. 3.2 представлено класифікацію зарядних станцій за струмом і способом зарядки.

Як відомо, тягові батареї для електричних ТЗ можуть заряджатися тільки постійним струмом, а електромережі забезпечують постійний струм або змінний струм в залежності від місця розташування та напруги. Якщо вико-

ристовується мережа змінного струму, то для зарядки акумулятора необхідні випрямлячі для перетворення змінного струму в постійний.



Рисунок 3.2 – Класифікація ЗС за струмом і способом зарядки

У випадку наявності роз'ємів для зарядки постійним струмом ці випрямлячі вже знаходяться в зарядній станції, а не встановлені в транспортному засобі. Отже вони, забезпечують більшу зарядну потужність, ніж при зарядці змінним струмом. У ТЗ, що заряджаються змінним струмом, встановлюються менш потужні випрямлячі, що обмежує швидкість зарядки.

Характеристики електробусів різних виробників з зазначенням режимів зарядки, що передбачені виробниками представлені в таблиці 3.1 [136].

Таблиця 3.1 – Характеристики електробусів з зазначенням режимів зарядки, що передбачені виробниками

Виробник	Модель	Ємність, кВт·год	Потужність, кВт	Режим заряджання
Solaris	Urbino 12e, 18e	75-240	160, 240	CCS і Пантограф
Sileo	S12, S18	300, 450	240, 480	CHAdeMO
VDL	SLF120, SLFA180	60-240	153, 210	CCS і Пантограф
SORC	NB 12 Electric	225	160	Пантограф
Proterra	Catalyst 35/40 Foot	94-440, 94-660	2x190	CCS і Пантограф
Ursus	City Smile 12M	50-265	від 10, 300-1000	CCS і Пантограф
BYD	Enviro 200 EV	240	160	CCS і Пантограф
Irizar	i2e	282-367	180	CCS
Volvo	7900 Electric	4x19 (76)	180	CCS і Пантограф
Caetano	e.City Gold	85-250	160	CCS
Ebusco	Electric City Bus 2.1	311	110-220	CCS
Daimler	Citaro E-Cell		150	CCS і Пантограф
Белкоммунмаш	«Vitovt» E420, E433	34	160	CCS і Пантограф

Як видно з таблиці 3.1, майже всі електробуси мають функцію швидкої зарядки змінним і постійним струмом CCS. Крім того, більшість з представлених моделей передбачають зарядку постійним струмом на маршруті за допомогою пантографа. Це підтверджує, що для електробусів як міського транспорту, пантограф є доволі поширеним пристроєм для швидкої зарядки на зупинках, а значить використання суперконденсаторів як накопичувачів енергії для міського транспорту вже набуло неабиякого поширення і є перспективним для подальшого впровадження.

3.2 Організації зарядної інфраструктури для електробусів шляхом переоснащення існуючих тягових підстанцій

Експлуатація електробусів вимагає наявності доступної та надійної зарядної інфраструктури. З огляду на значні зарядні струми електробусів, необхідно реалізувати достатню потужність зарядної мережі, щоб забезпечити функціонування ультрашвидкої зарядки електробусів на суперконденсаторах по шляху їх проходження.

Пропонується модернізувати наявні ТП, що подають напругу на контактну мережу існуючих фідерних комірок, додавши адаптовану комірку фідерного автомата, суміщену з перетворювальним модулем для заряду електробусів (фідер – це постачальна лінія, що відходить від шин підстанції).

По фідерним кабелям замість тягової напруги передається зарядний струм до місця розташування пункту підзарядки електробуса. Схему інтеграції зарядного пристрою на ТП представлено на рис. 3.3.

Модульний принцип побудови зарядної системи дозволяє отримати необхідну максимальну потужність, рис. 3.4. При цьому використовуються існуючі фідерні кабелі. Додатково потрібно організувати Wi-Fi зв'язок з електробусом в точці заряду.

В районі підключення кабелю до контактної мережі організовується пункт підзарядки електробусів 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.

Для організації каналу зв'язку з електробусом використовується Wi-Fi точка доступу, встановлена на опорі в точці виходу фідерного кабелю. Як було раніше зазначено, для зарядки електробусів на суперкондесаторах використовують пантограф для автоматичного підключення до контактної мережі без необхідності точного позиціонування.

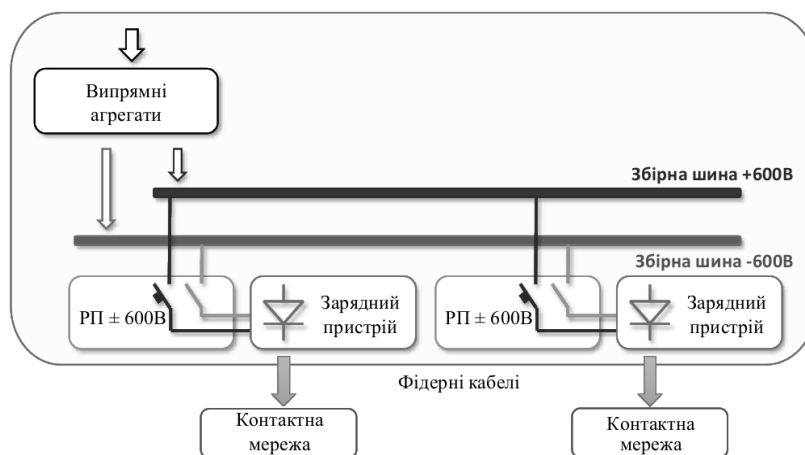


Рисунок 3.3 – Інтеграція зарядного пристрою на ТП

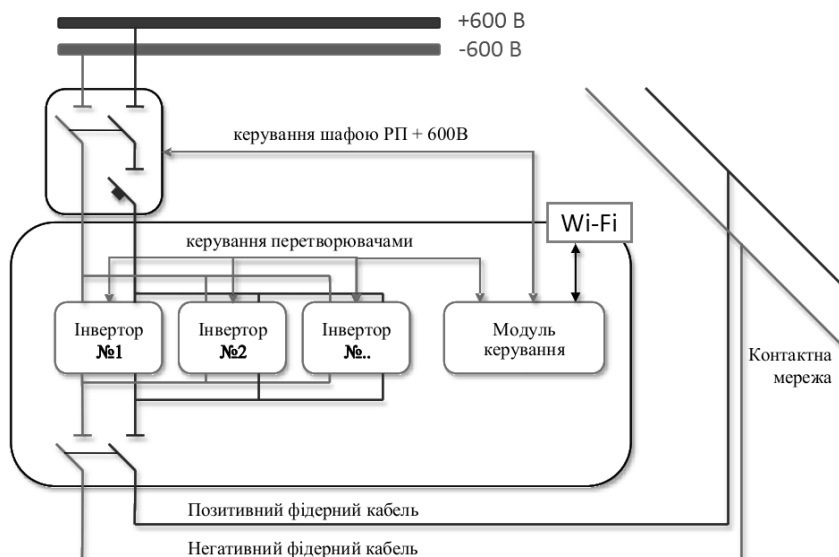


Рисунок 3.4 – Функціональна схема побудови системи заряду електробусів

Для організації каналу зв'язку між тяговою підстанцією і точкою доступу використовуються контрольні жили фідерного кабелю. Ці ж жили використовуються в тому числі і для живлення точки доступу.

У кожному фідерному кабелі проходять дві ізольовані контрольні жили, які можна використовувати для організації живлення точки доступу і передачі інформації від електробуса до зарядної станції на ТП. Силова жила кабелю використовується для передачі зарядного струму.

Переваги даного рішення:

- непотрібно отримувати нові ТУ на приєднання потужностей;
- використовуються існуючі потужності тягових підстанцій;
- використовується існуюча система електропостачання тягових підстанцій;
- відносно низькі витрати на проектування і монтаж «вуличної» частини зарядних станцій;
- зарядна станція розташовується в приміщенні на ТП, що зручно в обслуговуванні і знижує експлуатаційні витрати;
- наявність обслуговуючого персоналу;
- висока швидкість впровадження рішення;

- можливість поетапної роботи зі збереженням живлення маршрутів;
- кожна ТП може мати від 5 до 12 точок заряду.

Тож за наявністю технічних можливостей, модернізація наявних тягових підстанцій є важливим шляхом у підвищенні ефективності експлуатації міських електробусів, що облаштовані пантографом і мають, у якості накопичувачів енергії, суперконденсатори.

3.3 Методи створення альтернативних систем генерації електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі

АСГЕЕ на транспорті та його інфраструктурі є однією зі складових, що дозволить підвищити ефективність експлуатації міських електробусів. Способи використання цієї енергії на транспорті представлені на рис. 3.5.

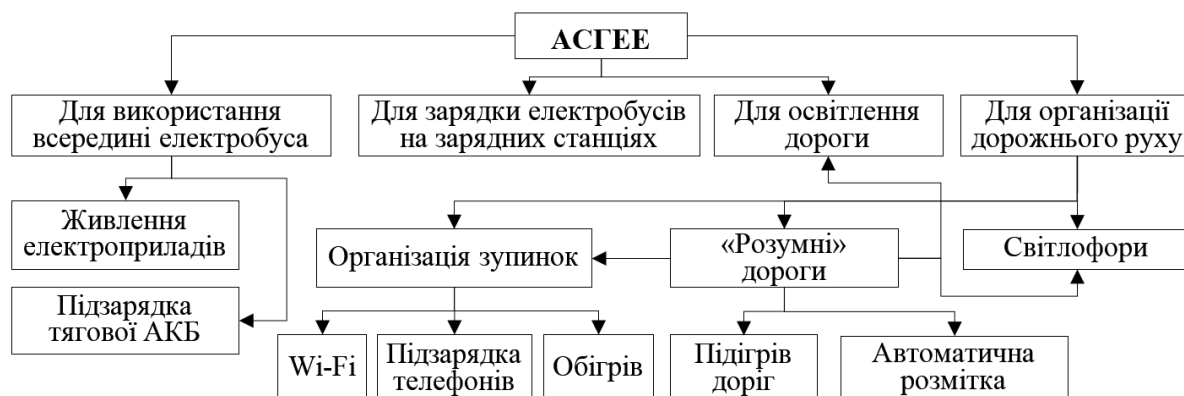


Рисунок 3.5 – Використання ЕЕ, що генерована АСГЕЕ, на транспорті

Велика частина робіт, що представлена у науково-технічній періодиці стосовно даної теми присвячена питанням розробки та дослідженню систем та пристроїв, принцип дії яких заснований на п'єзоелектричному ефекті [137–141]. В цих роботах розглядаються різні конструкції пристроїв, досліджуються процеси збору ЕЕ під час їх роботи, наводиться обґрунтування їх використання. Слід зазначити, що такі пристрої розраховані на значну силу натиску, тому призначені для встановлення на автомобільних дорогах [142].

Перспективною є розробка «Solar Roadway Panel», запропонована ви-

нахідниками з США, що перетворює енергію сонця в ЕЕ. Вона встановлюється на автомобільних дорогах загального користування і, об'єднуючись у систему «Розумна дорога», являє собою альтернативне та децентралізоване джерело живлення [143, 144].

В статті [145] розглядається можливість отримання електричної енергії шляхом її перетворення з енергії звукових хвиль та шляхом використання п'єзоелектричних елементів, а в роботі [146] пропонується поєднати процеси перетворення механічної енергії в електричну з її подальшим накопиченням. Але автори цих робіт не зазначають експлуатаційні та технічні характеристики їх розробок. Тому важливим завданням є дослідження схем технічних рішень щодо розробки енергогенеруючої платформи, що перетворює кінетичну енергію в електричну та експериментальна апробація вибраного рішення.

За основну ідею створення АСГЕЕ на транспорті та його інфраструктурі покладено методи та способи перетворення кінетичної енергії від натискання в ЕЕ, рис. 3.5.

Автором роботи було розроблено декілька схемних рішень конструкції енергогенеруючих платформ. Кожне з них має свої особливості, тому дослідження їх принципу дії є важливим кроком для їх впровадження у систему електричного дорожнього автотранспорту. Застосування подібного роду пристроїв та систем перетворення кінетичної енергії в електричну дозволить генерувати необхідну кількість ЕЕ, яка забезпечить систему електроживлення додатковими малопотужними джерелами живлення. Це дозволить більш ефективно проводити розподіл ЕЕ за потужністю, провести збалансування системи електроживлення за потужністю споживання та впровадити сучасні енергоефективні заходи щодо збереження електроенергії [142]. Представимо декілька з розробок, які лягли в основу запропонованих АСГЕЕ.

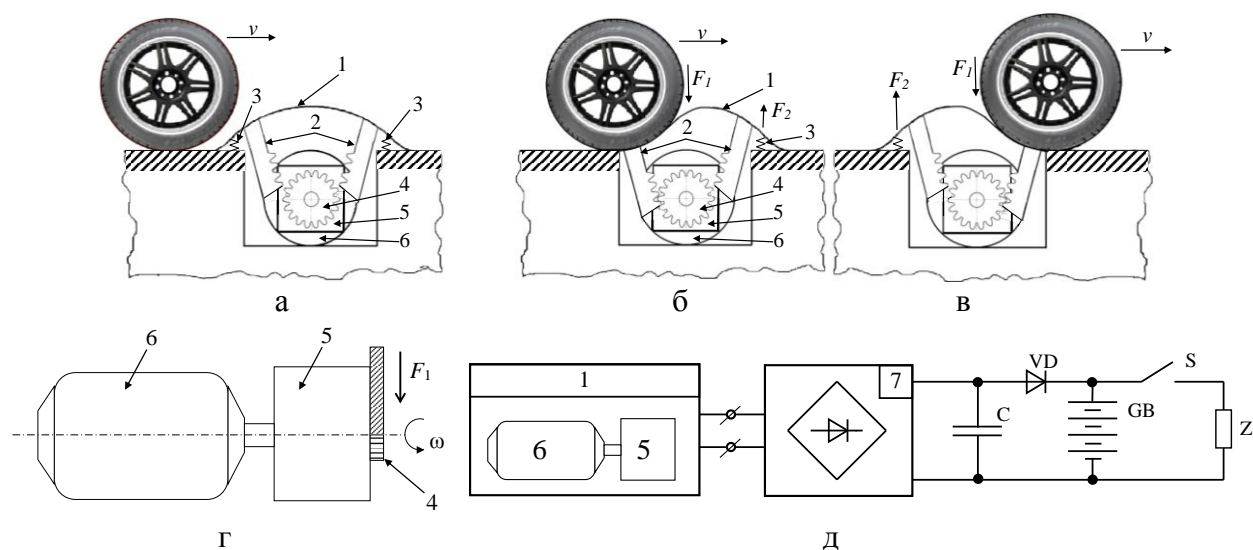
Метод генерування ЕЕ та примусового зниження швидкості.

Цей спосіб відноситься до електричних генераторів та може бути використаний для перетворення кінетичної та механічної енергії в електричну, а також для примусового зниження швидкості автотранспортних засобів.

На дану розробку автором отримано патент України № 129621 [147].

Особливістю запропонованого пристрою є те, що він виконує дві функції: під час проїзду ТЗ через нього, генерує електричну енергію; працює як звичайний обмежувач швидкості (товстолиста шина, яка кріпиться до поверхні дороги, щоб уповільнити проходження транспортних засобів). При цьому, процес перетворення кінетичної енергії в електричну буде більш ефективним за рахунок використання циліндричного мультиплікатора та більшого ходу рейки приводу електрогенератора.

Конструкція та робота пристрою для генерування електричної енергії та примусового зниження швидкості з мультиплікатором пояснюється схематичними кресленнями, представленими на рис. 3.6 і більш детально описано в роботі автора [147].



1 – товстолиста шина; 2 – рейки приводу електрогенератора; 3 – пружини; 4 – шестерня приводу електрогенератора; 5 – мультиплікатор; 6 – електрична машина (електрогенератор); 7 – електричний випрямляч; F_1 – сила натискання; F_2 – сила дії пружини; v – швидкість руху транспортного засобу; ω – кутова швидкість обертання; С – ємнісний накопичувач; VD – діод; GB – акумуляторна батарея; S – вимикач; Z – навантаження

Рисунок 3.6 – Пристрій для генерування електричної енергії та примусового зниження швидкості: а-г – конструкція пристрою; д – схема електрична принципова пристрою

Таким чином, пристрій дозволяє збільшити ефективність перетворення енергії від натискання в електричну за рахунок використання електромеханіч-

ного перетворювача енергії на базі ЕГ, який приводиться в дію через редуктор, що підвищує швидкість обертання, мультиплікатор. Крім того, пристрій виконує функцію обмежувача швидкості ТЗ [147].

Запропонований пристрій генерування електричної енергії може бути використано, як установку для обмеження швидкості транспортних засобів, яка одночасно генерує відновлювану електричну енергію. Електроенергія, вироблена пристроєм, може бути використана для додаткового електроживлення споживачів електроенергії – домашніх господарств, шкіл, офісних будівель, торгових центрів тощо.

Енергогенеруюче дорожнє покриття для зарядки електробусів.

Розробкою енергогенеруючих дорожніх покриттів (ЕДП) займаються вчені різних країн світу. Наприклад, в Нідерландах побудовано невелику ділянку траси (500 м) на якій зроблено дорожню розмітку спеціальною фарбою, що містить фото-люмінесцентний порошок [148].

Не менш цікавим є проект голландської компанії Volker Wessels, яка працює над проектом пластикового ЕДП [149]. Пластикове шосе є аналогом доріг з бетону. Передбачається, що дана дорога буде швидко монтуватися на місці з окремих панелей в середині яких будуть розміщуватися кабелі, трубопроводи, колектори та інші елементи інфраструктури.

На даний момент відомо досить багато подібних рішень і технологій. Деякі з них описані в роботах автора [37, 38, 75]. Однак, найбільш перспективними є, так звані розумні дороги [150]. Дані дороги збираються з окремих плит об'єднаних в єдину систему і мають великий функціонал, починаючи від генерування електроенергії і закінчуючи повним самообслуговуванням.

ЕДП дозволяє виробляти екологічну енергію для додаткового освітлення, використовуючи світлодіодні технології. Вимірювання та моніторинг споживання ЕЕ дає змогу отримати економічні відносини між споживачем та постачальником ЕЕ. Отриману енергію також можна використовувати для зарядки електробусів і електрокарів.

Автором даної роботи запропоноване ЕДП, яке відноситься до альтернативних джерел ЕЕ та дорожнього будівництва.

На дану розробку автором отримано патент України № 110807 [151].

ЕДП інтегровано в єдину систему і передбачає автономну експлуатацію дороги незалежно від джерел енергії (рис. 3.7). Дана система має широкі функціональні можливості. Більш детально це описано в роботах автора [7, 37–39, 75, 151, 152]. Крім стандартних функцій дороги, дане дорожнє покриття здатне працювати, як автономне джерело відновлюваної енергії [75].

Кожна панель ЕДП складається з трьох основних компонентів. Перший – це захисна верхня кришка, що виконана з високоміцного прозорого оргскла, на внутрішній стороні якого розташований електричний нагрівальний елемент у вигляді нагрівальних волокон. У підстави опор, на яких розташована захисна верхня кришка, встановлені п'єзоелектричні елементи (п'єзогенератори). Вони виробляють ЕЕ при натисканні.

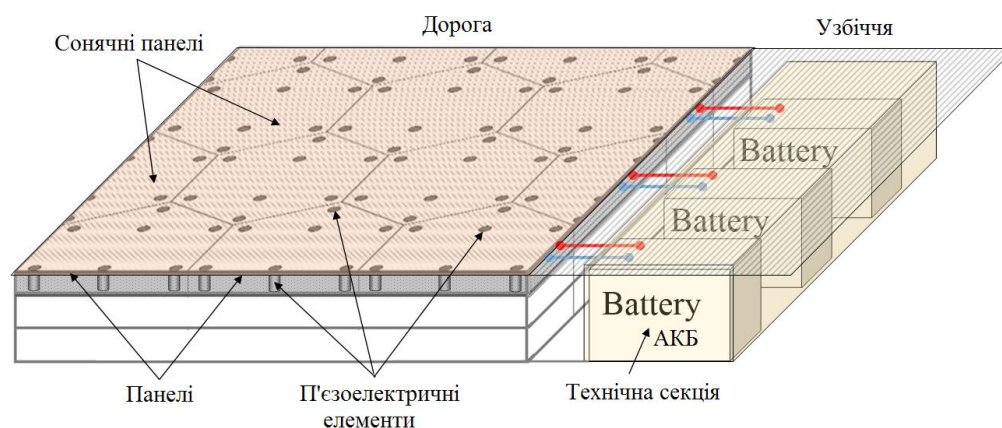


Рисунок 3.7 – Енергоефективне дорожнє покриття [26]

Другим елементом є сонячні панелі з вбудованими світлодіодами. У цьому елементі світлодіоди і сонячні елементи розташовані по всій площині панелі. Третім елементом панелі є база з електронними платами управління і кабельним каналом. До однієї АКБ підключаються від п'ятисот до тисячі таких панелей. Батарея знаходиться в технологічному відсіку поруч із дорогою на узбіччі [7, 37–39, 75, 151, 152].

Основні принципи функціонування системи ЕДП докладно описані в дослідженнях автора [7, 37–39, 75, 151, 152]. Оцінка виробництва електрое-

нергії системи стійких дорожніх покриттів надана як додатковий результат дослідження.

Проведений аналіз показав, що у якості сонячних елементів найбільш раціонально на даний момент використовувати кремнієві сонячні панелі. Це обумовлено їх ціною і доступністю на ринку. До того ж, вони мають досить високе значення коефіцієнта фотоелектричного перетворення, який на даний момент може досягати 25 % [153, 154]. Перераховані вище фактори зіграли вирішальну роль при виборі фотоелектричного модуля для ЕДП.

Проведені дослідження [155] дозволяють оцінити ефективність роботи кремнієвих панелей в складі ЕДП в залежності від умов електричного навантаження. Оскільки дане навантаження може змінюватися (це пов'язано, наприклад, зі зміною погодних умов або часу доби), то для моніторингу умов, при яких кремнієві СП будуть працювати з максимальною ефективністю, пропонується використовувати сонячний контролер МРРТ [155, 156].

Вище вже відзначалось, що фотоелектричні панелі в ЕДП будуть розташовуватися горизонтально і, отже, в залежності від місця розташування, їх ефективність буде відрізнятися. Наприклад, для середньої широти північної Європи (близько 48°) (для Північної Америки) кут падіння сонячних променів на сонячну панель, що лежить, складе близько 72° [157]. При таких зовнішніх умовах роботи фотоелектрична панель буде працювати з ефективністю приблизно 69 %. Дані обставини слід брати до уваги при розрахунку і проектуванні сучасних доріг на основі ЕДП.

Результати дослідження навантажувальних характеристик різних типів кремнієвих сонячних панелей представлені в п.п. 3.7 даної роботи.

Оцінка генерації електроенергії системою ЕДП. Заповнення однієї панелі ЕДП становить 75%. Для генерування 1 кВт·год енергії при 100 % заповненні сонячною панеллю необхідно 6,6 м² ЕДП. Тоді 75 % заповнення панелі відповідає площі $6,6 \cdot 25 / 100 = 1,65$ м².

Отже, 1 кВт·год електричної енергії може бути згенерований ділянкою дороги площею $6,6 + 1,65 = 8,25$ м².

Відповідно, для генерування 100 кВт·год ЕЕ необхідно 825 м² ЕДП.

Радіус R шестикутної панелі становить 0,46 м, тоді її площа визначається $S = 3\sqrt{3} \cdot R^2 / 2 = 3\sqrt{3} \cdot 0.46^2 / 2 = 0,55 \text{ м}^2$.

Для генерації 100 кВт·год ЕЕ кількість панелей для ЕДП $825/0,55=1500$ шт.

Для проведення індикативної оцінки була обрана дорога з двома смугами руху і шириною 7,5 м. Визначимо довжину ділянки обраної, дороги з ЕДП, яка здатна генерувати 100 кВт·год ЕЕ: $825/7,5=110$ м.

Це означає, що ділянка дороги шириною 7,5 м і довжиною 110 м здатна згенерувати 100 кВт·год ЕЕ за одну годину своєї роботи. Але слід врахувати реальні умови (затінення дороги, забруднення ЕДП, кут падіння сонячних променів на СП.), які відповідно можуть збільшити довжину цієї ділянки дороги до 150 м. Тобто в реальних умовах ділянка дороги площею 1125 м² забезпечує генерацію ЕЕ 100 кВт·год. Ця ділянка дороги буде складатися з 2045 одиниць панелей.

В одну панель ЕДП входить 150 LED RGB світлодіодів, які споживають 9,6 Вт·год ЕЕ. Тоді на 1 годину роботи LED освітлення для живлення 2045 панелей необхідно 19,7 кВт·год ЕЕ. Тут робиться оцінка з урахуванням того, що панель працює з максимальним завантаженням. Це дозволить оцінити роботу ЕДП в умовах максимального електроспоживання і сформулювати висновки про її можливості.

Кожна ЕДП панель має нагрівальний елемент потужність 25 Вт. Тоді для 1 години роботи нагрівальних елементів на 2045 панелях необхідно мати 51,125 кВт ЕЕ. Відповідно, в зимові місяці ділянка дороги, що генерує 100 кВт електроенергії, в темний час доби буде споживати за одну годину роботи $51,125+19,7=70,825$ кВт·год.

Проведені оціночні розрахунки показують, що в зимовий час в і темний час доби дорога, що складається з ЕДП панелей, на власні потреби буде витрачати близько 71 % згенерованої ЕЕ. Слід зазначити, що тут не враховувалася потужність згенерованої ЕЕ від п'єзоелектричних елементів, що також вбудовані в ЕДП. Спираючись на експериментальні дані, цю потужність для

вибраної ділянки дороги можна прийняти рівною ≈ 10 кВт·год. Звичайно, це досить умовне допущення, тому що різні дороги мають різну інтенсивність руху. А у випадку з п'єзо-електричними елементами, кількість ЕЕ, яку здатні згенерувати ЕДП панелі визначає безпосередньо інтенсивність руху. З причини таких невизначених обставин і припущень пропонується не враховувати кількість згенерованої електроенергії від п'єзо-електричних елементів. Дані елементи використовуються як датчики, показаннями яких можна визначити вагу автомобіля, напрямок і швидкість його руху. А енергія, яку вони генерують буде спрямована на живлення електронних схем ЕДП.

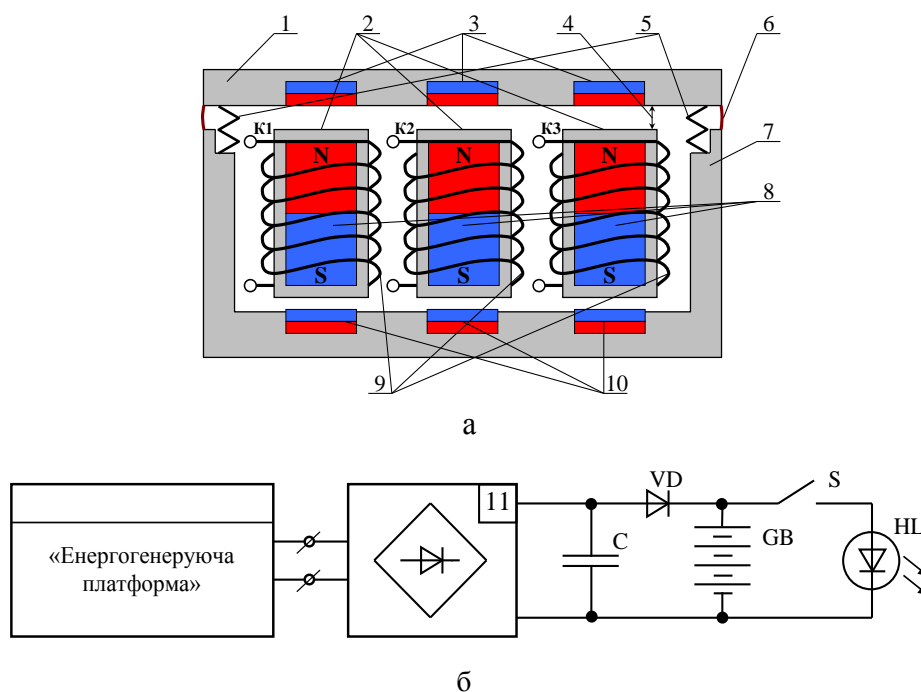
Проведені розрахунки є індикативними (оціночними) і показують можливий потенціал ЕДП для автомобільних доріг. Так, наприклад, результати проведених розрахунків дозволяють оцінити кількість згенерованої електроенергії будь-якою довільною ділянкою дороги. Наприклад, дорога з двома смугами руху шириною 7,5 м. При довжині 1 км здатна генерувати 909 кВт·год, при цьому 645 кВт·год буде витрачатися на власні потреби (оцінка для зимової пори року), а 264 кВт·год – іншими споживачами. Тобто така ділянка ЕДП здатна генерувати за один день близько $\sim 1,8$ МВт ЕЕ.

Енергогенеруюча платформа з лінійним електрогенератором.

Енергогенеруючої платформи заснована на принципі дії лінійного електрогенератора (ЕГ). На дану розробку автором отримані патенти України № 106587 і № 106588 [158, 159]. Суть запропонованого пристрою пояснюється схематичними кресленнями, рис. 3.8.

Енергогенеруюча платформа з лінійним ЕГ (рис. 3.8) має корпус, в якому співвісно розміщені ротор і статор, з можливістю їх відносного поступального переміщення у одній площині. Статор виготовлений у вигляді обмотки, що охоплює ротор. Ротор виконаний з суцільних неодимових магнітів, а у вигляді демпферних пружин використовуються плоскі неодимові магніти, що орієнтовані однаковими полюсами до полюсів ротора. Однакові кінці обмоток статора з'єднані між собою та виходять до електричного випрямляча, який випрямляє змінний струм та заряджає ємнісний накопичувач – суперко-

нденсатор (СК). СК через діод заряджає АКБ, що через вимикач підключається до навантаження, наприклад, для низьковольтного живлення [158, 159].



1 – натискна кришка; 2 – статор; 3 – неодимові магніти в натискній кришці; 4 – робочий хід натискної кришки; 5 – пружини; 6 – герметичне сполучення кришки з корпусом; 7 – корпус; 8 – неодимові магніти ротора; 9 – обмотки котушок статора (К1–К3); 10 – неодимові магніти в корпусі; 11 – електричний випрямляч; C – ємнісний нагромаджувач; VD – діод; GB – акумуляторна батарея; S – вимикач; HL – світлодіодне навантаження

Рисунок 3.8 – Енергогенеруюча платформа з лінійним електрогенератором:

а – конструкція; б – схема електрична принципова

Більш детально принцип роботи енергогенеруючої платформи з лінійним електрогенератором описано в роботах автора [158, 159].

Особливістю запропонованої розробки є те, що вона має малі ваго-габаритні показники, та може легко встановлюватися в місцях з великою кількістю пішоходів та великим потоком ТЗ.

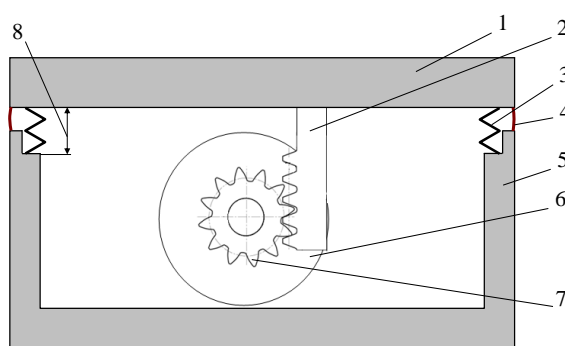
Енергогенеруюча платформа з електричною машиною обертового типу.

Цей спосіб генерування ЕЕ за принципом дії відноситься до електричних генераторів, що перетворюють кінетичну енергію та механічну енергію обертання в електричну.

На дану розробку автором отримано патент України № 121491 [42].

Суть запропонованого пристрою пояснюється схематичними кресленнями, рис. 3.9 [42, 159].

Дана розробка, як і попередня, має корпус з натискною кришкою, всередині якого співвісно розміщені ротор і статор, з можливістю ротора обертатися в магнітному полі статора. Однакові кінці обмоток статора з'єднані між собою та виходять до електричного випрямляча, який випрямляє змінний струм та заряджає ємнісний накопичувач – СК, який через діод заряджає акумуляторну батарею. Остання, через вимикач, підключається до навантаження.



1 – натискна кришка; 2 – рейка приводу електрогенератора; 3 – пружини; 4 – герметичне сполучення кришки з корпусом; 5 – корпус; 6 – електрична машина (електрогенератор); 7 – шестерня приводу електрогенератора; 8 – робочий хід натискної кришки

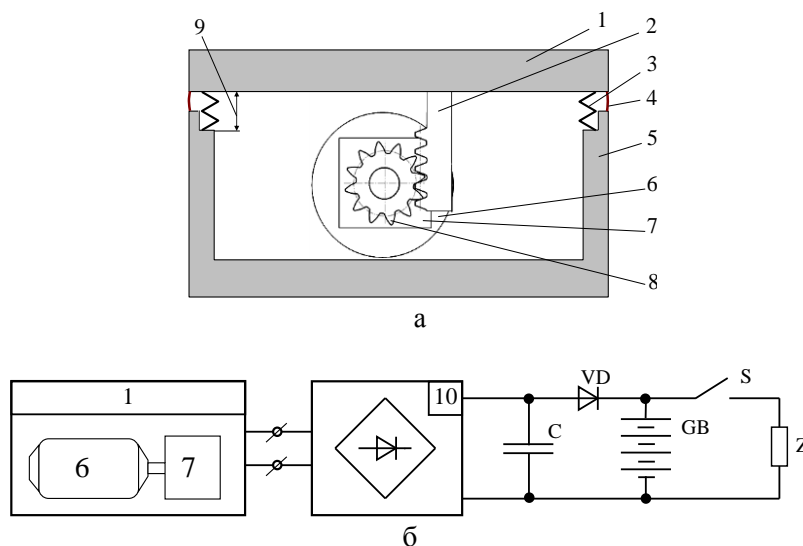
Рисунок 3.9 – Конструкція енергогенеруючої платформи з електричною машиною обертового типу

Ротор ЕГ виконано у вигляді ротора електричної машини з неодимовими магнітами, що обертається відносно своєї осі від дії рейки приводу ЕГ, яка жорстко з'єднана з натискною кришкою [42].

Більш детально принцип роботи енергогенеруючої платформи з електричною машиною обертового типу описано в роботі автора [42].

Енергогенеруюча платформа з електричною машиною обертового типу та з мультиплікатором.

Як і в попередньому випадку (рис. 3.9), цей пристрій за принципом дії відноситься до електричних генераторів, що перетворюють кінетичну та механічну енергію обертання в електричну, (рис. 3.10) [42].



1 – натискна кришка; 2 – рейка приводу електрогенератора; 3 – пружини; 4 – герметичне сполучення кришки з корпусом; 5 – корпус; 6 – електрична машина (електрогенератор); 7 – мультиплікатор; 8 – шестерня приводу електрогенератора; 9 – робочий хід натискної кришки; 10 – електричний випрямляч; С – ємнісний накопичувач; VD – діод; GB – акумуляторна батарея; S – вимикач; Z – навантаження

Рисунок 3.10 – Конструкція енергогенеруючої платформи з електричною машиною обертального типу та мультиплікатором: а – конструкція пристрою; б – схема електрична принципова пристрою

На дану розробку автором отримано патент України № 121490 [42].

Пропонується електромеханічний пристрій перетворення кінетичної енергії в електричну з електричною машиною – електрогенератором (ЕГ), що має корпус з натискною кришкою, в якому співвісно розміщені ротор і статор, з можливістю їх переміщення один відносно одного (рис. 3.10, а), при цьому однакові кінці обмоток статора з'єднані між собою та виходять до електричного випрямляча, вихідні затискачі якого під'єднані до ємнісного накопичувача – суперконденсатора. Останній через діод заряджає АКБ, що через вимикач підключається до навантаження (рис. 3.10, б). Ротор ЕГ обертається відносно своєї осі під дією рейки приводу ЕГ через циліндричний мультиплікатор, що підвищує кутову швидкість обертання.

Принцип дії даної розробки пояснюється схематичними кресленнями, рис. 3.10, а більш детально опіється у роботі автора [42].

Запропонована конструкція енергогенеруючої платформи дозволяє збільшити ефективність перетворення енергії від натискання в електричну за рахунок використання електромеханічного перетворювача енергії на базі електричної машини. При цьому габаритні показники пристрою залишаються такими ж, як і у попередніх схемах (рис. 3.8...3.10).

Аналіз схемних рішень енергогенеруючих платформ.

Найбільш простим та зрозумілим і в плані технічної реалізації, і з точки зору фізичних процесів, що протікають, представляється перше з наведених схемних рішень, рис. 3.8. Але для його ефективної роботи повинні існувати досить різкі натискання. Це очевидно з фізичного принципу його роботи [142].

Енергогенеруючі платформи, що основані на принципі дії електричних машин з обертанням ротору, є більш ефективними з точки зору перетворення кінетичної та механічної енергії обертання в електричну. Вартість і надійність малопотужних електромашинних генераторів також є прийнятними. Це обумовлено тривалим (майже двохсотрічним) їх використанням у промисловості та побуті, а отже їх масовим виробництвом та поширенням майже у всі сфери життя та діяльності людства. Це все призвело до їх вдосконалення та забезпечення гарних показників надійності і ККД [142].

Пристрій «Енергогенеруюча платформа з електричною машиною обертального типу» (рис. 3.9) – це безпосередній аналог динамо-машини [142], механічний привод якої здійснюється від рейки приводу з зубчастою передачею моменту дії. Так як хід натискної кришки у запропонованих енергогенеруючих платформах, повинен бути не більше 10 мм, то перетворення лінійного переміщення в обертання буде мати малі кінцеві показники. Природньо, що для покращення цих показників необхідно ввести додатковий елемент – мультиплікатор (редуктор). Використовуючи механічні мультиплікатори з передаточними числами від 1:2 до 1:10 можна значно підвищити ефективність пристрою та збільшити кінцевий показник генерації електроенергії.

Зрозуміло, що можна збільшити передаточне число мультиплікатора, але слід прораховувати ККД процесу перетворення енергії і ККД ланок пере-

дачі енергії та крутного моменту в ньому. Також вибір механічного мультиплікатора та його передаточного числа залежить від конструктивних особливостей енергогенеруючої платформи та від потужності електромашинного перетворювача [142]. Отже, найбільш ефективним є «Енергогенеруюча платформа з електричною машиною обертового типу та мультиплікатором», рис. 3.10. Опираючись на результати даного аналізу, було розроблено енергогенеруючу платформи з тріступеневим мультиплікатором. Експериментальні дослідження та її синтез кінематичної схеми представлено далі.

3.4 Обґрунтування вибору схеми підключення електродвигунів у електромашинному вузлі пристрою генерації електричної енергії

Експериментальні дослідження.

Для вибору схеми підключення електродвигунів у електромашинному вузлі пристрою генерації ЕЕ було розроблено макет пристрою, представлений на рис. 3.11, у відповідності до схеми, представленої на рис. 3.10, і проведено експериментальні дослідження.

Метою експериментальних досліджень є визначення енергетичних характеристик різних типів електродвигунів та оптимальної схеми підключення їх статорних обмоток, для найкращої генерації електричної енергії при короткотривалих механічних впливах.

У відповідності до вимог здійснення пристрою перетворення кінетичної енергії від натискання в електричну (конструктивні та ваго-габаритні), було відібрано два типи електродвигунів – це двигун постійного струму (ДПС) типу: 45.3730 та кроковий двигун типу: ДШ 200-1, рис. 3.12.

Експериментальні дослідження склалися з двох етапів:

1. Визначення найбільш ефективного типу електродвигуна (у відповідності до значення генерованої потужності);
2. Визначення найбільш ефективної схеми підключення статорних обмоток електродвигуна.



1 – натискна кришка; 2 – рейка приводу електрогенератора; 3 – пружина; 4 – герметичне сполучення кришки з корпусом; 5 – корпус; 6 – електрична машина (електрогенератор); 7 – мультиплікатор

Рисунок 3.11 – Експериментальний макет пристрою

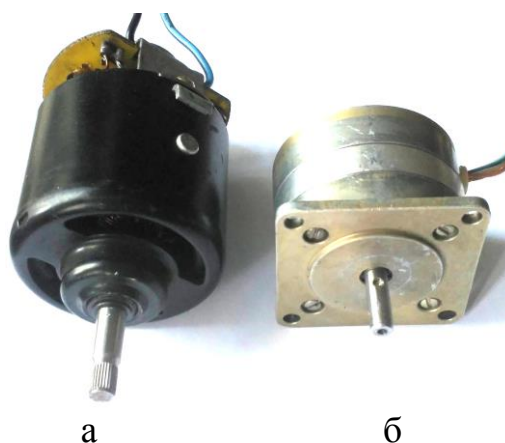


Рисунок 3.12 – Досліджувані двигуни: а – двигун постійного струму (мотор опалювача ВАЗ, тип: 45.3730); б – кроковий двигун, тип: ДШ 200-1

Для проведення експериментальних досліджень розроблено експериментальний стенд (рис. 3.13), який складається з блоку управління (БК), драйверу крокового двигуна (КД), приводного крокового електродвигуна (ПКД) типу ДШ 200, до валу якого підключається досліджуваний електродвигун (ДД) в режимі генератора.

Напруга, що генерується досліджуваним двигуном при обертанні, подається на блок випрямлення, фільтрації та навантаження (БВФН) і далі на вимірювальний канал осцилографа для фіксації результатів.

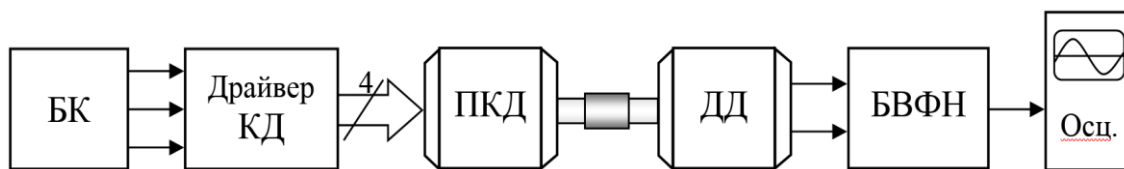


Рисунок 3.13. Структурна схема експериментального стенду дослідження енергетичних характеристик роботи ЕД у якості генераторів

За принципом роботи пристрою генерації енергії від натискання примусове обертання двигуна здійснюється при натисканні через мультиплікатор в одному напрямку, а при відпусканні в зворотному, ці фази розділяються паузою при перенесенні ваги тіла людини. Весь процес триває близько секунди, тому за основу було вибрано такі часові параметри 300 мс на натискання, 100 мс пауза і 300 мс на зворотну дію пружини. Управління приводним двигуном здійснюється так, що він робить один повний оберт в одному напрямку, зупиняється та робить один оберт у зворотному напрямку, саме тому у якості приводного двигуна виступає кроковий двигун. Для всіх експериментальних досліджень час обертання приводного електродвигуна є сталим та незмінним.

Зовнішній вигляд експериментального стенду дослідження енергетичних характеристик роботи ЕД як генераторів наведено на рис. 3.14.



Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд експериментального стенду

На відміну від колекторного двигуна, досліджуваний кроковий двигун ДШ 200-1 має дві пари статорних обмоток, що дозволяє використати лише ча-

стину обмотки (рис. 3.15, а), а також включати їх в уніполярному (рис. 3.15, б) та біполярному (рис. 3.15, в) з'єднанні.

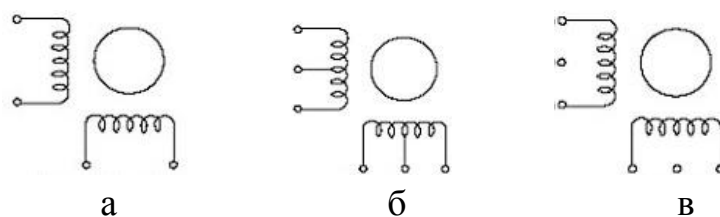


Рисунок 3.15 – Схеми з'єднання обмоток ДШ 200-1: а – однофазна; б – уніполярна; в – біполярна

Для виключення різноманітних похибок при вимірюваннях та для проведення їх в однакових умовах, виміри проводяться лише на одній парі статорної обмотки КД. В залежності від схеми з'єднання статорних обмоток використовувались дві схеми блоку випрямлення напруги рис. 3.16.

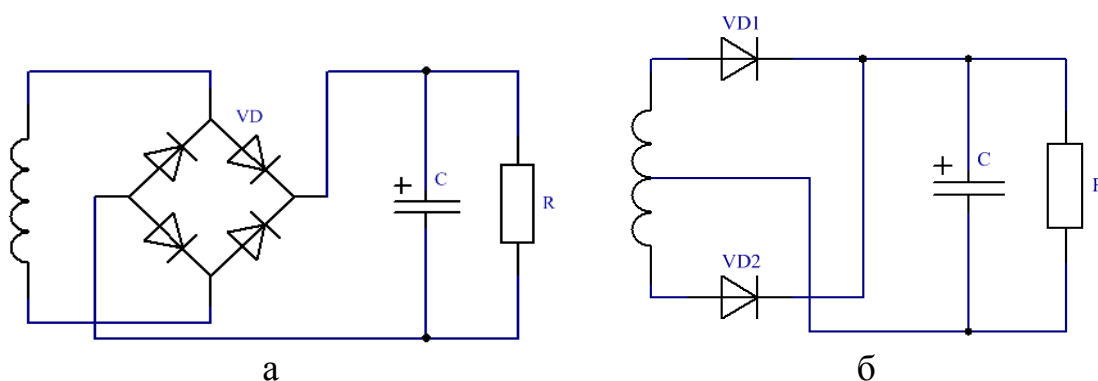


Рисунок 3.16 – Схема блоку випрямлення напруги: а – мостова; б – з середньою точкою

Зі статорної обмотки КД вимірюється сигнал напруги на активному опорі R . При відомому значенні опору навантаження та проводячи вимірювання залежність напруги від часу $u = f(t)$, можна розрахувати залежність генерованої потужності від часу $p = f(t)$ у відповідності до закону Ома [160]:

$$u(t) = R \cdot i(t), \quad (3.1)$$

де $u(t)$ – змінна напруга, В;

R – активний опір кола, Ом;

$i(t)$ – змінний струм, А.

Миттєва потужність, що виділяється на опорі визначається:

$$P = ui = Ri^2 = u^2 / R, \quad (3.2)$$

де P – миттєва потужність, Вт;

$$u = u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Відомо, що для резистора $\psi_u = \psi_i$, тоді для потужності p отримаємо:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u); \quad (3.3)$$

З рівняння (2.3) видно, що миттєва потужність завжди більше нуля і змінюється у часі. У таких випадках прийнято розглядати середню за період T потужність:

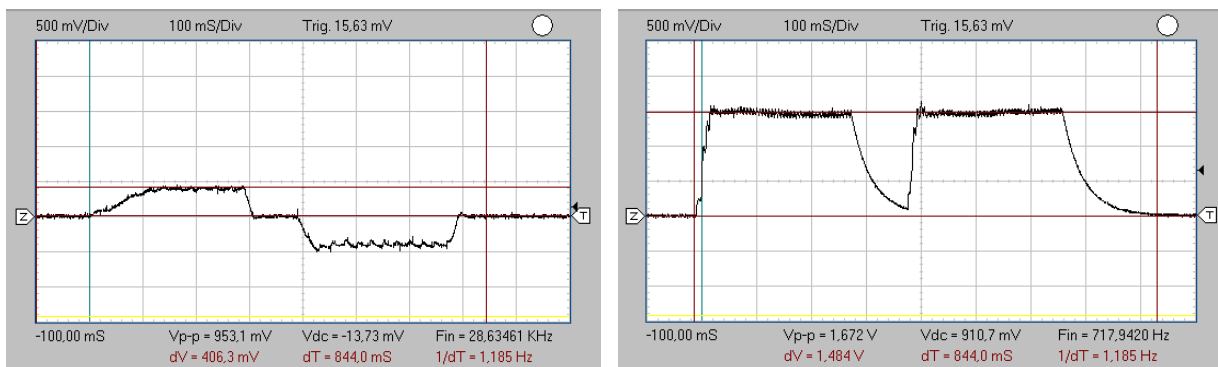
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{U_m I_m}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t + \psi_u) dt. \quad (3.4)$$

Виконавши інтегрування функції отриманих кривих $p = f(t)$ можна визначити значення генерованої потужності енергогенеруючою плиткою.

Перший етап досліджень. Схема експериментального стенду представлена на рис. 3.13, схеми підключення статорних обмоток обох типів двигунів відповідають рис. 3.15,а.

Спочатку проведено дослідження з електродвигуном постійного струму типу 45.3730, потім з кроковим електродвигуном ДШ 200-1.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 3.17.



а

б

Рисунок 3.17 – Вимірювання кривої напруги на статорній обмотці електродвигунів: а – ДПС; б – кроковий двигун

Слід зазначити, що вимірювання кривої напруги на двигуні постійного струму проводилось без випрямлення сигналу (без електричного випрямляча), в той час, як на кроковому двигуні сигнал був випрямлений за мостовою схемою. Це пов'язано з тим, що виміряні амплітудні значення напруги відрізняються більш ніж в 3,5 рази. Отже, очевидно, що більш ефективним є кроковий двигун, тому не має необхідності в випрямленні сигналу від ДПС, для подальших розрахунків. Також слід вказати на те, що на схемі випрямлення втрачається потужність сигналу, тобто його майже не видно (у вибраному масштабі), отже втрачається наочність.

Другий етап досліджень. На другому етапі проведено визначення найбільш ефективної схеми підключення статорних обмоток крокового ЕД. Схеми підключення статорних обмоток ДШ 200-1 представлені на рис. 2.15, б,в. Схема експериментального стенду представлена на рис. 3.13. Для кожної схеми проведено вимірювання кривої генерованої напруги. Результати даних досліджень представлені у вигляді осцилограм на рис. 3.18.

Аналіз результатів експериментальних досліджень.

Для отримання графіку генерованої потужності у відповідності до виразів (3.2) та (3.4), необхідно провести інтегрування функції, що описує виміряні сигнали, рис. 3.18. Інтегрування проведено у відповідності до методу трапецій [41]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \cdot \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right), \quad (3.5)$$

де $[a; b]$ – відрізок (границі) інтегрування;

$$h = \frac{a-b}{n} \text{ – крок розбиття;}$$

$$i = 0, 1, \dots, n;$$

$f(x)$ – значення підінтегральної функції.

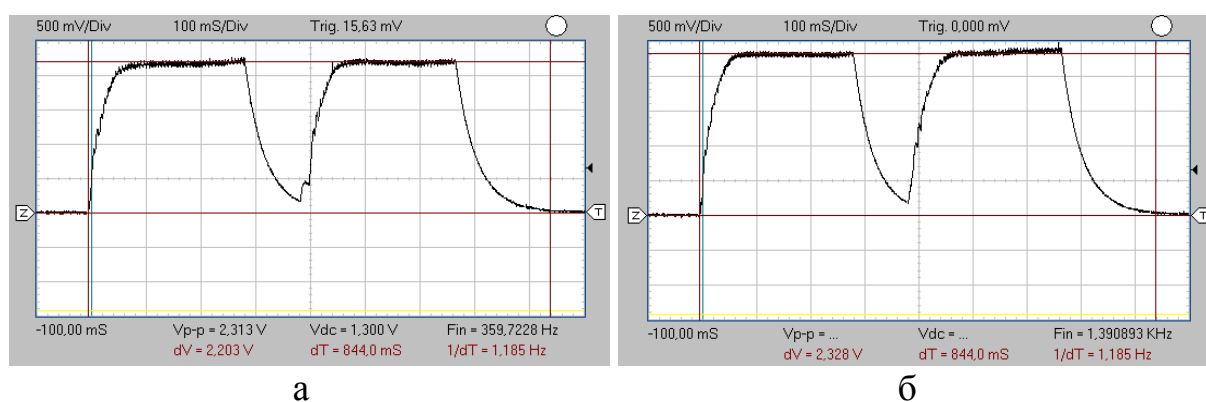


Рисунок 3.18 – Вимірювання кривої напруги на статорній обмотці електродвигунів ДШ 200-1: а – схема рис. 3.15,б; б – схема рис. 3.15,в

Відповідно до умов проведених експериментальних досліджень вираз (3.5), для визначення значення генерованої потужності можна записати:

$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \cdot \left(p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (3.6)$$

Результати проведеної обробки експериментальних досліджень у відповідності до виразу (3.6) представлені у вигляді графічної залежності $p=f(t)$ на рис. 3.19.

Значення генерованої потужності, що розраховані при обробці експериментальних досліджень за виразом (3.5) приведені у таблиці 3.2.

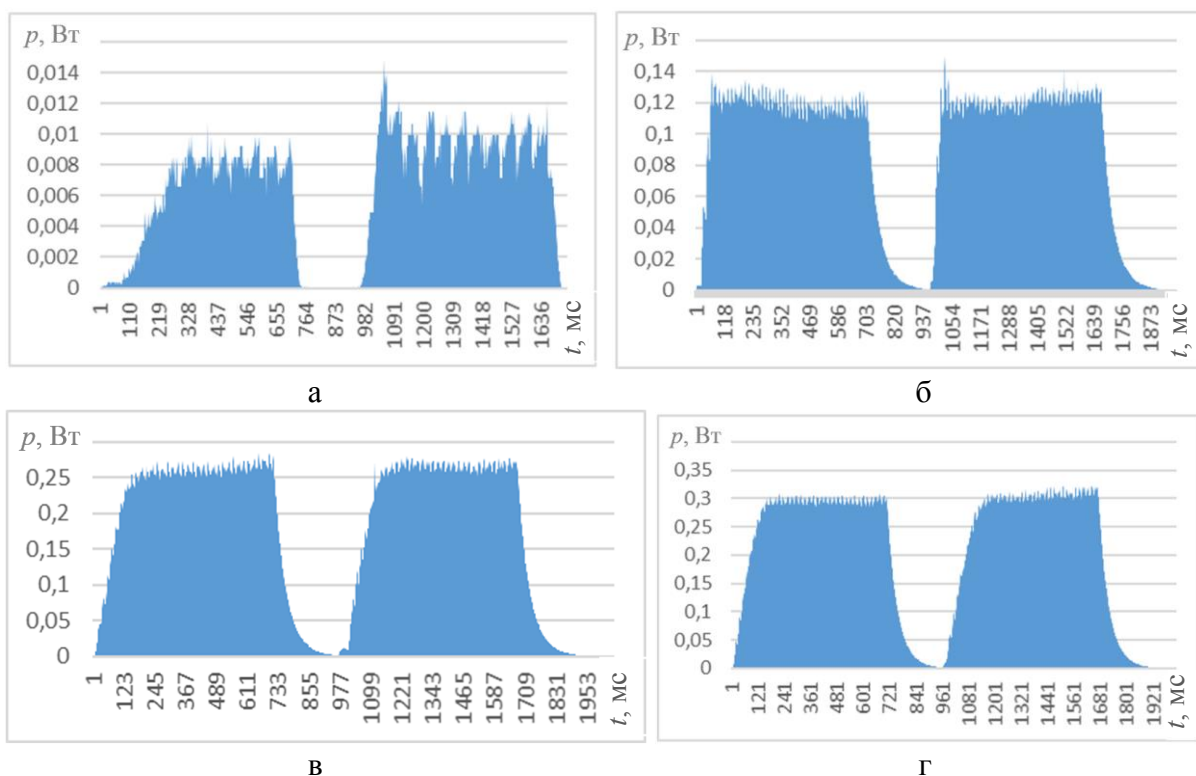


Рисунок 3.19 – Залежність генерованої потужності від часу: а – ДПС;
 б – ДШ 200-1 схема рис. 3.15,а; в – ДШ 200-1 схема рис. 3.15,б;
 г – ДШ 200-1 схема рис. 3.15,в

Таблиця 3.2 – Значення генерованої потужності

ДПС	ДШ 200-1(схеми з'єднання обмотки)		
	рис. 3.15,а	рис. 3.15,б	рис. 3.15,в
0,004 Вт	0,069 Вт	0,143 Вт	0,164 Вт

Результати проведених розрахунків показують, що за одне обертання в прямому та зворотному напрямку з частотою $f = 1,185$ Гц більш ефективним є кроковий двигун ДШ 200-1.

Інтегрування вимірних осцилограм показало, що найбільш ефективною, з точки зору генерованої потужності, є схема з'єднання статорних обмоток крокового двигуна, що приведена на рис. 3.15, в. Отже, якщо стоїть задача отримати максимальне значення потужності, що генерує електромашинний вузол на основі крокового двигуна ДШ 200-1, то доцільно його статорну обмотку з'єднувати за даною схемою.

Досліджуваний електромашинний вузол у поєднанні з редуктором (мультиплікатором), що підвищує, може знайти своє застосування для підвищення ефективності електробусів у пристроях чи системах, що перетворюють механічну енергію обертання в електричну.

3.5 Синтез кінематичної схеми енергогенеруючої платформи з тріступеневим мультиплікатором

Конструкція енергогенеруючої панелі.

Енергогенеруюча панель може включати декілька електромашинних вузлів, що генерують ЕЕ, або декілька ЕД в одному електромашинному вузлі, що детально описано в роботі автора [161]. Потрібно визначити ступінь впливу кількості ЕД в електромашинному вузлі енергогенеруючої плитки на значення генерованої електроенергії.

Схема електрична-принципова енергогенеруючої платформи представлена на рис. 3.20. У відповідності до неї була розроблена конструкція платформи, рис. 3.21.

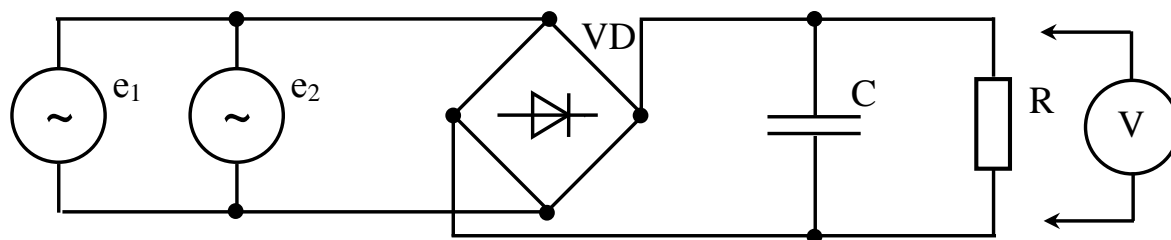
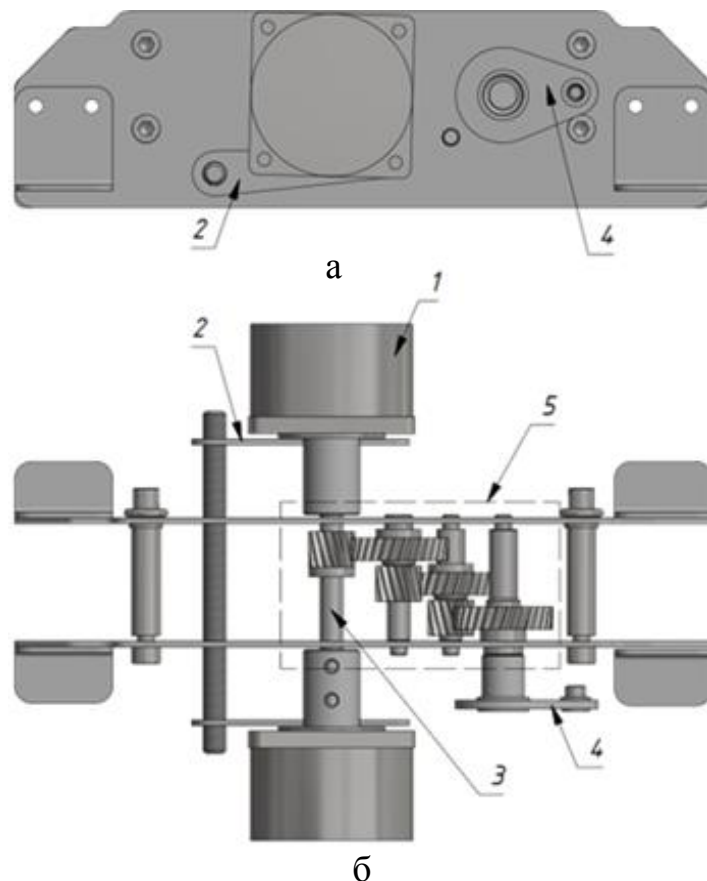


Рисунок 3.20 – Електрична схема енергогенеруючої плитки

У відповідності до рис. 3.20 та рис. 3.21, енергогенеруюча панель має у складі електромашинного вузла два крокових двигуна (КД), які з'єднані паралельно у відношенні до електричного навантаження. Вони працюють за паралельною схемою на одне навантаження, якщо розглядати їх генераторний режим роботи. Зі статорної обмотки КД вимірюється сигнал напруги на активному опорі R . При відомому значенні опору навантаження та проводячи

вимірювання залежність напруги від часу $u = f(t)$, можна розрахувати залежність генерованої потужності від часу $p = f(t)$ у відповідності до закону Ома (3.1).



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

Рисунок 3.21 – Конструкція електромашинного вузла енергогенеруючої панелі: а – вид збоку; б – вид зверху

Миттєва потужність, що виділяється на опорі визначається за виразом (3.2), потужність p за виразом (3.3), а середня за період потужність за виразом (3.4).

Виконавши інтегрування отриманих кривих $p = f(t)$ можна визначити значення генерованої потужності енергогенеруючою плиткою.

Синтез кінематичної схеми триступеневого мультиплікатора.

Першою проблемою, яка виникає при створенні прототипу, є мінімізація переміщення (опускання) платформи в момент, коли на неї наступає лю-

дина. Якщо це переміщення велике, то людині, що наступає на платформу, з одного боку, може здаватися, що вона падає, а з іншого боку, вона може втратити рівновагу від несподіваного опускання платформи.

Таким чином, щоб забезпечити прийнятний рівень напруги на виході генераторів, необхідно перетворити невеликий рух вхідної ланки (каскаду) у відносно великий кут повороту валу генератора електричної машини. Для цього було вирішено використовувати мультиплікатор і кривошипний механізм.

Для синтезу кінематичної схеми мультиплікатора вибираємо поширену схему. Слід зазначити, що на даний момент стан виробничих об'єктів Харкова значно обмежує діапазон деталей, які можуть бути застосовані для прототипу. Було прийнято рішення використовувати стандартні деталі з побутової техніки, яких є чимало на ринку запасних частин. Такий підхід пояснюється ще тим, що вартість виготовлення зубчастого колеса може досягати до 1500 грн., тоді як пара запасних коліс (шестерня – редуктор) коштує близько 120 грн.

Таким чином, головним приводним елементом була обрана пара гвинтових зубчастих коліс з модулем 1,5 і кількістю зубців – 14, а також шестерня з кількістю зубців – 30. Така пара може збільшити кут повороту валу генератора в 2,14 рази (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Пара зубчастих коліс, що використовується в мультиплікаторі

Для забезпечення кута повороту валу генератора в одному циклі порядку 4000...5000 необхідно використовувати триступеневий мультиплікатор. Загальний вигляд схеми компоновання множника представлено на рис. 3.21.

Розглянемо детальніше будову блоку генератора, рис. 3.21. Для генерації

напруги використовуються два крокових двигуна типу ДШИ-200 1, встановлені співвісно на вихідному валу множника 3 (мультиплікатора).

Щоб запобігти обертанню двигунів, вони закріплені проти обертання двома стрижнями за допомогою триступеневого мультиплікатора 5, вхідний рух якого задається кривошипом 4. Таким чином, загальне відношення передач становить:

$$e_{\Sigma} = e_1 \cdot e_2 \cdot e_3 = 9,8. \quad (3.7)$$

Генераторний блок крокового двигуна був вибраний на основі результатів експериментальних досліджень, які детально описані в роботі [20]. Проведені дослідження показали, що в даних умовах роботи і для представленої конструкції (повторно-короткочасний режим) найліпші енергетичні показники мають крокові двигуни ДШИ-200. Це наглядно видно з отриманих графіків генерованої енергії різними типами електродвигунів [5].

Важливим кроком для подальшої конструкції електроприводу є дослідження реального моменту опору на вхідному валу множника. Інша складність полягає в тому, що гвинтові зубчасті колеса викликають появу осьової сили, що, у свою чергу, з огляду на використання підшипників валу, призводить до зниження загальної ефективності.

Вимірювання моменту опору проводилося шляхом вимірювання максимальної сили, що прикладається до кривошипа. Загальне компонування стенда для вимірювання сили показано на рис. 3.23.

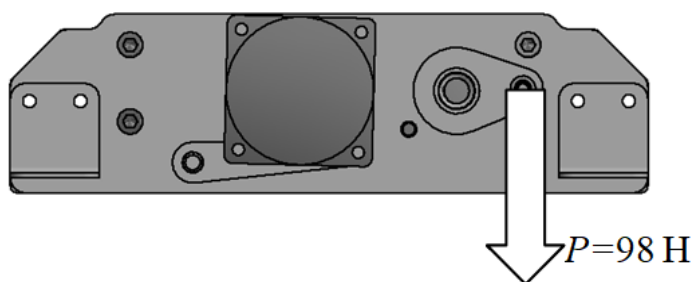


Рисунок 3.23 – Схема прикладання сили корисного опору

При експериментальних вимірах сила P склала 98 Н. Для аналізу силової схеми впливу на щабель платформи опишемо всі сили, що діють на неї. По кутах на платформі встановлені пружини, які будуть деформуватися під вагою людини і забезпечуватимуть повернення платформи в початкове положення. Сила пружності пружини F_{pr} показана на рис. 3.24. У центрі платформи діє реакція F_{ps} (ця сила була виміряна експериментально і становить 98 Н) з боку шатуна, встановленого на рукоятці мультиплікатора. Зверху на платформу діє вага людини G_p . Візьмемо середнє значення цієї сили, що дорівнює $G_p=700$ Н.

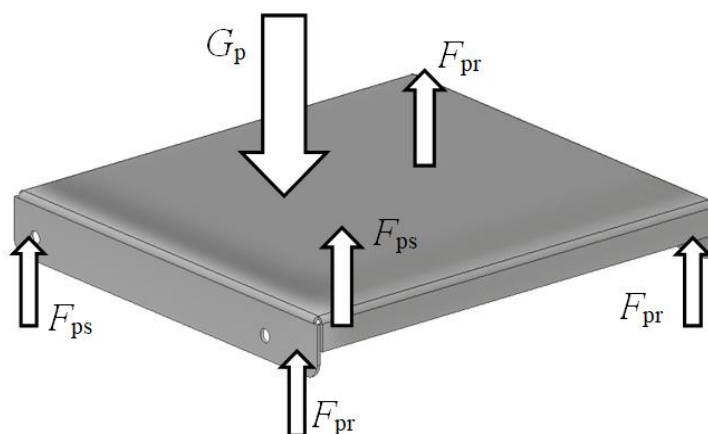


Рисунок 3.24 – Схема сил, що діють на платформу

Таким чином, аналізуючи дану схему сил, можна виділити кілька умов, що забезпечують роботу механізму:

- вага людини (G_p) повинна бути більше, ніж сума сили корисного опору (F_{ps}) і максимальної загальної сили опору пружин ($4F_{pr}$), щоб платформа рухалася вниз;
- загальна сила опору пружин ($4F_{pr}$) повинна бути більшою, ніж сила корисного опору (F_{ps}), щоб платформа поверталася в початкове положення.

Аналітично ці умови можна записати таким чином:

$$G_p > F_{ps} + 4F_{pr}$$

$$4F_{pr} > F_{ps}$$

Тобто коли людина важить близько 70 кг, платформа повинна забезпечувати задану силу на кривошипі порядку 100 Н, що призведе до деформації пружин. Виходячи з наведених вище умов, можна вибрати пружини з відповідним коефіцієнтом жорсткості. Загальна схема платформи показана на рис. 3.25.

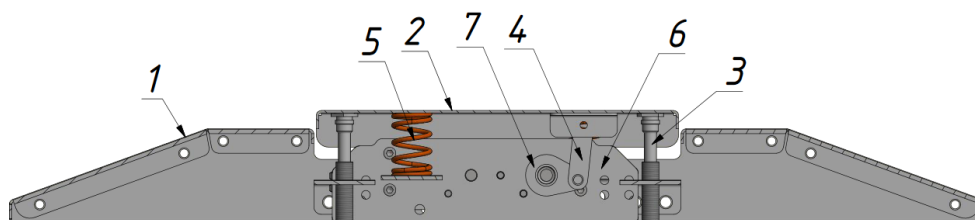


Рисунок 3.25 – Загальна схема енергогенеруючої платформи

Поступальний рух платформи 2 забезпечує чотири циліндричних напрямних 3. Цей поступальний рух перетворюється в обертальний рух кривошипа 7 триступеневого мультиплікатора 6 за допомогою шатуна 4. В той же час платформі передається початок робочого ходу з використанням чотирьох зворотних пружин 5. Робочі елементи покриваються з обох сторін двома скатами 1.

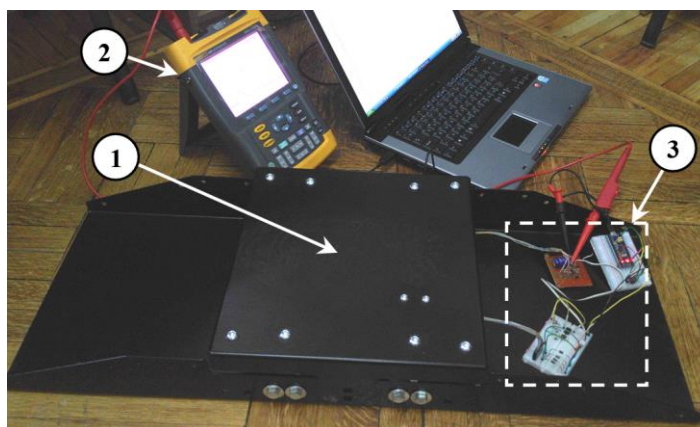
Платформу спроектовано так, що всі основні робочі елементи знаходяться в центрі, під платформою 2. Під скатами 1 зліва і праворуч від платформи є порожнини. Вони призначені для установки в них електронних плат управління, а також АКБ, які забезпечать накопичення електричної енергії при роботі пристрою, рис. 3.25.

Експериментальні дослідження.

За результатами проведених досліджень було виготовлено експериментальний зразок енергогенеруючої платформи. Зовнішній вигляд пристрою представлений на рис. 3.26.

У відповідності до електричної схеми, рис. 3.20, було вибрано опір навантаження $R = 18$ Ом. Цифровим вольтметром V вимірюється сигнал напруги на опорі R та розраховується струм навантаження. Потім розраховується потужність, яка виділяється на даному опорі. Для зменшення похибки вимірювання досліди були поділені на 100 серій по 10 кроків на енергогенеруючу па-

нель. В експериментальних дослідженнях приймало участь 5 чоловік з вагою від 50 кг до 90 кг. Швидкість кроків – 5 км/год.



1 – натискна кришка енергогенеруючої плити; 2 – осцилограф; 3 – система управління
Рисунок 3.26 – Зовнішній вигляд енергогенеруючої платформи

На рис. 3.27 представлено експериментальний зразок мультиплікатора з підключеними до нього двома кроковими двигунами ДСШИ200.

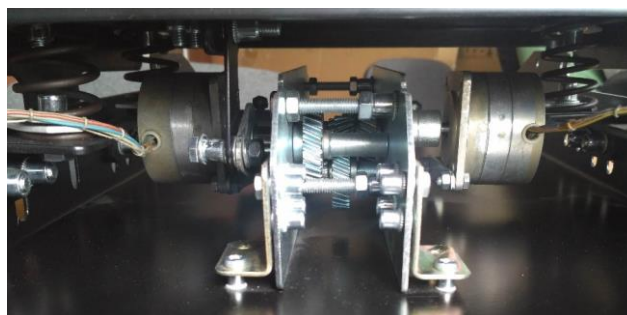


Рисунок 3.27 – Зовнішній вигляд мультиплікатора енергогенеруючої платформи

Це обладнання знаходиться під центральною панеллю 2. Даний варіант мультиплікатора був розроблений з умовою подальшого виготовлення його в серійному виробництві. Тобто, його вузли і деталі широко представлені на сучасному ринку, а його конструкція є універсальною. Це дозволяє легко провести монтаж мультиплікатора, не використовуючи при цьому додаткове (допоміжне) обладнання.

На рис. 3.28 представлено фото експериментального дослідження енергогенеруючої платформи.



Рисунок 3.28 – Експериментальні дослідження енергогенеруючої платформи

Типові осцилограми вимірних сигналів напруги $u = f(t)$ представлено на рис. 3.29. Кожен крок генерує два імпульси напруги.

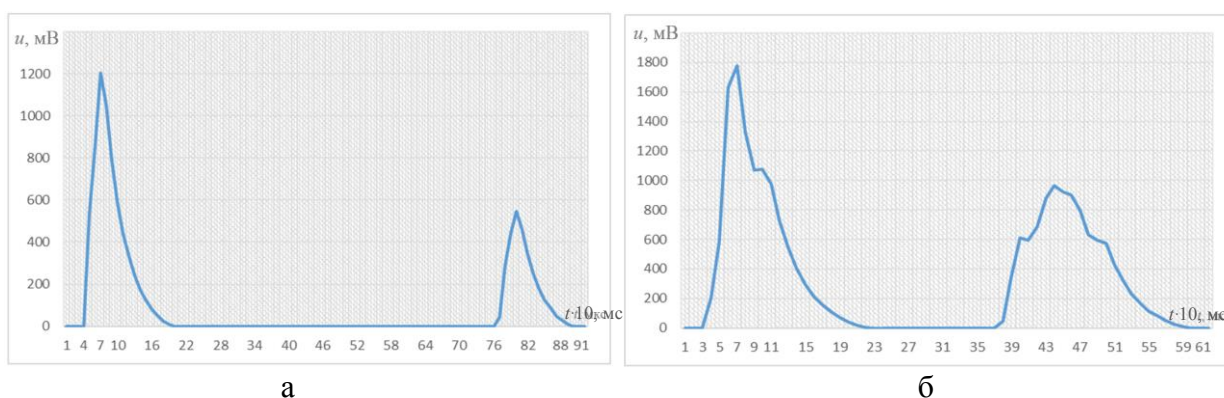


Рисунок 3.29 – Осцилограми залежності $u = f(t)$, що виміряні при виконанні одного кроку на енергогенеруючу платформу:

а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Всі вимірювання проводились на активному опорі $R = 18 \text{ Ом}$. У відповідності до закону Ома (3.8) було визначено струм та потужність, що виділяється на даному опорі при натисканні на енергогенеруючу плитку.

Графік генерованої потужності у відповідності до виразів (3.2) та (3.4), можна отримати виконавши інтегрування вимірних осцилограм (рис. 3.29). Інтегрування осцилограм проведено у відповідності до методу трапецій [20]:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \left(f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right), \quad (3.8)$$

де $[a; b]$ – відрізок (границі) інтегрування;

$$h = \frac{a-b}{n} \text{ – крок розбиття;}$$

$$i = 0, 1, \dots, n;$$

$f(x)$ – значення підінтегральної функції.

Вираз (3.8), може бути записаний у вигляді:

$$P = \int_0^T p(t)dt \approx \frac{h}{2} \cdot \left(p(t_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} p(t_i) + p(t_n) \right). \quad (3.9)$$

У відповідності до виразу (3.9) проведемо інтегрування функцій вимірних осцилограм $u = f(t)$, що представлені на рис. 3.29.

На рис. 3.30 представлено отриману графічну залежність $p = f(t)$ при одному кроці на енергогенеруючу плитку.

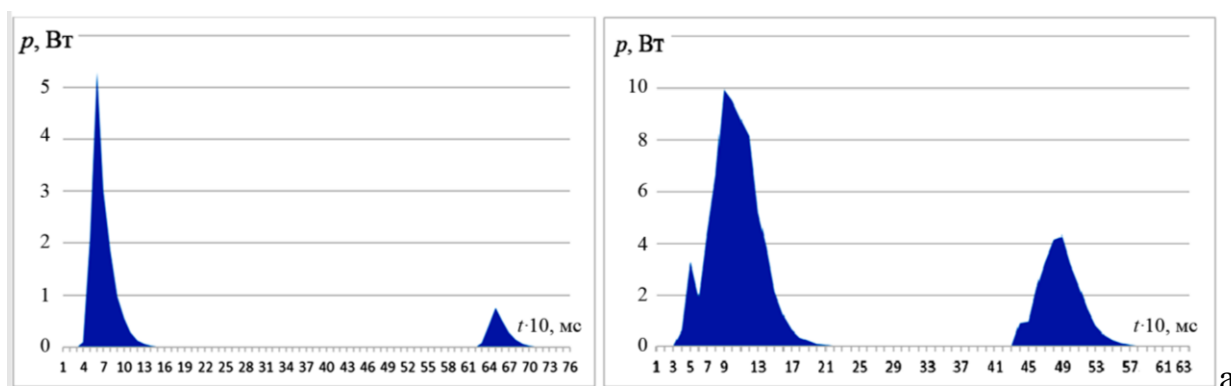


Рисунок 3.30 – Залежність генерованої потужності від часу:

а – при підключенні одного КД; б – при підключенні двох КД

Значення генерованої потужності, що розраховані при обробці експериментальних досліджень за виразом (3.9) для однієї серії з 10 кроків наведено у

таблиці 3.3, де k – коефіцієнт підсилення (показує ступінь збільшення значення генерації при підключенні двох КД).

Аналіз проведених експериментальних досліджень та їх обробка показують, що підключення двох КД до електромашинного вузлу енергогенеруючої плити дає змогу підвищити значення генерованої електроенергії приблизно в 3,9 рази. Отриманий результат цілком відповідає принципам протікання електромеханічних процесів, що описує теорія електроприводу та базові закони теоретичних основ електротехніки. Так, у відповідності до закону Ома (3.1), а також аналітичних виразів (3.2)...(3.4), потужність, що виділяється на активному опорі в електричному колі, являє собою квадратичну залежність від електричного струму, що протікає по даному опору.

Таблиця 3.3 – Значення генерованої потужності

	Серії по 10 кроків										Середнє арифмет.
	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

Один крок на енергогенеруючу плитку може в середньому генерувати близько 1,16 Вт електроенергії.

Значення генерованої енергії від одного кроку на енергогенеруючу плитку в більшій мірі залежить не від ваги людини, а від того, як швидко (різко) робиться крок. Чим швидше темп ходьби та більш різко виконуються кроки, тим більше енергії генерується.

Розроблений метод може знайти досить широке застосування в сфері транспорту та його інфраструктури. Наприклад, енергогенеруючими платформами можна обладнати зупинки громадського транспорту, де пішоходи, проходячи по даним пристроям, самі будуть генерувати енергію. Цю енергію можна використовувати, наприклад, для зовнішнього освітлення, для обігріву зупинок в холодну пору доби, для зарядки мобільних телефонів на зупинках тощо. При цьому важливо відзначити, енергогенеруюча платформа є «зеленим», додатковим поновлюваним джерелом енергії.

Не менш важливим є застосування енергогенеруючої платформи безпосередньо на громадському транспорті, де практично завжди спостерігається велика прохідність людей. Це можуть бути, наприклад, автобусні сходишки (платформи). Особливо актуальним цей пристрій є для електробусів, тому що пасажери, проходячи по таким платформам можуть генерувати додаткову ЕЕ, яка може бути спрямована для забезпечення власних потреб електробуса (освітлення, вентиляції, роботи інформаційних табло тощо). Такі пристрої сприятимуть більш ефективному використанню електроенергії і забезпечуватимуть її економію. Тобто, комплексне застосування запропонованих пристроїв в сфері громадського транспорту дозволить покрити частину витрат на ЕЕ, а з іншого боку, дозволить розвантажити основні електромережі і виконати енергетичне балансування енергосистеми.

3.6 Схеми сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів

За інформацією міжнародної організації REN21 (підрозділ Міжнародного агентства щодо відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)), тільки за 2016 р. у ВДЕ інвестували \$ 287,5 млрд [45].

Сонячна енергетика – одна з тих галузей відновлюваної енергії, що розвивається найбільш динамічно. Вона заснована на перетворенні сонячної радіації в ЕЕ і є екологічно чистою. Її розвиток стимулюється також і економічними факторами – постійно зростаючими цінами на традиційні джерела енергії (вугілля, нафту, торф, газ), зниженням вартості обладнання для сонячних станцій при збільшенні їх продуктивності. Це в цілому призводить до зниження собівартості виробленої електроенергії [45].

У сонячній енергетиці можна виділити два напрямки перетворення сонячної енергії: пряме перетворення сонячного випромінювання в електричний струм і багатоступеневе (тобто перетворення сонячної енергії в теплову, потім в механічну роботу, а потім в електрику). Поки що кращих результатів досягнуто у другому напрямку [162]. Але такі сонячні системи надзвичайно

складні та дорогі. Вони ефективні в умовах дуже високої сонячної активності та ще не дуже широко використовуються у світі. Тому прямі перетворювачі сонячної радіації – фотоелектричні панелі посідають провідне місце у світі переробки сонячної енергії. Продуктивність стандартних промислових сонячних панелей, залежно від технології, становить від 5 % до 22 %. Наразі технології вдосконалюються і вже розробляються й випробовуються нові сонячні батареї з ефективністю в межах 40% [45, 162].

Від конструкції сонячних електростанцій (СЕ) залежать способи перетворення сонячної енергії [163, 164].

Найпоширеніший тип СЕ заснований на плоских фотоелектричних модулях (сонячних панелях) монокристалічного або полікристалічного типу, завдяки яким відбувається перетворення сонячної енергії в постійний струм.

Залежно від схеми, що застосовується, постійний струм може інвертуватися в змінний або стабілізуватися для заряду АКБ [165].

Починаючи з 2000 р. потужність СЕ в світі кожні три роки збільшується в два рази. Розвиток сонячної енергетики йде шляхом збільшення ККД сонячних елементів, паралельно вирішуючи такі завдання, як зниження їх вартості, збільшення терміну служби і стабільності роботи при різних зовнішніх умовах експлуатації [162, 166].

Першими фотоелектричними сонячними елементами з ефективністю близько 6 % стали елементи на основі кристалічного кремнію, які на даний час складають 90 % всього ринку виробництва сонячних панелей (СП) і мають в середньому ККД 20 %. Та вони мають ряд недоліків: високу вартість виробництва, токсичність процесу виготовлення, велику кількість токсичних відходів тощо [162, 164, 166–168].

До другого покоління СП з середнім ККД 15 % відносяться тонко плівкові елементи [162, 164].

До елементів третього покоління з ККД органічного полімеру близько 5 % відносяться органічні та багаточарові сонячні елементи [169, 170], а саме так звані каскадні, або багатоперехідні СП, в яких фотоелектричний мате-

ріал утворений багат шаровою структурою із загальною товщиною 1-5 мкм, що містить від 2 до 4 напівпровідникових переходів. Саме для таких сонячних елементів отримані ККД 45-46 % [45, 162, 168–170].

З проведеного аналізу та моніторингу ринку СП, стає очевидним, що найбільш поширеними є полі- і монокристалічні фотоелементи. Вони займають близько 90 % ринку СП і є найбільш доступними. Та на ефективність їх роботи також дуже впливає вибір схеми за якою вони підключені. Тому є актуальним проведення аналізу існуючих схем побудови СЕ на фотоелектричних модулях з розробкою рекомендацій щодо схемної реалізації сонячної зарядної станції для електромобілів і електробусів [45].

Автономна сонячна електростанція постійного струму. У відповідності до принципу роботи даної СЕ, сонячна енергія, що потрапляє на сонячні панелі (СП), перетворюється в постійний електричний струм. СП з'єднані з контролерами заряду АКБ. Вдень, коли сонце активне, генерована електроенергія накопичується в акумуляторних батареях. І вже надалі вона може використовуватися для живлення споживачів постійного струму [165].

Схема СЕ автономного типу постійного струму представлена на рис. 3.17, де контролер заряду – це електронний пристрій з вбудованим конвертором постійного струму DC/DC, що оптимізує параметри енергії між сонячними панелями і АКБ [45].

На цей час великою популярністю користуються 2 види контролерів заряду, а саме: ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) і МРРТ (maximum power point tracking – максимальної можливої потужності на виході).



Рисунок 3.17 – Схема СЕ автономного типу постійного струму

Принцип роботи ШІМ контролера заряду СП заснований на досягненні постійної напруги на акумуляторі. ШІМ-контролери (PWM-типу) забезпечують заряд АКБ. У від'ємнісних накопичувачів пропонується використовувати свинцево-кислотні герметизовані батареї [45].

Технічні характеристики СЕ автономного типу постійного струму:

- ефективність роботи – 97...98 %.
- складові: СП; контролер заряду; АКБ.
- робота за «зеленим» тарифом неможлива.

Робота МРРТ контролера заряду заснована на пошуку точки максимальної потужності. Тобто, це пошук значення напруги і сили струму, при яких параметри яскравості світла, нагрівання СП і кута падіння променів сонця будуть максимально ефективними. МРРТ контролери заряду можуть заряджати ємнісні свинцево-кислотні, свинцево-сурм'яністі, нікель-кадмієві або літій-залізо-фосфатні накопичувачі енергії більш високого класу [45, 165].

Ці сонячні електростанції будуть ефективні в тих випадках, коли потрібно організувати автономне вуличне освітлення або забезпечити електроживленням будь-якого іншого споживача постійного струму – охоронні системи, оперативні кола постійного струму, телекомунікаційні установки (радіозв'язок, супутниковий зв'язок, інтернет тощо) [45, 165].

Автономна сонячна електростанція змінного струму. У відповідності до принципу роботи даної СЕ сонячна енергія перетворюється в постійний електричний струм (за допомогою СП), який подається до контролера заряду. Контролер заряду автоматично встановлює оптимальні налаштування постійного струму для заряду АКБ. Коли АКБ повністю заряджені, то зайва ЕЕ подається до мережевого інвертора напруги (DC/AC), який підключений до споживачів змінного струму [45].

В години, коли сонця немає або сонячної енергії недостатньо для генерації електрики (ввечері, вночі і зранку), електроенергія з АКБ подається до інвертора, де перетворюється в змінну і потім вже живить споживачів змінного струму [45].

Функції інверторів дозволяють здійснювати гнучке налаштування схеми роботи СЕ. Схему СЕ автономного типу змінного струму представлено на рис. 3.18 [45].

Технічні характеристики СЕ автономного типу змінного струму:

- ефективність роботи до 90...93 %;
- складові: СП; контролер заряду; АКБ; мережевий інвертор;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Розглянемо основні режими роботи цієї СЕ, що більш детально представлені в роботі автора [45].

Режим 1. Автономне електропостачання. Дана схема може застосовуватися, коли немає мережі змінного струму. Вся накопичена за світловий день ЕЕ в АКБ використовується у вечірній і нічний час для живлення споживачів змінного струму. Правильний розрахунок потужності СП і достатня енергоемність АКБ дозволяють забезпечити повну автономність об'єкту.



Рисунок 3.18 – Схема СЕ автономного типу змінного струму

Режим 2. Змішане електропостачання. Цей вид СЕ вимагає наявності мережі змінного струму, яка використовується при розряді АКБ, щоб не відбувалося припинення подачі ЕЕ споживачеві. Перевага даного типу в тому, що немає необхідності встановлювати багато СП та АКБ, бо завжди є можливість отримати нестачу ЕЕ від централізованої мережі.

Режим 3. Резервне електропостачання. В даному випадку схема СЕ передбачає налаштування інвертора таким чином, що АКБ залишається завжди зарядженою на 100 %. Лише невелика кількість виробленої сонячної ЕЕ ви-

трачається на підтримку повного заряду АКБ, решта об'єму перетворюється на змінний струм і використовується для живлення споживачів, надлишок віддається в мережу згідно з умовами «зеленого» тарифу [45].

Мережева сонячна електростанція змінного струму. У відповідності до принципу роботи даної СЕ постійний струм, що виробляється СП подається на вхід мережевого інвертора, який перетворює його на змінний. Вихід від інвертора підключено до мережі змінного струму, а також до споживачів ЕЕ. Дана схема відрізняється своєю простотою, однак СЕ працює тільки коли доступна електрична мережа змінного струму, крім того напруга в мережі має перебувати в робочому діапазоні інвертора [45].

Схема мережевої СЕ змінного струму представлено на рис. 3.19 [45].

Технічні характеристики мережевої СЕ змінного струму:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП; мережевий інвертор;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

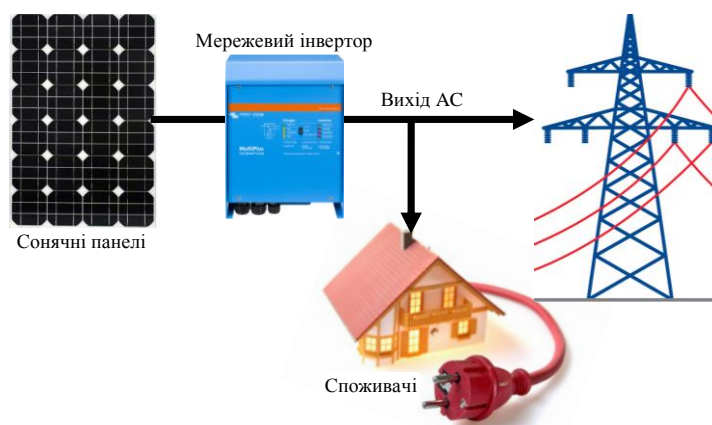


Рисунок 3.19 – Схема мережевої СЕ змінного струму

У денний час, коли споживання електроенергії, як правило, на мінімальному рівні, вироблена енергія передається в мережу за «зеленим» тарифом. У вечірній і нічний часи енергія надходить з мережі. Таким чином, даний вид СЕ дозволяє істотно економити на витратах за оплату електроенергії, а якщо збільшити масив СП, то домогосподарство буде отримувати прибуток за по-

зитивну різницю виробленої і витраченої електроенергії за підсумками певного терміну [45].

Гібридна сонячна електростанція змінного струму. У відповідності до принципу роботи даної СЕ, постійний струм, що виробляється СП подається на вхід мережевого інвертора, який перетворює постійний струм на змінний. Вихід від мережевого інвертора підключено до мережі змінного струму через розподільчий щит, а також до споживачів ЕЕ. Мережа змінного струму і АКБ підключаються до входу гібридного інвертора. Вихід мережевого сонячного інвертора і гібридного інвертора об'єднані через розподільний щит і забезпечують електроживленням споживачів змінного струму [45].

Застосування гібридного інвертору з зарядним пристроєм в даному типі СЕ забезпечує ряд переваг – електростанція працює навіть при відсутності напруги в мережі змінного струму, а також в умовах нестабільної мережі. Доступно кілька режимів роботи, які можуть гнучко налаштовуватися у відповідності до потреб та у залежності від пори року.

Схему гібридної СЕ змінного струму представлено на рис. 3.20 [45].

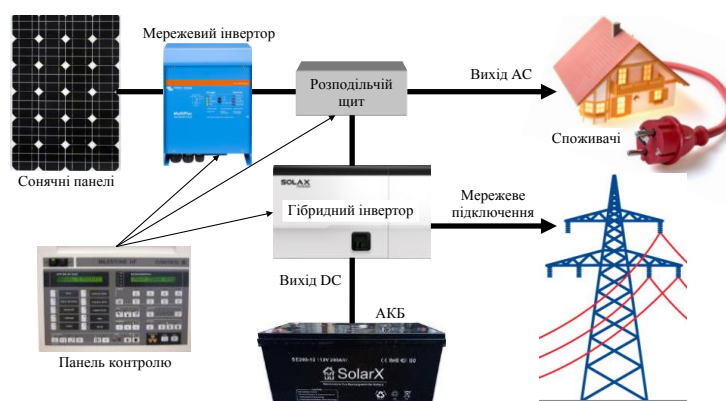


Рисунок 3.20 – Схема гібридної СЕ змінного струму

Технічні характеристики гібридної СЕ змінного струму:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП; мережевий інвертор; гібридний інвертор, розподільчий щит, панель контролю, АКБ;
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Розглянемо основні режими роботи гібридної СЕ змінного струму [45].

Режим 1. Автономна електростанція. Генерована електроенергія накопичується в АКБ. Мережевий інвертор подає змінну напругу на вихід гібридного інвертора, який здійснює заряд АКБ. Надлишок електроенергії використовується споживачами або віддається в мережу змінного струму за умовами «зеленого» тарифу. У вечірній і нічний час електроживлення забезпечується гібридним інвертором від акумуляторів.

Для автономного електропостачання потрібно встановлювати СП відповідної потужності, щоб генерованої електроенергії вистачало на достатній заряд АКБ, а їхньої ємності було досить, щоб покрити потреби споживачів.

Режим 2. Змішане електропостачання. В даному випадку допускається незначний або повний розряд АКБ (задається на панелі контролю), після чого електроживлення буде переключене на мережу змінного струму. Мережевий інвертор продовжує роботу в будь-якому випадку і доповнює потужність системи, а також продовжує заряджати АКБ. Надлишок електроенергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Режим 3. Резервне електропостачання. Схема налаштована таким чином, що АКБ задіяні тільки при відсутності живлення від централізованої електричної мережі (аварія, планове або віялові відключення тощо). Сонячний інвертор виробляє електроенергію і забезпечує нею споживачів. Надлишок енергії передається в мережу за умовами «зеленого» тарифу.

Подібні СЕ застосовуються для місць, де потрібно створити систему гарантованого електроживлення, а також знизити залежність або повністю відмовитися від загальної мережі електропостачання, наприклад, для будинків, котеджів, офісів, готелів, баз відпочинку тощо [45].

Сонячні зарядні станції для електромобілів і ЕБ. Виходячи з проведеного аналізу конструкцій, типів і будови СЕ та у відповідності до поставленого завдання за основу для сонячної ЗС для електромобілів вибрано гібридну СЕ змінного струму. Схему реалізації сонячної зарядної станції для електромобілів представлено на рис. 3.21, а докладніше в роботі автора [45].

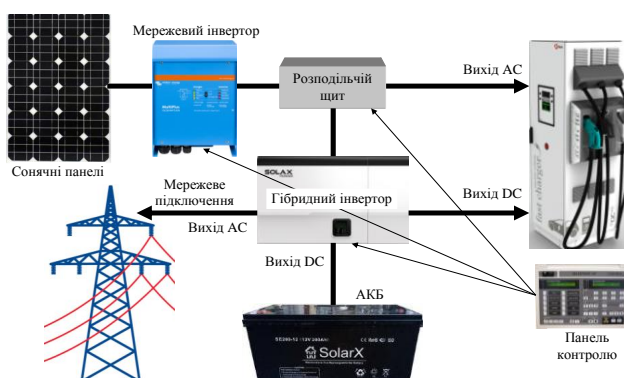


Рисунок 3.21 – Схема сонячної зарядної станції для електробусів

Технічні характеристики сонячної ЗС для електробусів:

- ефективність роботи – до 97 %;
- складові: СП; мережевий інвертор; гібридний інвертор, розподільчий щит, панель контролю, АКБ, зарядна станція з роботою від постійного та змінного струму.
- можлива робота в умовах «зеленого» тарифу.

Принцип роботи даної схеми співпадає з принципом роботи схеми, що представлена на рис. 3.20. Відмінність цієї схеми полягає лише в тому, що споживачами виступають зарядні системи електромобілів через відповідний порт зарядного пристрою. Якщо заряд йде постійним струмом, то ЕЕ надходить з гібридного інвертора через мережу постійного струму. Якщо заряд електромобіля здійснюється змінним струмом, то система заряду підключається до мережі змінного струму. ЕЕ в цьому випадку надходить або від гібридного інвертора, або від мережевого інвертора через розподільчий щит. Потік ЕЕ визначається програмним чином (панель контролю) в залежності від наявних умов та стану заряду АКБ сонячної зарядної станції. При цьому, якщо АКБ сонячної зарядної станції будуть повністю заряджені, передбачається робота станції за «зеленим» тарифом з віддачею надлишків енергії в загальну мережу через гібридний інвертор [45].

Подібні зарядні ЕС знижують залежність від загальної електромережі електропостачання або дозволяють повністю відмовитися від неї.

Як АКБ у запропонованій зарядній станції планується використовувати вживані тягові накопичувачі енергії від електромобілів.

3.7 Енергоефективність сонячної зарядної станції

Залежність енергоефективності сонячної панелі від температури.

При збільшенні температури ефективність СП знижується. З ростом температури потік електронів наростає, що викликає збільшення сили струму і падіння напруги. Падіння напруги при цьому більше, ніж збільшення сили струму, тому загальна потужність зменшується, що призводить до того, що панель працює з меншою ефективністю. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі при різних температурах зображена на рис. 3.22.



Рисунок 3.22 – Вольт-амперна характеристика СП від зміни температури

СП в більшості випадків випробовують при стандартній температурі 25 °С. Залежно від місцезнаходження, підвищена температура може знижувати ефективність сонячних батарей на 10...15 %.

При виборі СП, треба уважно вивчити технічні характеристики виробника, де вказаний температурний коефіцієнт при максимальній потужності P_m [40]. Вона дасть уявлення про зміну потужності при зміні температури.

Припустимо, що сонячна батарея потужністю 200 Вт має температурний коефіцієнт 0,48 %. Це означає, що з підвищенням температури на кожен градус вище стандартних 25 °С, максимальна потужність, вироблена сонячною батареєю, знижується на 0,48 %.

У спекотний сонячний день при температурі 40 °С (перевищення температури на 15 °С), максимальна потужність СП зменшиться на ≈ 7 %.

При цьому, коли в сонячні дні температура нижче 25 °С, вироблення енергії може бути більше, ніж номінальна максимальна потужність P_m .

Можна зменшити вплив тепла, встановлюючи панелі так, щоб між поверхнею де вони будуть встановлені і самими СП залишався простір в кілька сантиметрів, щоб повітря могло вільно циркулювати і охолоджувати СП. Також необхідно залишати невеликий зазор між сонячними батареями в масиві.

Використаємо залежність температури поверхні сонячної панелі від температури навколишнього середовища [171]:

$$T_{pi} = T_{пов} + E_i / 800 \cdot (T_n - 20^{\circ} C), \quad (3.10)$$

де T_{pi} – температура поверхні сонячної панелі, °С;

E_i – сонячне випромінювання, що надходить до ФЕП;

$T_{пов}$ – температура навколишнього середовища в розрахунковій точці, °С;

T_n – нормальна температура експлуатації сонячної панелі, °С.

Обчислено температуру поверхні СП для конкретного сонячного дня певного місяця. При цьому кількість сонячного випромінювання можна взяти з бази даних Національного агентства з аеронавтики і дослідженню космічного простору США NASA SSE (NASA Surface meteorology and Solar Energy), а в якості температури навколишнього середовища в розрахунковій точці взяти як виміряну температуру повітря під сонячною панеллю. При цьому ККД сонячної панелі визначається відповідно до залежності:

$$\eta_{pi} = \eta_0 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (T_{pi} - 25)), \quad (3.11)$$

де η_{pi} – ККД сонячної панелі;

η_0 – ККД сонячної панелі при температурі 25 °С;

T_{pi} – температура поверхні сонячної панелі.

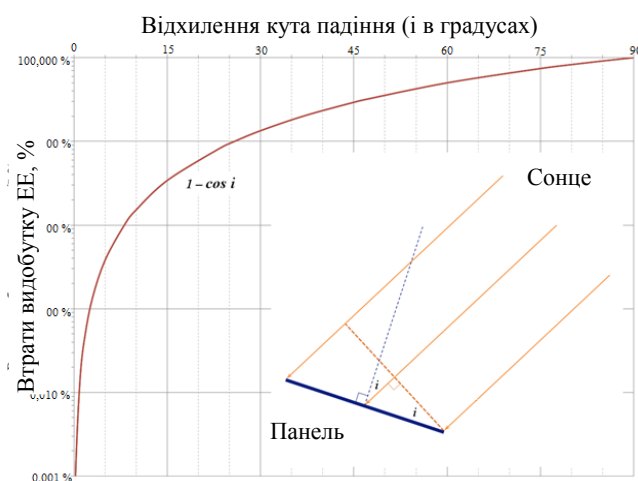
На рис. 3.22 представлено зміна температури СП в залежності від сонячної радіації і температури навколишнього середовища отримані прямим вимірюванням на поверхні сонячної панелі і обчислені за формулою для T_{pi} . При цьому виміряні і обчислені значення температури поверхні сонячної па-

нелі сильно відрізняються в ранкові та вечірні години і наближаються в години максимального вироблення енергії сонячної панелі.

Залежність ефективності СП від кута падіння сонячних променів.

СП найбільш ефективно працюють, коли їх поверхня спрямована перпендикулярно сонячним променям. СП зазвичай розташовуються на даху або на підтримуючій конструкції. Тому, зазвичай, вони не перебувають під оптимальним кутом 90° до сонячних променів протягом усього дня. Кут між горизонтальною площиною і СП зазвичай називають кутом нахилу.

Графік зображений на рис. 3.23 відображає залежність величини втрат при виробленні ЕЕ сонячними панелями від величини кута відхилення від оптимального положення площини СП. З графіка залежності видно, що трекер з точністю $\pm 5^\circ$ забезпечує вловлювання панеллю більше 99,6 % енергії прямих променів і 100 % від розсіяного світла.



Рисуно 3.23 – Залежність втрат енергії сонячного модуля від зміни кута падіння сонячних променів

Беручи до уваги траєкторію руху визначимо, що ефективний кут повороту СП $\approx 150^\circ$. СП, яка зафіксована в напрямку посередині між точками заходу і сходу втрачає до $2/3$ від енергії, що могла бути вироблена зранку і ввечері.

З таблиці 3.4 видно, що ефективність використання сонячних трекерів з ростом широти підвищується.

Таблиця 3.4 – Середні значення втрат енергії СП в залежності від кута падіння сонячних променів до панелі

Кут падіння променів сонця, град	Втрати, %
Мертва зона – більше 50	100
Зона від 45 до 50	38,5
Зона від 40 до 45	23,5
Зона від 35 до 40	16,5
Зона від 30 до 35	12,5
Зона від 25 до 30	9,5
Зона від 20 до 25	6,8
Зона від 15 до 20	4,7
Зона від 10 до 15	2,5
Зона від 5 до 10	0,9
Зона від 0 до 5	0,2

Для побудови ЗС на СП з використанням трекерів необхідно менше панелей в порівнянні з фіксованими системами.

В даному розрахунку не враховано відбите і розсіяне сонячне випромінювання, яке дає надбавку в 5...10 % фіксованим системам. У різні пори року цей параметр відрізняється. Взимку, наприклад, віддзеркалені від снігу сонячні промені дають значну прибавку, понад 10 %. Таким чином, з урахуванням розсіяного, віддзеркаленого сонячного випромінювання, використання трекера дасть приріст вироблення електроенергії понад 50 % в рік.

3.8 Трекерна система для сонячної зарядної станції

Для розрахунку трекерної системи необхідно визначити парусність системи. Під визначенням парусності розуміють властивість будь-якого предмета сприймати кінетичну енергію повітряного потоку (вітру). На рис. 3.24 показане вітрове навантаження на сонячний трекер.

Сила опору спрямована проти швидкості руху, її величина пропорційна характерній площі S , щільності середовища ρ і квадрату швидкості V :

$$X_0 = C_{x0} \frac{\rho \cdot V^2}{2} S, \quad (3.12)$$

де ρ – щільність повітря, визначається з урахуванням температури навколишнього середовища;

V – максимально допустима швидкість вітру, приймаємо в середньому 17 м/с;

S – площа поверхні сонячної панелі;

C_{x0} – безрозмірний аеродинамічний коефіцієнт опору, з урахуванням складності розрахунку приймаємо рівним в діапазоні 1,07...1,28.

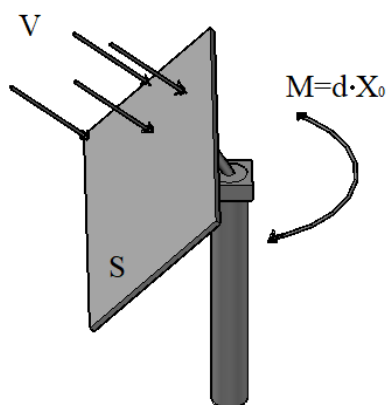


Рисунок 3.24 – Вплив сил вітру на сонячний трекер

Далі проведемо розрахунок черв'ячної передачі.

Після визначення передаточних чисел ступенів редуктора обчислимо частоти обертання і обертаючі моменти на валах передачі.

Якщо в заданій схемі відсутній ланцюгова передача на виході, то частота обертання валу колеса передачі $n_2 = n_B$.

Частота обертання черв'ячної передачі:

$$n_1 = n_2 \cdot u_{\text{ред}} \quad (3.13)$$

Момент на валу колеса передачі при відсутності ланцюгової передачі:

$$M_2 = M_B / \eta_M \cdot \eta_{\text{оп}}, \quad (3.14)$$

де $\eta_{\text{оп}}$ – ККД опор черв'ячного вала;

η_M – ККД муфти.

Обертаючий момент на черв'ячній передачі:

$$M_1 = M_2 / u_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ч}}, \quad (3.15)$$

де $\eta_{\text{ч}}$ – ККД черв'ячної передачі;

$U_{\text{ред}}$ – передаточне число черв'ячної передачі.

Вибір характеристик приводного електродвигуна.

Потужність приводу (потужність на виході) визначають за формулою:

$$P_{\text{в}} = M_{\text{в}} \cdot n_{\text{в}} \cdot 2\pi; \quad (3.16)$$

$$T_{\text{е.тр}} = P_{\text{в}} / \eta_{\text{заг}}, \quad (3.17)$$

де $\eta_{\text{заг}} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$;

$\eta_1, \eta_2, \eta_3 \dots$ – ККД окремих ланок кінематичного ланцюга.

Загальний ККД приводу:

$$\eta_{\text{заг.}} = \eta_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{рем}} \cdot \eta_{\text{М}} \cdot \eta_{\text{оп}}, \quad (3.18)$$

де $\eta_{\text{ч}}$ – ККД черв'ячної передачі;

$\eta_{\text{рем}}$ – ККД ремінної передачі;

$\eta_{\text{М}}$ – ККД сполучної муфти;

$\eta_{\text{оп}}$ – ККД опор приводного вала.

Необхідну частоту обертання вала електродвигуна обчислимо, підставляючи в формулу для $n_{\text{е.тр}}$ середні значення передаточних чисел з рекомендованого діапазону для передач з таблиці 3.5:

$$n_{\text{е.тр}} = n_{\text{в}} \cdot u_{\text{ч}}, \quad (3.19)$$

де $u_{\text{ч}}$ – передаточне число передачі одноступеневого черв'ячного редуктора.

Дослідження навантажувальних характеристик різних типів СП з визначенням найбільш ефективного значення опору навантаження є дуже важливим з точки зору електричної енергії, що генерується. Результати проведеного дослідження дозволять з максимально можливим ККД використовувати дані панелі як поновлюване джерело енергії на транспорті [172].

Таблиця 3.5 – Види передач та їх характеристики

Вид передачі	Твердість зубців	Передачне число	
		$U_{рек}$	$U_{пред}$
Зубчата циліндрична тихохідна ступінь у всіх редукторах (U_T)	≤ 350 HB	2,5...5,6	6,3
	40...56 HRC	2,5...5,6	6,3
	56...63 HRC	2...4	5,6
Швидкохідна ступінь в редукторах по розгорнутій схемі (U_6)	≤ 350 HB	3,15...5,6	8
	40...56 HRC	3,15...5	7,1
	56...63 HRC	2,5...4	6,3
Швидкохідна ступінь в співвісному редукторі (U_6)	≤ 350 HB	3,15...5,6	8
	40...56 HRC	3,15...5	7,1
	56...63 HRC	2,5...4	6,3
Коробка передач	Будь-яка	1...2,5	3,15
Конічна зубчата	≤ 350 HB	1...4	6,3
	≥ 40 HRC	1...4	5
Черв'ячна	-	16...50	80
Ланцюгова	-	1,5...3	4
Ремінна	-	2...3	5

3.9 Дослідження навантажувальних характеристик різних типів кремнієвих сонячних панелей

На сьогоднішній день існує велика кількість різних видів і типів СП. Вони відрізняються як технологією виготовлення, так і матеріалами [172].

Найбільш поширеними і доступними на сучасному ринку є СП на основі кремнію. Класифікація кремнієвих СП представлена на рис. 3.25.

Переважає більшість елементів сучасних стандартних фотоелектричних СП виготовляються з монокристалічного (C-Si), або полікристалічного (Mc-Si) кремнію (складають близько 90 % ринку, з них близько 2/3 полікристалічні, а 1/3 – монокристалічні) [172].

Вже з'являються сонячні модулі, фотоелементи яких виготовляються з використанням тонкоплівкової технології – методом осадження або розпилення світлочутливих речовин на різних субстратах. Їх перевагою може стати зниження собівартості, оскільки вони потребують приблизно в сто разів менше матеріалу, ніж кремнієві пластини.

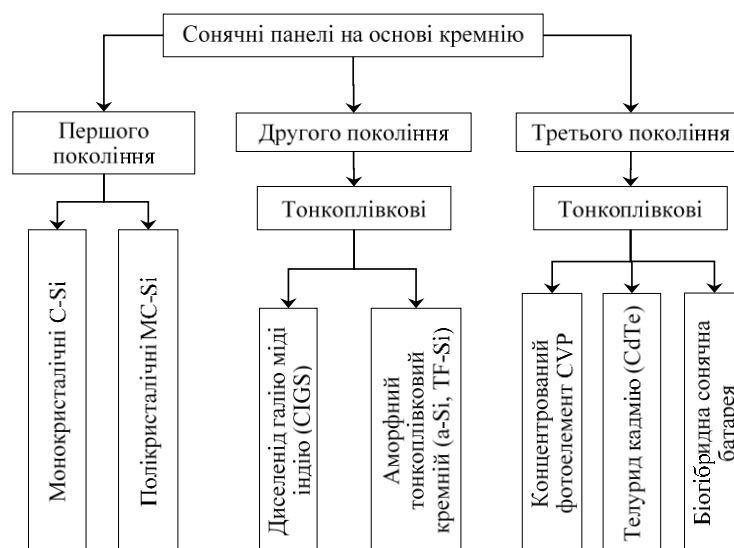


Рисунок 3.25. Класифікація кремнієвих сонячних панелей

Мульти-перехідні СП з так званих багатошарових або багатофункціональних комірок є найменш поширеними [172, 173].

Монокристалічні C-Si панелі являють собою кремнієві комірки, які з'єднані між собою [162]. Технологія є відносно дорогою. Цей тип СП обирають з огляду на високий ККД (близько 17...25 %) [18, 162, 174].

Технологія виготовлення полікристалів вимагає менше енергії, отже, вартість кремнію, отриманого нею, менша. Єдиним, але значним мінусом полікристалічних СП те, що вони мають менший ККД (12...18 %) [174].

Технології тонкоплівкових СП розвиваються дуже швидко, причому в декількох напрямках. Найперша технологія тонкоплівкових модулів, яка отримала комерційне поширення – плівка з аморфного кремнію. Зараз вже розроблені модулі 3-го покоління. Перше покоління – це одноперехідні сонячні елементи, які мали малий термін служби (до 10 років) і ККД 4...5 %. Друге покоління також мало одноперехідні елементи, але їх термін служби вже практично зрівнявся з терміном служби кристалічних елементів, а ККД становив 6...8 %. До третього покоління можна віднести найбільш сучасні багатоперехідні тонкоплівкові елементи, які дозволяють досягти ККД 12% при тривалому терміні служби [175].

Гнучкі тонкоплівкові фотоелементи на основі кремнію в порівнянні з кристалічними аналогами мають ряд переваг [18]:

- кращу продуктивність в умовах підвищених температур;
- здатність до вироблення електрики при низькому рівні освітленості;
- можливість прихованої установки;
- меншу вартість одиниці виробленої енергії завдяки зниженню витрат на виробництво обладнання;
- простоту і технологічність виробничого процесу;
- спрощений монтаж, заміну і обслуговування за рахунок незначної товщини і підвищеної гнучкості;
- менший вплив затінення.

Основною негативною особливістю використання аморфних тонкоплівкових СП є низький показник ефективності. В ідеальних умовах їх ККД в два рази нижче, ніж у аналогічних полікристалічних модулів.

Крім розглянутих вище типів кремнієвих СП, існують також їхні гібриди. Розробка плівкових панелей пояснюється необхідністю зниження вартості фотоелектричних СП і поліпшення їх експлуатаційних і технічних характеристик. Оскільки вони менш поширені і рідше використовуються, то в описі надається тільки перерахування їх основних типів [172]: на основі CdTe; на основі селеніду міді-індію; на основі полімерів.

Проведений аналіз різних типів і видів СП дозволяє сформулювати висновок, що на даний момент найбільш підходящими для використання на транспорті є полі- і монокристалічні фотоелектричні модулі. СП на базі даних модулів набули найбільшого поширення і, як наслідок, найбільш прийнятні з потрібного співвідношення: ціна – якість – ККД. Виходячи з цього, для подальших досліджень, були обрані однотипні полі- і монокристалічних панелі, які є найбільш доступними на сучасному ринку.

Визначення умов для досягнення генерування максимальної потужності.

Для проведення досліджень необхідно сформулювати основні вимоги до ефективної роботи сонячної панелі [7, 172]:

- для забезпечення поглинання максимально можливої кількості енергії випромінювання, що надходить до СП, коефіцієнт оптичного поглинання фотоелектричного шару повинен бути близьким до одиниці;
- фотогені носії повинні ефективно накопичуватися на контактних електродах по обидва боки фотоелектричного шару, що містять р-n перехід;
- СП повинна мати оптимальну висоту бар'єру в р-n-переході, достатню для забезпечення високого значення напруги холостого ходу U_{oc} , але не дуже велику для того, щоб фотони сонячного спектру не поглиналися;
- повний опір зовнішнього кола, послідовно з'єданого з СП, повинен відповідати критерію передачі максимальної потужності на навантаження, тобто бути рівним опору самої СП.

Дотримання і виконання перших трьох умов з перерахованих вище в основному залежить від виробників СП. Це визначається як технологією виробництва, так і вибором матеріалу для виробництва панелей [172]. Виконання останньої умови залежить безпосередньо від споживача. Це завдання програмно-апаратного забезпечення, яке контролює навантаження і характеристики роботи СП під час їх експлуатації. Тобто для задоволення критерію передачі максимальної потужності від сонячних панелей до навантаження необхідно відстежувати співвідношення внутрішнього опору панелей і навантаження. В ідеальних умовах вони повинні бути рівні [172].

З урахуванням вищезазначеного, стає очевидним, що питання відстеження навантажувальних характеристик СП, які можуть входити до структури складних систем, є досить актуальним. Оскільки відхилення від оптимальних параметрів, наприклад, по вже згаданому співвідношенню активних опорів, може значно знизити ефективність роботи системи в цілому. Також слід зазначити, що на ефективність роботи СП в структурі складних систем, що призначені для використання на транспорті, впливатиме і багато інших чинників (наприклад, вплив забруднення СП на їх текстурні, хімічні та оптичні властивості). Це важливо враховувати, бо навіть пил, принесений вітром, може знижувати ефективність СП на $\sim 2,2\%$.

Звісно, відстеження зовнішніх факторів, які впливають на продуктивність СП є важливим завданням. Однак, воно вже досить добре досліджене і вироблені відповідні методи і підходи до його вирішення. Тому акцентуємо увагу на електрохімічних процесах, які протікають в фотоелектричних модулях при їх роботі. З цієї точки зору, для збільшення ефективності роботи СП використовують сонячний контролер з відстеженням точки максимальної потужності (ВТМП) [172]. Такий контролер дозволить генерувати більше електроенергії порівняно з ШІМ контролерами. Контролер ВТМП безперервно контролює струм і напругу на СП і визначає пару струмових напруг, яка гарантуватиме максимальну потужність панелі. Точку максимальної потужності можна обчислити кількома способами. У найпростішому випадку контролер поступово зменшує напругу з точки холостого ходу до напруги на акумуляторі. Точка максимальної потужності (ТМП) буде десь між цими значеннями [7, 172].

Положення ТМП залежить від кількох параметрів: умови освітлення модуля; температура; різноманітність використовуваних модулів і т. д. Контролер відслідковує значення електричної енергії, виробленої СП з кожної сторони ТМП. Якщо потужність збільшується, вона переходить до роботи в цій точці, рис. 3.23, а [7, 156].

На рис. 3.26, б показано, як напруга в ТМП може змінюватися при різних температурах модуля. Чим вище температура СП, тим менше напруга на модулі і, отже, генерування енергії за допомогою СП. У певні моменти ТМП може бути нижчою, ніж напруга на батареї, і в цьому випадку робота ВТМП-контролера буде неефективною (з точки зору вироблення енергії) порівняно з контролером ШІМ. Затінення СП має той же ефект.

Отже, при використанні контролера ВТМП, СП повинна комутуватися на більш високу напругу. Більшість контролерів можуть стежити за точкою максимальної потужності в широкому діапазоні. Таке рішення також дозволить збільшити генерацію енергії за допомогою СП при зниженому освітлен-

ні. Однак не слід допускати великої різниці між вхідною та вихідною напругою, оскільки це призводить до зниження ККД контролера.

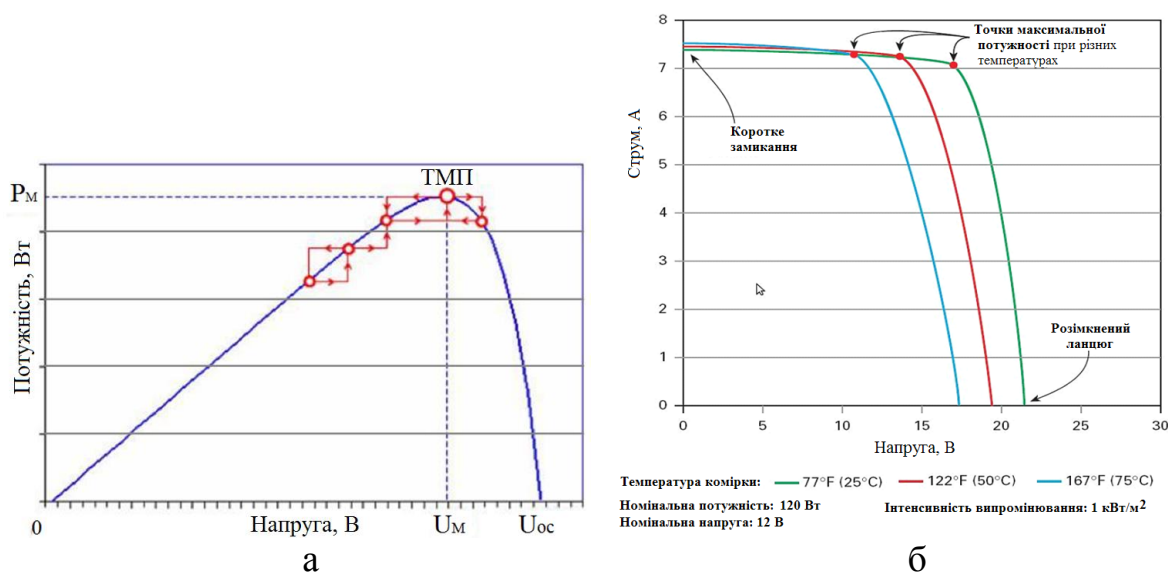


Рисунок 3.26. ТМП: а – визначення ТМП; б – ТМП в залежності від температури СП

Варто зазначити, що використання контролера ВТМП є ефективним, коли потужність фото панелі перевищує 200 Вт. Це обумовлюється економічними чинниками та доведено дослідженнями автора [39, 49]. Тобто, при використанні сонячних панелей малої потужності слід контролювати опір навантаження, щоб підтримувати роботу СП з високим коефіцієнтом корисної дії. Також, знаючи, як змінюється навантаження і, відповідно, генерована потужність на виході СП, можна вибрати необхідний контролер. Це може підвищити ефективність роботи сонячної панелі і, отже, зробить можливим вироблення більшої кількості електричної енергії [7, 38, 40].

Представимо результати першого з досліджень, а саме ВАХ та залежність виробленої ЕЕ від активного навантаження, підключеного до СП (відповідає реальним умовам їх функціонування). Це дасть можливість визначити значення навантаження, при якому буде спостерігатися найвище значення виробленої електричної потужності, і тому буде реалізований критерій передачі максимальної потужності на навантаження.

Експериментальні дослідження монокристалічних та полікристалічних СП виконані на модулях, характеристики яких представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики сонячних панелей

Параметр	Монокристал	Полікристал
Модель	FS-100M/100/W	FS-110P/110W
Вага, кг	8,45	9,18
Номинальна потужність, Вт	100	110
Номинальна напруга, $U_{\text{ном}}$, В	17,50	17,50
Номинальний струм, $I_{\text{ном}}$, А	5,72	7,72
Напруга при розімкненому контурі, U_{oc} , В	21,60	21,60
Струм короткого замикання I_{sc} , А	6,46	7,10
Розміри ВхДхШ, мм	1070x670x35	1170x670x35

Досліджувані типи сонячних панелей є найдоступнішими на сучасному ринку і можуть бути інтегровані у транспортну інфраструктуру для зарядки електробусів.

На основі заданих технічних характеристик можна визначити внутрішній опір досліджуваних панелей:

$$R_{\text{in}} = \frac{U_{\text{oc}}}{I_{\text{sc}}}. \quad (3.20)$$

Згідно з формулою (3.20) внутрішній опір панелей: $R_{\text{in (mono)}} = 3,4$ Ом; $R_{\text{in (poly)}} = 3,04$ Ом. Знаючи внутрішній опір досліджуваних СП можна визначити (з урахуванням їх послідовно-паралельного з'єднання), яким повинний бути опір навантаження. При їх рівності відбуватиметься найбільш ефективна робота СП.

Іншим важливим параметром СП є коефіцієнт заповнення FF – параметр, який у поєднанні зі струмом короткого замикання (фотострумом) та напругою холостого ходу визначає максимальну вихідну потужність СП. Даний параметр FF визначається як відношення номінальної потужності СП до виробу U_{oc} по I_{sc} , і дорівнює максимальному квадрату прямокутника, який

можна ввести в вольт-амперну криву СП [7]:

$$FF = \frac{I_{\text{nom}} \cdot U_{\text{nom}}}{I_{\text{sc}} \cdot U_{\text{sc}}} \quad (3.21)$$

Згідно з виразом (3.4) коефіцієнт заповнення розглянутих панелей дорівнює: $FF_{(\text{mono})} = 0,72$; $FF_{(\text{poly})} = 0,88$.

Одним з найбільш важливих параметрів для СП, які складаються з паралельно і послідовно з'єднаних сонячних батарей, є вольт-амперна характеристика і навантажувальна характеристика. Виробники фотоелектричних панелей мають чітко визначені дані характеристики у відповідності із затвердженими методами, які розглянуті в роботах [176, 177].

Розрахунок вольт-амперної характеристики можна зробити за виразом:

$$I = I_f - I_0 \left(\exp \left[\frac{q}{AkT} (U + IR_l) \right] - 1 \right), \quad (3.22)$$

де I_f – фотострум, А;

I_0 – струм насичення, А;

A – коефіцієнт, отриманий при порівнянні теоретичних та експериментальних характеристик, приймає значення від 1 до 5;

q – зарядка, с;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура, °К;

I – струм в сонячній батареї, А;

U – напруга, В;

R_l – послідовний опір сонячній батареї, Ом.

Експериментальні дослідження.

Умови експерименту.

1) Дослідження проводилися в липні, погода – сонячна, час відповідає найбільш високій інтенсивності сонячної радіації (м. Харків), час: 12.30–14.00.

2) Для СП було вибрано активне навантаження. Це відповідає реальним умовам роботи сонячних панелей. Навантаження, підключене до СП відповідно до схеми експерименту (рис. 3.27), змінюються в межах від 2 Ом до 10 Ом. Крок зміни становить 0,5 Ом.

3) Температура на поверхні сонячної панелі становить $\sim 45^{\circ}\text{C}$.

4) Вимірювання проводяться під час короткочасного блокування діапазону навантаження сонячної панелі, що дає змогу позбутися залежності опору навантаження від температури.

5) Вимірювання струму та напруги відповідно до рис. 3.27 проводяться цифровими мультиметрами АРРА 82.

6) Кут нахилу панелі $35^{\circ}\dots 40^{\circ}$ (оптимальний для заданої широти).

7) Вимірювання проводилися циклічно – у прямому і зворотному напрямках (для зменшення похибки), що відповідає поступовому збільшенню та зменшенню опору навантаження.

8) В ході експериментальних досліджень було виконано серію дослідів вольт-амперних та навантажувальних характеристик на полікристалічних та монокристалічних СП. Усереднені значення вимірних характеристик представлені у вигляді графіків на рис. 3.28, де а, в – відповідає прямому способу вимірювання, б, г – вимірювання в зворотному напрямку.

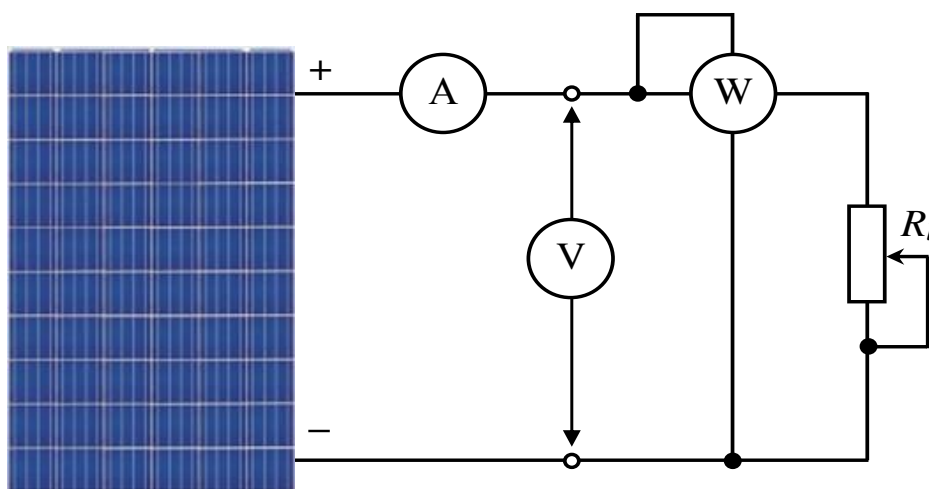


Рисунок 3.27 – Схема експерименту

Діапазон активного опору навантаження складав від 2 Ом до 10 Ом. Вимірювання за межами даного діапазону не несуть практичної цінності, тому що досліджувані панелі будуть генерувати ЕЕ з малою ефективністю, що досить наочно видно на представлених характеристиках, рис. 3.25.

Проводячи аналіз вимірних вольт-амперних і навантажувальних характеристик (рис. 3.28) можна зробити висновок, що досліджувані фотоелектричні панелі генерують електроенергію з найбільшою ефективністю в діапазоні активного навантаження від 3 Ом до 3,5 Ом. Тобто, якщо використовувати дані типи сонячних панелей, то необхідно підтримувати навантаження в зазначеному діапазоні опорів, з урахуванням електричної схеми їх з'єднання.

Якщо ж використовувати ці СП з навантаженням, яке виходить за вказаний діапазон, то їх робота стає неефективною. Останнє пояснюється тим, що виходячи за встановлені межі опору навантаження, сонячна панель працюватиме з низьким ККД, що означає, що вона буде генерувати набагато менше електричної енергії (щодо її номінальних значень).

Отримані результати цілком збігаються із зазначеним вище критерієм передачі максимальної потужності на навантаження. Відповідно до заданих технічних характеристик внутрішній опір СП, розрахований для монокристалічної батареї, становить 3,34 Ом, а для полікристалічної – 3,04 Ом.

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 фотопанель – 3,04 Ом.

Резюмуючи проведений аналіз експериментальних досліджень необхідно відзначити, що нагрів фотоелектричних модулів також впливає на ефективність процесу генерації електроенергії. Тобто чим вище температура поверхні СП, тим нижче її ефективність.

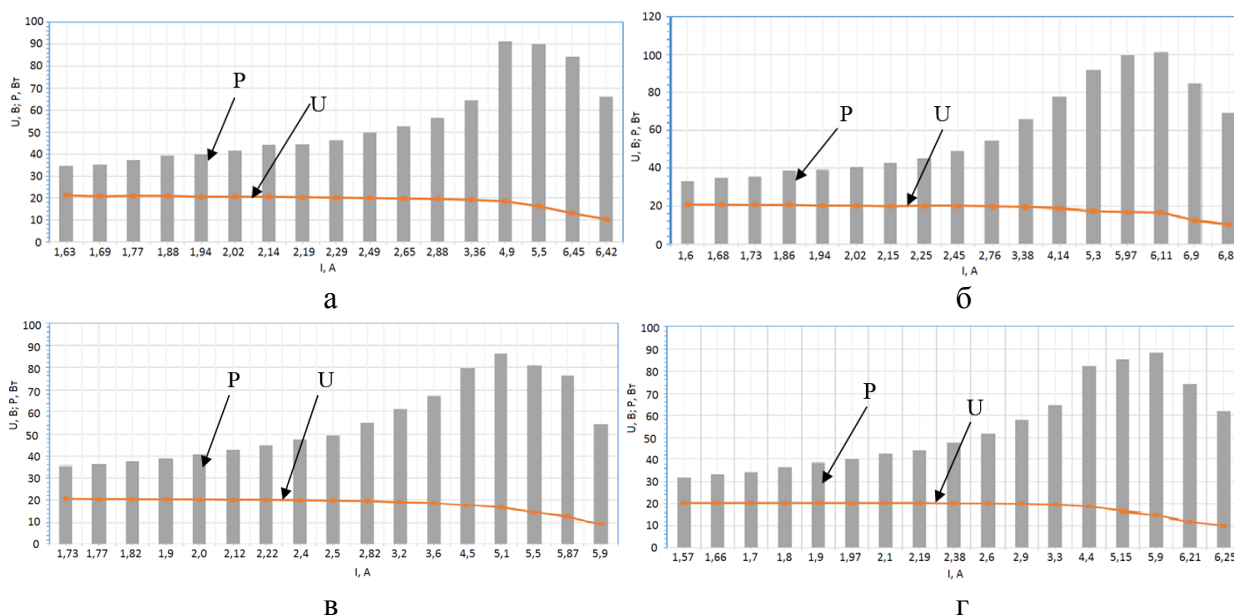


Рисунок 3.28 – Вольт-амперні і навантажувальні характеристики фотоелектричних панелей: а, б – полікристал; в, г – монокристал

При подальшому використанні отриманих результатів варто враховувати, що для визначення ВАХ і навантажувальних характеристик досліджуваних СП (рис. 3.28) кут нахилу становив $35^{\circ} \dots 40^{\circ}$. Це було зроблено для отримання повної інформації про електротехнічні можливості даного типу СП.

3.10 Модель лінійної оптимізації інфраструктури швидкої зарядки для міських електробусів

Планування інтегрованої інфраструктури для зарядки електробусів зі швидкою зарядкою має враховувати різноманітну інформацію та обмеження, які можуть бути розділені на дві категорії [178, 179]:

– експлуатація електробусів та інфраструктура:

а) необхідно враховувати інформацію про конфігурацію автобусної мережі, включаючи загальні зупинки, щоб врахувати синергію витрат при установці станцій швидкої зарядки;

б) необхідні дані щодо щоденних робочих годин та часу очікування. Час очікування визначається розкладом автобусного маршруту і може змі-

нюватися в залежності від типу зупинок електробуса;

в) необхідно додати дані про конфігурацію автобусного парку, щоб врахувати різне питоме споживання енергії та відповідні вимоги до інфраструктури;

г) потрібна інформація про наявність інфраструктури, наприклад, визначення територій де немає можливостей використання енергомережі. Відповідні автобусні зупинки повинні бути ідентифіковані та виключені з подальших досліджень;

– технічна складова:

а) необхідні дані щодо потужності заряду;

б) необхідні дані щодо характеристик батареї.

Енергія, яка може бути заряджена на зарядних станціях, залежить від часу перебування (що визначається оперативним плануванням), можливостями зарядної інфраструктури (тобто потужністю мережі та зарядної станції), а також типу батареї та стану заряду акумулятора (СЗА) що має значення для фактичної роботи електробуса. Якщо мова йде про акумулятор, а не суперконденсатор, то важливою є поведінка заряду акумулятора з точки зору процесу зарядки та СЗА. Поведінка під час тривалої зарядки також залежить від глибини розряду (DOD), яка повинна бути відносно невеликою, щоб збільшити термін служби АКБ [178]. Але, враховуючи те, що зарядні станції призначені для зарядки електробусів на суперконденсаторах, це спрощує вимоги до процесу зарядки, бо суперконденсатори заряджаються великими імпульсними струмами і не потребують зміни процесу заряду в залежності від стану заряду акумулятора.

Оптимізація витрат установки зарядних станцій.

Ефективне застосування концепції зарядки електробусів вимагає оптимізації витрат пов'язаних з установкою зарядних станцій. Таким чином, необхідно знайти компроміс між ємністю СК (вартістю і вагою) і кількістю встановлених точок зарядки, забезпечуючи при цьому достатню кількість енергії для роботи електробуса. Ґрунтуючись на існуючих роботах і підході,

розглянутих в роботах [178, 179], представлено вдосконалену модель лінійної оптимізації зі змішаними цілими числами для електробусів.

Модель вирішує задачу визначення мінімально необхідної кількості і відповідного розташування зарядних станцій і необхідних параметрів СК для кожного електробуса на маршруті, у відповідності до початкового робочого графіка дизельних автобусів. 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 зарядок для електробусів на СК.

Методологія – оптимізаційна модель для загального визначення кількості та розташування точок швидкої зарядки та необхідного розміру накопичувачів енергії.

Розглянемо загальну змішану цілочисельну оптимізаційну модель, яка здатна відобразити основні характеристики системи електробусів. Враховуючи мережеві, експлуатаційні та технічні обмеження, вона визначає компроміс з точки зору мінімізації вартості ЗС і розмірів батареї для кожного маршруту і відповідних типів зарядки для кожного електробуса в системі.

Цей підхід моделювання спирається і далі розвиває модель, представлену вперше в [178]. Повний перелік наборів, параметрів та змінних представлено в Додатку Б, таблиця Б.1.

Цільова функція (3.6) зводить до мінімальної кількості зарядних станцій результуючі витрати на будівництво зарядних станцій $C^{\text{буд.ЗС}}$ і трансформаторних станцій $C^{\text{трансф.}}$, які можуть спільно використовуватися з кількома точками зарядки на одній станції, що обслуговує необхідну добову потребу. Двійкова змінна z_i вказує, чи побудована зарядна станція на зупинці i , тоді як ідентифікатор z_{id}^{ident} ідентифікує, чи є трансформаторна станція на зупинці id . Третій термін представляє вартість батареї. Це сума автобусів, необхідних для обслуговування маршруту (NUM_b), помножена на двійкову

змінну $bat_{b,v}$, яка вказує ємність батареї, обрану для конкретного маршруту b і знову помножену на відповідну вартість однієї батареї C_v .

$$\min_{\substack{z_i, z_{id}^{ident}, level_{i,n,b}, bat_{b,v}, \\ e_{i,n,b}, e_{i,n,b}^{before}, idle_{i,n,b}^{high}, idle_{i,n,b}^{low}, \\ soc_{i,n,b,v}, load_{i,n,b}}} \sum_i z_i \cdot C^{буд.3C} + \sum_{id} z_{id}^{ident} \cdot C^{трансф.} \quad (3.23)$$

Для представлення схеми мережі і технічних параметрів процесу зарядки необхідно встановити обмеження.

Обмеження енергетичного балансу вузла (3.7) гарантує, що поточний рівень енергії $e_{j,n,b}^{before}$ на кожній зупинці j , для кожної поїздки n і для кожного маршруту b , дорівнює рівню енергії на попередній станції $e_{i,n,b}$ мінус енергія споживана електробусом для поїздки від попередньої зупинки $CONSUME_{i,j,b,n}$ (параметр $CONSUME_{i,j,b,n}$ охоплює тільки відрізок маршруту b між сусідніми зупинками i і j) плюс енергія підзарядки на поточній станції (потужність зарядки в режимі високої потужності LP_b^{high} помножується на час зарядки в режимі високої потужності $idle_{j,n,b}^{high}$). Відмінність між $e_{i,n,b}^{before}$ і $e_{i,n,b}$, стає необхідною через складність процесу зарядки і буде описано далі. Цей енергетичний баланс застосовується для всіх зупинок на маршруті $s_{j,n,b}$, за винятком першої зупинки кожного маршруту $FIRSTSTOP_{n,b}$. А для цих зупинок застосовується альтернативний енергетичний баланс (3.8), де $LASTSTOP_{n,b}$ автобуса зупинка, що знаходиться безпосередньо перед першою зупинкою.

$$e_{j,n,b}^{before} = e_{i,n,b} - CONSUME_{i,j,b,n} + LP_b^{high} \cdot idle_{j,n,b}^{high}; \quad \forall j \neq FIRSTSTOP_{n,b}, n, b \mid s_{i,j,b} > 0 \quad (3.24)$$

$$e_{j,n,b}^{before} = e_{i,n-1,b} + LP_b^{high} \cdot idle_{j,n,b}^{high} \quad \forall j = FIRSTSTOP_{n,b}, i = LASTSTOP_{n,b}, n, b \quad (3.25)$$

Додаткові обмеження визначають початковий рівень зарядки батареї, а також граничні обмеження для конкретних випадків, таких як «від депо до першої зупинки» і «повернення з кінцевої зупинки». Абсолютна нижня межа

розряду акумулятора ($LBOUND_b$) і верхня межа визначені в (3.26) і (3.27), де в обох випадках обрана ємність батареї визначається шляхом додавання всіх можливих значень ємності батареї C_v , помноженим на бінарне число $bat_{b,v}$ – змінну, що позначає вибрану опцію:

$$e_{i,n,b} - CONSUME_{i,j,b,n} \geq LBOUND_b \cdot C_v; \quad \forall j,n,b | s_{i,j,b} > 0 \quad (3.26)$$

$$e_{i,n,b} - CONSUME_{i,j,b,n} \leq C_v; \quad \forall j,n,b | s_{i,j,b} > 0 \quad (3.27)$$

Для апроксимації нелінійної форми функції потужності зарядки акумулятора функція розділена на два різних сегмента, розділених пороговим значенням $THRESHOLD_b$. Висока зарядна потужність LP_b^{high} використовується, коли заряд акумулятора нижчий за порогове значення, а знижена зарядна потужність LP_b^{low} – коли вищий.

Час зарядки може бути розділеним на дві частини: на час зарядки високою потужністю $idle_{i,n,b}^{high}$ і на час зарядки низькою потужністю $idle_{i,n,b}^{low}$. Сума обох часів зарядки не може перевищувати час простою на зупинці $IDLETIME_{i,n,b}$, зменшений на час обробки до ($PREPROCESSING_b$) і час обробки після зарядки ($POSTPROCESSING_b$) (3.28).

Максимальна зарядна потужність може бути досягнута тільки в тому випадку, коли бінарна (двійкова) змінна $level_{i,n,b}$ відповідає «1» (3.29).

Рівняння (3.30) гарантує, що рівень заряду батареї (після того, як прикладена максимальна потужність зарядки) не може перевищити граничне значення, в іншому випадку рівень $level_{i,n,b}$ буде встановлений в нуль, і не буде можливим заряджати акумулятор максимальною потужністю.

Рівняння (3.31) обчислює остаточний рівень заряду батареї шляхом додавання зарядки з обмеженою потужністю.

$$idle_{i,n,b}^{high} + idle_{i,n,b}^{low} \leq IDLETIME_{i,n,b} - PREPROCESSING_b - POSTPROCESSING_b \quad (3.28)$$

$$1 / IDLETIME_{i,n,b} \cdot idle_{i,n,b}^{high} \leq level_{i,n,b} \quad (3.29)$$

$$e_{p,n,b}^{before} / C_v \leq THRESHOLD_b + (1 - level_{i,n,b}) \cdot (1 - THRESHOLD_b) \quad (3.30)$$

$$e_{p,n,b} = e_{p,n,b}^{before} + LP_b^{low} \cdot idle_{p,n,b}^{low} \quad (3.31)$$

Однак зарядка будь-якою потужністю може бути виконана тільки в тому випадку, якщо побудована зарядна станція (3.32). Крім того є, необхідна кількість трансформаторних станцій, яка визначається за допомогою (3.33). $MAXSTOPS_{id}$ – це максимальна кількість зупинок на одній станції, а в правій частині нерівності вказана кількість встановлених зарядних станцій на одній зупинці, яка ще не обладнана трансформаторною підстанцією через доступ до мережі метро.

$$1 / IDLETIME_{i,n,b} \cdot (idle_{i,n,b}^{high} + idle_{i,n,b}^{low}) \leq z_i \quad (3.32)$$

$$z_{id}^{ident} \cdot MAXSTOPS_{id} \geq \sum_{i \in \{ident_i = ident_{id} \cap no_train_i\}} z_i \quad (3.33)$$

Важливо відзначити, що при використанні суперконденсаторів у якості накопичувачів енергії оптимізаційна модель значно спроститься через те, що СК треба заряджати одним рівнем потужності. Важливо лише слідкувати за напругою на СК, щоб не допустити її перевищення.

Моделювання енергоспоживання.

Оптимальний розподіл точок зарядки в основному є результатом ефективного поповнення електробуса енергією. Отже, дуже важливо, щоб належним чином було забезпечено енергоспоживання для конкретного маршруту.

Подібно до транспортних засобів з ДВЗ, у електробусах на загальне споживання енергії впливають декілька факторів, а саме: вага електробуса, топографія маршруту та енергоефективність. Але електробуси мають деякі

специфічні характеристики споживання енергії, зокрема, пов'язані з кліматичними умовами, з кондиціонуванням повітря та опаленням через низьке тепловиділення двигуна. Таким чином, необхідно враховувати значно більш високе споживання енергії в екстремальних погодних умовах [178].

Проте, споживання енергії не можна вважати постійним на всьому маршруті обслуговування, бо воно досить сильно залежить від поточних умов, в яких знаходиться електробус. Моделювання споживання енергії може бути проведено на основі записаних профілів руху для кожного автобусного маршруту, що враховують щоденні характеристики водіння [178]. Такі профілі водіння рідко доступні для всієї мережі автобусів.

Представлений підхід може застосовуватися з використанням різних форматів необроблених даних в залежності від наявності профілів управління з високою роздільною здатністю. Збір даних для моделювання простий і використовує тільки існуючі дані і параметри, відомі водію автобуса.

Важливо відмітити, що споживання енергії визначається для кожного маршруту і часового інтервалу окремо. Розділення маршруту проводиться у відповідності до зупинок (відстані між зупинками), а характеристики ділянки, такі як швидкість електробуса – фіксуються. Так як автобусні маршрути мають різні умови експлуатації, необхідно збирати відповідні дані ділянки маршруту для всіх розглянутих автобусних маршрутів, щоб вручну створювати профілі руху.

Оскільки деякі параметри автобусного маршруту, такі як швидкість, зазвичай вказуються як середня швидкість по всьому автобусному маршруту, вводиться додатковий коригувальний параметр для позначення ділянок маршруту зі значним відхиленням від середнього значення.

Окрім географічної сегментації, внаслідок різних умов експлуатації має бути введений часовий аналіз. Під час щоденного робочого графіка такі параметри, як тривалість перебування, частота та час поїздки, змінюються для того, щоб впоратися зі зміною обсягів руху та пасажирів у години пік.

У представленому підході щоденна робота сегментована, що відображає залежний від часу вплив операційного середовища. Для кожного інтервалу часу визначається середня кількість пасажирів, можуть бути окремо налаштовані параметри розкладу руху.

Вплив обсягу трафіку встановлюється як функція часу і місця розташування і об'єднується у вищезгаданий параметр корекції, що називається обсягом трафіку (VoT). Виходячи з географічної та часової сегментації, моделюється споживання енергії, і для кожної ділянки автобусного маршруту призначаються значення.

Також важливо враховувати, що постійно змінюється температура навколишнього середовища, що впливає на споживання енергії. Тож, цей вплив, викликаний температурою, враховується окремо в моделі, як описано нижче.

В цілому, шляхом розбиття маршрутів і застосування часових інтервалів, можна відтворити різні стресові ситуації, викликані зовнішніми факторами, які виникають під час щоденної роботи. Цей підхід сприяє застосуванню найгіршого сценарію, який передбачає постійні екстремальні умови протягом усього дня експлуатації. Наприклад, максимальне розміщення пасажирів досягається лише в годину пік, тоді як середній рівень завантаження становить близько 20 % для громадського автобусного транспорту.

Імітаційна модель включає в себе загальну тягову силу F_{Total} , що складається з опору повітря, опору коченню, опору підйому і опору прискоренню. Додатково додається споживання допоміжних пристроїв, таких як кондиціонування повітря та опалення, які моделюються електричною потужністю протягом усього періоду використання в залежності від температури навколишнього середовища. Таблиця 3.7 і таблиця 3.8 показують параметри моделювання, що застосовуються для розрахунку споживання енергії. Оскільки тип електробуса зазвичай залежить від маршруту, в представленому дослідженні розглядаються два типи електробусів. Модель розглядає стандартний 12-метровий автобус та 18-метровий зчленований автобус.

Таблиця 3.7 – Параметри електробуса

Параметр	Значення	
Коефіцієнт опору повітря.	0,66	
Щільність повітря, кг/м ²	1,29	
Гравітаційна сила, м/с ²	9,81	
Кут нахилу (α)	змінний	
Коефіцієнт опору коченню	0,008	
Швидкість автобуса, м/с	змінна	
Загальна ефективність транспортного засобу (η_t)	0,733	
Довжина автобуса, м	12	18
Площа поперечного перерізу, м ²	8,28	8,28
Маса спорядженого транспортного засобу, 10 ³ кг	12,5	17,5

Загальне споживання енергії для ділянки маршруту як відстань між автобусною зупинкою i та j на автобусі b при кількості поїздок в обидва кінці n остаточно визначається за виразом:

$$CONSUME_{i,j,b,n} = \left(\frac{F_{Total_{i,j,b,n}} \cdot S_{i,j,b}}{\eta_t} + E_{aux_{i,j,b,n}} \right) \cdot VoT_{i,j,n,b} \quad (3.34)$$

де $F_{Total_{i,j,b,n}}$ – загальне тягове зусилля для кожної ділянки маршруту i, j на автобусі b при кількості поїздок в обидва кінці n ;

$S_{i,j,b}$ – довжина ділянки маршруту;

$E_{aux_{i,j,b,n}}$ – енергоспоживання допоміжних пристроїв для ділянки маршруту;

$VoT_{i,j,n,b}$ – параметр корекції для ділянки i, j автобусного маршруту b при поїзді n .

Інтервал часу виводиться з кількості поїздок.

Загальна ефективність транспортного засобу складається з ККД електричної машини, тягового перетворювача, інвертора та іншої електроніки. Загальна маса транспортного засобу являє собою суму ваги в спорядженому стані, включаючи акумулятор (наведено в таблиці 3.7) потужністю 60 кВт·год і навантаження пасажирями для певного маршруту електробуса і часового інтервалу. Середньодобова електрична потужність для допоміжних пристроїв двох типів електробусів показана в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Середньодобова допоміжна потужність системи ОВКП з використанням нагріву ПТК з урахуванням різних температур навколишнього середовища

Температура навколишнього середовища	-20	-15°C	-10°C	-5°	0°C	15°C	30°C
Допоміжна потужність 12м електробуса, кВт	14,14	12,23	10,34	8,47	6,61	2,57	5,03
Допоміжна потужність 18 м електробуса, кВт	19,76	17,06	14,42	11,81	9,21	3,58	7,01

Передбачається, що необхідна енергія для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВКП) та інших пристроїв забезпечується батареєю. Значення, представлені в табл. 3, моделюються для різних сценаріїв температури навколишнього середовища з використанням електричного позитивного температурного коефіцієнта (ПТК) і кондиціонера на даху з електричним компресором відповідно до методики [178]. Посилаючись на ці дослідження, встановлена температура для пасажирського салону становить 20°C для режиму обігріву і 25°C для режиму охолодження. Значення для 18-метрового електробуса (в порівнянні з 12-метровим) оцінюються на основі їх габаритів і пасажиромісткості.

Для подальших досліджень зазначено, що необхідна середня потужність нагрівача ПТК при температурі навколишнього середовища 0°C дорівнює потужності, необхідній для теплового насоса, під дією температури (-15°C). Крім того, при температурі навколишнього середовища (+15°C) допоміжна потужність для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є незначною і, таким чином, додатково представляє можливий сценарій, в якому енергія для нагрівання забезпечується нагрівачем викопного палива.

Варто підкреслити, що система зберігання акумуляторів і технологія швидкої зарядки є найважливішими елементами при плануванні інфраструктури для зарядки електробусів. У цьому дослідженні розглядаються літій-іонні батареї і суперконденсатри. Довговічність акумулятора залежить від часу та умов експлуатації. Таким чином, деградація батареї з точки зору за-

тухання ємності поділяється на циклічні та календарні втрати. Деякі дослідження пов'язують зменшення ємності з прикладеною потужністю зарядки, глибиною розряду (DoD) і початковим станом заряду (SoC) під час запуску процесу зарядки. Щоб обмежити і уповільнити процес зменшення ємності (деградації батареї), батарея використовується з декількома обмеженнями. У даному випадку припускається, що в процесі експлуатації акумулятора початковий стан зарядки (SoC) залишається в заданому діапазоні. Також, як запас безпеки, визначається нижня межа заряду, при якій рівень заряду батареї не падає. Верхній рівень позначає SoC, доти, поки не буде застосовано максимальну потужність заряджання. При перевищенні верхнього рівня, потужність зарядки зменшується. Описані обмеження застосовуються однаково для всіх модельованих автобусів і наводяться у відсотках до ємності батареї. Ємність акумулятора в свою чергу змінюється залежно від трьох різних типів електробусів. Швидка зарядка може бути реалізована за допомогою провідної та індуктивної передачі енергії. Наявні та перевірені технології зарядки дозволяють проводити швидку зарядку до 500 кВт та індуктивну зарядку до 200 кВт за допомогою акумулятора як внутрішнього сховища.

Параметри розрахунку витрат на побудову зарядних станцій.

У таблиці 3.9 представлені параметри для закупівлі електробусів для кожного типу, а також відповідна ємність батареї та вартість станції швидкої зарядки, включаючи витрати на підключення та будівництво, а також додаткові витрати на силовий трансформатор. Показані вартісні параметри отримані для систем електричних автобусів, доступних на ринку. Низьке проникнення на ринок електробусів все ще призводить до відносно високих витрат на закупівлю в порівнянні з дизельними автобусами. Можна очікувати, що зі збільшенням попиту та збільшенням випуску електробусів витрати на їх придбання будуть зменшуватися. Вартість швидкої зарядної станції відповідає системі електропровідної зарядки.

Таблиця 3.9 – Дані щодо вартості електробусів та інфраструктури швидкої зарядки

Тип електробуса	12 м електробус	18м електробус
Електробус без акумуляторної батареї [€]	420 000	500 000
Літій-титанатна батарея, включаючи заміну [€/кВт·год]	2 000	
Швидка зарядна станція та будівельні роботи [€]	250 000	
Силовий трансформатор [€]	45 000	

Планування інфраструктури зарядки в ідеалі проводиться з точки зору мережі, щоб використовувати синергію. Це означає, що імітаційна модель відображає інформацію про мережу, таку як перехрестя автобусних маршрутів та доступність мережі, припускаючи, що потенційне багаторазове використання інфраструктури зарядки призводить до економії коштів. Економія витрат здійснюється, якщо може бути використана існуюча інфраструктура, наприклад, силові трансформатори для мережі метро або кілька зарядних станцій можуть бути розміщені на одній автобусній зупинці. Для визначення потенціалу використання існуючої мережевої інфраструктури проаналізовано місце розташування існуючих силових трансформаторів в межах мережі автобусів і, якщо є, призначено автобусну зупинку. У такому випадку витрати на силовий трансформатор не враховуються, і рахуються лише витрати на обладнання станції зарядки та вартість будівництва.

Встановлення декількох зарядних станцій на одній автобусній станції також призводить до економії витрат при використанні тільки для одного силового трансформатора замість декількох. Якщо автобусні зупинки на маршруті географічно ідентичні, передбачається, що зарядна станція може обслуговувати кілька автобусних маршрутів.

Таким чином, розглядається тільки вартість однієї зарядної станції, включаючи силовий трансформатор.

Висновки за розділом 3

1. Проведений аналіз існуючих типів зарядних станцій показав, що для електробусів, які заряджаються на кінцевих зупинках або в депо можна використовувати ручну зарядку, яка є більш дешевою і має просту конструкцію на відміну від автоматичних зарядок. При цьому використовуються штекери для зарядки змінним струмом і бортові зарядні пристрої, а також стаціонарні швидкі зарядні пристрої потужністю 50-300 кВт зі стандартизованим інтерфейсом (CCS). Автоматичні зарядки доцільно використовувати при швидкій зарядці електробуса на маршруті.

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

3. 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 41,2 МДж електричної енергії;

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

– застосування енергогенеруючого дорожнього покриття площею 8,25 м², яке складається зі 150 панелей, дозволить отримати додатково 3,6 МДж електричної енергії;

4. Запропоновано використовувати наявні ТП, що подають напругу на контактну мережу існуючих фідерних комірок, для живлення зарядних станцій і точок зарядки електробусів. Це дозволить: уникнути отримання нових ТУ на приєднання потужностей; використовувати існуючі потужності ТП; використовувати існуючі системи електропостачання; знизити витрати на проектування і монтаж «вуличної» частини зарядних станцій; знизити експлуатаційні витрати і зробити зручним обслуговування; використовувати наявний обслуговуючий персонал; прискорити швидкість впровадження рішення; дасть можливість поетапної роботи зі збереженням живлення маршрутів; отримати від кожної ТП від 5 до 12 точок заряду.

5. Розроблено метод створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації електричної енергії для міського пасажирського транспорту: в електробусі з використанням лінійного електрогенератора та електричної машини обертального типу з триступеневим мультиплікатором, що дозволяє збільшити автономність ходу на 3-5 %; та систем його інфраструктури для зарядки міських електробусів, що використовують пристрій примусового зниження швидкості з генеруванням електричної енергії та енергогенеруюче дорожнє покриття, дозволяє зменшити споживання електричної енергії від мережі.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [3, 7, 8, 10, 11, 14, 20, 37–40].

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ВІБРОДІАГНОСТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОБУСІВ

Незважаючи на всі переваги асинхронних електродвигунів (АД), їх ресурс не завжди задовольняє вимогам, які ставляться до них при використанні [12]. За даними статистики [180], щорічно близько 20...25 % від загальної кількості АД, які експлуатуються, потребують ремонту. Крім того, у роботі [181] зазначено, що на електричні машини електровозів припадає 53 % від загальної кількості відмов, на електричні машини електропоїздів – 28 %, а на електричні машини тепловозів – 42 % від загальної кількості відмов.

У зв'язку з тим, що електробуси є досить новим видом транспорту, статистичних даних щодо відмов або проблем, які виникають при експлуатації тягових ЕД електробусів, у відкритих джерелах не знайдено, але можна з високою долею вірогідності припустити, що для міських електробусів кількість відмов ЕД буде достатньо високою через те, що експлуатація в міських умовах характеризується чергуванням режимів розгону, вибігу та гальмування, подолання спусків і підйомів, короткочасних стоянок. У цих умовах ЕД працює практично при постійній зміні керуючого впливу, тобто в динамічних режимах роботи. Тому дуже важливим є як вибір якісних і надійних ЕД, так і вчасне діагностування несправностей на стадії їх розвитку.

В залежності від виду відмов ЕД їх ремонт здійснюється власними силами (в межах підприємства, що експлуатує), або спеціалізованими організаціями). Причинами таких відмов є недостатній контроль якості проектування, виготовлення і експлуатації. Ремонт електродвигунів часто проводиться з розбиранням і заміною деталей. При цьому надійність роботи ЕД суттєво знижується [182]. У зв'язку з цим діагностування якості ЕД на стадії проектування, виробництва, при приймально-здавальних випробуваннях і в процесі експлуатації є одним з найважливіших способів підвищення надійності і економічної ефективності обладнання. Та особливе значення має вибір методу

дослідження ЕД, що працюють в динамічних режимах експлуатації механічних та електричних навантажень [12].

Не дивлячись на те, що існують державні і міжнародні стандарти щодо електричних обертових машин [183, 184, 81], питанню удосконалення методів визначення їх якості, пошуку критеріїв, які найбільш широко описують стан двигуна і розробці способів їх діагностування приділяється багато уваги науковцями і інженерами всього світу [12].

Так, наприклад, в статті [82] викладено процедури технічного стандарту ІЕС 60034-18-41 для оцінки якості двигунів типу І за допомогою (автономного) випробування з частковим розрядом. В роботі порівнюються автономні і онлайн вимірювання, виконані на двигуні, який міг би пройти випробування, але невдовзі після подачі живлення через ШІМ-інвертор, не пройшов, бо був пошкоджений саме під час випробувань. Виходячи з цього аналізу, виділяються переваги і недоліки даного стандарту.

Хоча сучасні ЕД керуються напівпровідниковими перетворювачами (інверторами) та вже зараз можна сказати, що за останні 20 років вони показали високу частоту відмов. Такі перетворювачі можуть генерувати імпульси напруги, що мають дуже короткий час зростання (від 50 нс до декількох тисяч мкс) і високу частоту перемикавання (до 20 кГц). З одного боку, інвертори надзвичайно ефективні при регулюванні швидкості ЕД, з іншого боку, вони можуть значно збільшити ризик відмови ЕД, особливо якщо ізоляція обмотки некваліфіковано спроектована чи виконана. Крім того, інвертори викликають небажану напругу на валу ЕД, що негативно впливає на роботу підшипників [185].

Повторювані і швидкі імпульси, які подаються на двигун окрім підшипників, викликають і пошкодження обмоток ЕД [186, 187]. Це пов'язано з пульсаціями в електричному колі, що повторюються. Вони можуть виникнути на клеммах ЕД через невідповідність опору ЕД та з'єднувальних кабелів. Величина таких пульсацій залежить від довжини кабелю, часу зростання імпульса, а також температурного навантаження, викликаного діелектричним нагріванням при високій частоті перемикавання, можуть сприяти прискоренню старіння ізоляції обмоток і викликати передчасні відмови.

Американськими дослідниками розроблено модель на основі системи виявлення несправностей ЕД, яка представлена в патенті [188]. Перевагою цього винаходу є те, що він заснований на програмному забезпеченні і використовує дані, отримані з неінтрузивних вимірювань. Завдяки цьому значно зменшуються витрати. Система містить комп'ютерні засоби, з'єднані з датчиками, які забезпечують безперервну інформацію в реальному часі про входні параметри: напругу, струм і швидкість ЕД. Система використовує багатопараметричний експериментальний алгоритм моделювання для отримання математичного опису ЕД, який порівнює змодельований результат з вимірним результатом. Оператор аналізує результат і визначає – чи працює двигун без помилок. Виявивши ознаки несправності, оцінює виміряні зміни параметрів ЕД, визначає відхилення від еталонного значення і видає діагноз ймовірної відмови або несправного компонента.

Авторами статті [189] проведено діагностику технічного стану тягових АД кар'єрного авто-самоскиду з використанням вейвлет-аналізу (вейвлет-перетворення – інтегральне перетворення, яке представляє собою згортку вейвлет-функції з сигналом. Воно переводить сигнал з часового уявлення в частотно-часове). В роботі показана можливість вибіркового контролю діагностичних частот при використанні вейвлет-аналізу.

Велика кількість існуючих методів оцінки якості і діагностування ЕД не вирішує проблему в цілому. Більшість з методів призначені для ЕД, що мають спеціальну сферу використання, а тому не можуть використовуватись у ТЗ у якості тягових. До того ж, вони є доволі складними і направлені на виявлення конкретних пошкоджень (наприклад, ротора або статора, або обмотки, або ізоляції, або підшипникового вузла тощо). Тому системний підхід до оцінки якості АД дозволить розробити універсальний метод контролю їх технічного стану як на стадіях проектування, так і на стадіях виробництва, експлуатації й ремонту.

4.1 Методологія комплексної оцінки електродвигунів тягового електроприводу

Проблема розробки вібраційних методів оцінки ЕД представляє, з точки зору системотехніки, велику систему складних фізичних і технічних, внутрішніх і зовнішніх факторів [190]. Для розуміння проблеми і сутності шля-

хів її вирішення прийнятий логічний комплексний аналіз, метод дерева цілей. Дерево цілей представлено на рис. 4.1, описано в табл. 4.1.

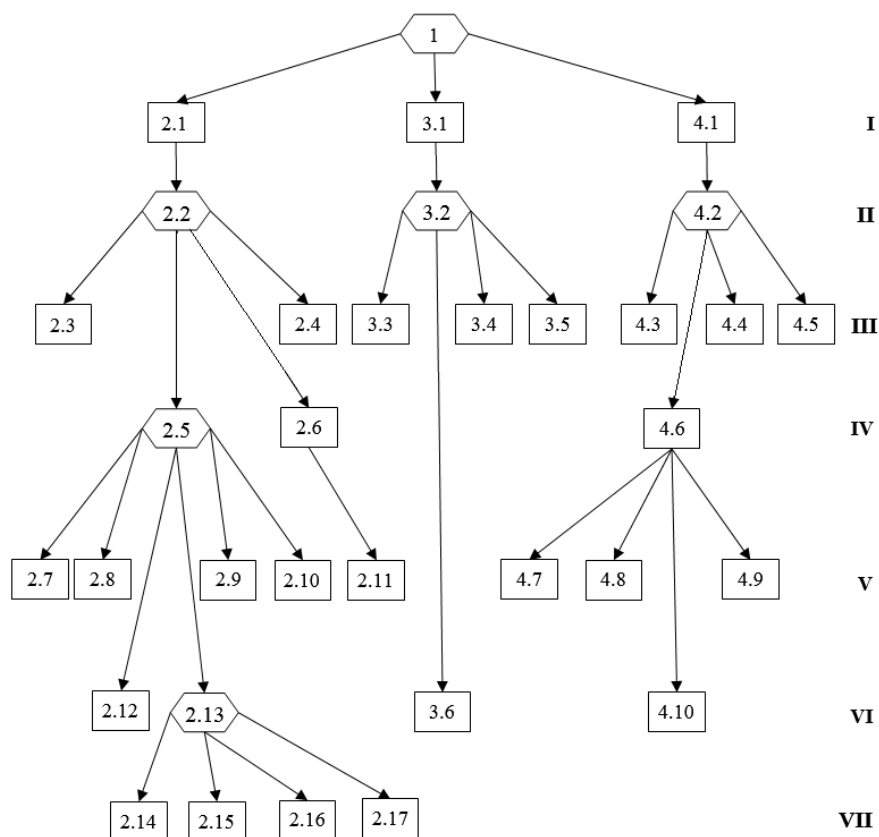


Рисунок 4.1 – Комплексна оцінка ЕД тягового електроприводу

На першому рівні моделі системи вирішення проблеми ставиться завдання комплексного досягнення трьох цілей 2.1, 3.1, 4.1 – розробка методів оцінки якості проектування, виготовлення і експлуатації. Оптимальним шляхом досягнення цих цілей є розробка вібраційних норм проектування і контролю якості ЕД на стадіях доведення, виготовлення і експлуатації – цілі 2.2, 3.2, 4.2. На цих рівнях система функціонує в часі як одне ціле заради єдиної мети, поставленої перед всією системою. Науково обґрунтовані норми вібрації повинні відображати стан функціонального оптимуму і, таким чином, забезпечувати якісне і кількісне управління процесом проектування, виготовлення і експлуатації ЕД. Кожна з цілей на третьому рівні (2.2, 3.2, 4.2) розбивається на більш дрібні цілі, які забезпечують рішення задачі і досить повно розкривають зміст, ступінь та факт їх досягнення.

Таблиця 4.1 – Методологія комплексної оцінки електродвигунів за вібродіагностичними характеристиками

Завдання і цілі дослідження ЕД	Аспекти	Характер
Завдання 1-го рівня: розробка критеріїв і методів оцінки ЕД при: проектуванні (2.1), виготовленні (3.1), експлуатації (4.1)	методологічні, моделювання	методологічний
Цілі 2-го рівня: 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
3-го рівня: 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
Цілі 4-го рівня: 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
Цілі 5-го рівня: 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
Цілі 6-го рівня: 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 технології 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
Цілі 7-го рівня: 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

Оскільки на вихідні рівні вібрації найбільше впливають керуючі сигнали, пов'язані з конструктивними змінами параметрів ЕД, на 4-му рівні поставлені цілі розробки методів і засобів зниження вібрації (2.5, рис. 4.1) до зада-

ного класу вібрації ЕД (ціль 2.2). Рівень деталізації доведення (ціль 2.1) безпосередньо впливає на вихідні ВДХ. Накопичення достатнього статистичного матеріалу щодо зниження вібрації доцільно будувати для кожного виду керуючих впливів різними способами і методами, отриманими при досягненні цілей 2.5, 2.13.

Вплив кожного керуючого сигналу (2.7...2.10, 2.14...2.17) на вихідні вібродіагностичні характеристики системи оцінюється якісно і кількісно за характером і рівнем зміни вібрації окремого механізму або всієї системи. Це дозволяє швидко при зміні вібрації, не чекаючи повного циклу випробувань, дати об'єктивну оцінку впливу кожного окремого керуючого впливу на технічний стан механізму і розробити конкретні рекомендації на активне втручання в процес доопрацювання електродвигунів до заданого класу вібрації і будувати модель зниження вібрації і зростання надійності ЕД. Таким чином, вже на етапі лабораторно-стендових випробувань відбувається суттєва зміна рівня вібрації і надійності ЕД. Доопрацювання ЕД розробленими методами 2.5...2.17 проводять до тих пір, поки вібродіагностичні характеристики не досягнуть заданого класу вібрації і відповідної заданої надійності і ресурсу.

Контроль і індивідуальне доведення вібрації до вимог норм виробляються також при виготовленні ЕД в ході досягнення підцілей 3.3...3.6. Аналогічний контроль і облік змін рівнів вібрації відбувається і на стадії експлуатації при досягненні підцілей 4.3...4.5, а також після закінчення технічного ресурсу (цілі 4.8, 4.9). Для комплексного метрологічного забезпечення засобами випробувань і діагностування досягаються цілі 2.6-2.11.

Такий комплексний підхід до створення єдиних методів і засобів діагностування дозволяє ефективно управляти якістю проектування і виготовлення, здійснювати ефективне обслуговування асинхронних електродвигунів [12, 191].

Аналіз системи методів оцінки якості тягового ЕД для електробуса.

Виділені з головної мети три підсистеми (2.1, 3.1, 4.1) цілей (рис. 4.1) можуть розглядатися як самостійні системи відповідного рівня ієрархії. Але

максимальний технічний і економічний ефект можливий тоді, коли поставлена головна мета буде досягата комплексно на стадії проектування. На першій стадії досягається ціль 2.1-2.17, на другій – 3.1-3.6, на третій – 4.1, їх підцілі, і вирішуються деталізовані завдання 4.2-4.10.

Традиційні підходи виділення і дослідження окремих підсистем і їх вузька систематизація неефективні. Так, припустимо, що на першому рівні ставиться ціль розробки вібраційних методів підвищення контролю якості виготовлення (ціль 3.1, рис. 4.1) ЕД, що серійно випускаються, які не проходили стадію вирішення завдань 2.1-2.17. Це означає, що в серійному виробництві знаходиться недоведений і неконтролепридатний ЕД (цілі 2.5, 2.10). Повністю вирішувати завдання 2.1-2.17 на стадії виготовлення або експлуатації не завжди виявляється технічно можливим без зміни конструкції елементів ЕД. Без достатньої інформації про властивості систем, отриманих на стадії вирішення завдань 2.1-2.17, складно на належному технічному рівні вирішити завдання 3.1-3.6. В результаті вимушеного компромісу при вирішенні цих завдань на практиці знижується ефективність системи контролю якості виготовлення (ціль 3.1). Аналогічно, ефективність системи діагностування 4.1 (рис. 4.1), буде тим нижче, чим менше досліджені властивості підсистем 2.1 і 3.1, щодо забезпечення віброконтролепридатності ЕД електробусів, усунення резонансних явищ, нестабільності робочих процесів і, відповідно, вібраційних параметрів. Відхід від такої послідовності вирішення завдань впровадження вібраційних методів діагностування – найпоширеніша помилка практичних працівників. Тому впровадження важливих наукових результатів і засобів діагностування на практиці може не принести необхідного ефекту.

Таким чином, запропонована система послідовності оцінки якості 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.

З огляду на багатоаспектність і складність взаємозв'язків між показни-

ками забезпечення якості ЕД на стадіях проектування, виготовлення, експлуатації та технічного обслуговування, розробка критеріїв оцінки технічного стану здійснюється, виходячи з вимог створення єдиних засобів, методології та метрологічного забезпечення, що дозволяють одним приладом діагностувати будь-які ЕД. Запропонована послідовність рішення наукової проблеми, рис. 4.1, пов'язує між собою напрямки і завдання розробки методів оцінки ЕД за ВДХ на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації.

4.2 Методи оцінки технічного стану електродвигунів тягового електроприводу

Існують різні методи діагностування ЕД [182, 192]. Їх вибір залежить від багатьох умов, і в тому числі від того, на якому з етапів життєвого циклу проводиться діагностування, табл. 4.2 [12].

Таблиця 4.2 – Етапи діагностування оцінки якості електродвигунів

Етапи життєвого циклу ЕД	Мета діагностування ЕД	Основні види несправностей ЕД
Етап виробництва	Контроль оптимального проектування і доведення, для досягнення надійності та довговічності	Кінематичні помилки виготовлення деталей, вихід структурних параметрів за допустимі значення дефекти збірки (неврівноваженість, наявність ексцентриситету, різного роду перекося, зазори, відносні зміщення взаємодіючих деталей, недотримання технології і т.д.)
Етап приймально-здавальних випробувань	Контроль якості готових двигунів, визначення класу технічного стану	Зміна параметрів ЕД, які призводять до несправностей і відмов
Етап експлуатації	Виявлення відхилень діагностичних параметрів від норм та процесів старіння елементів	Будь-які дефекти і поломки, що залишаються на етапі виробництва або з'явилися на етапі експлуатації
Етап ремонту	Передремонтна оцінка і післяремонтний контроль технічного стану з метою визначення несправності і якості ремонту відповідно	

Важливо відзначити, що за швидкістю розвитку експлуатаційні дефекти ділять на категорії, представлені на рис. 4.2 [12].

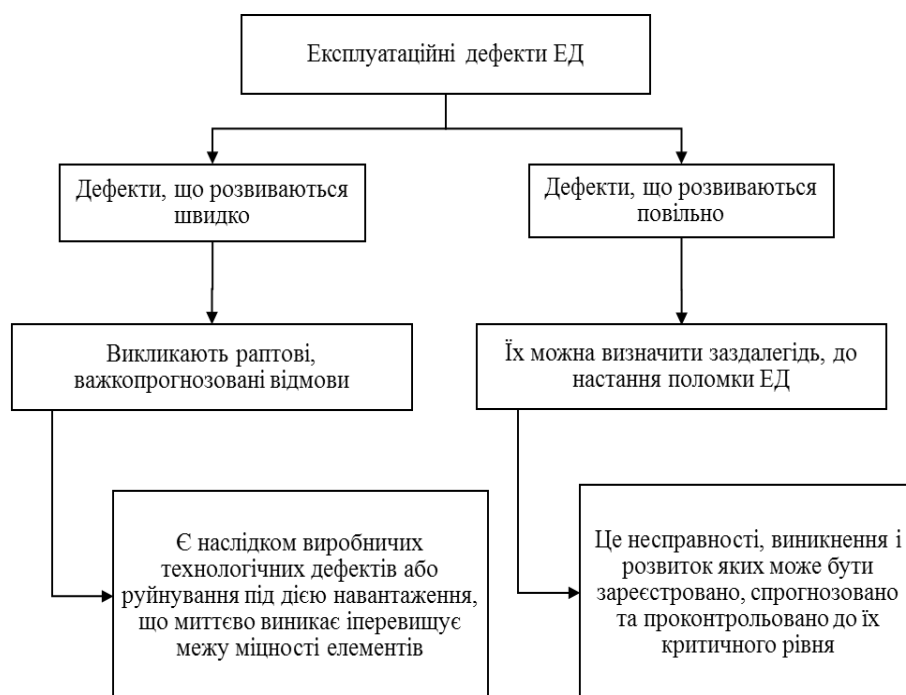


Рисунок 4.2 – Категорії експлуатаційних дефектів ЕД у відповідності до швидкості розвитку

На даний час особлива увага приділяється розробці і впровадженню інтелектуальних систем діагностування [193], заходам, пов'язаним із здійсненням контролю під час роботи або використанням спеціалізованих систем діагностування ЕД для виявлення дефектів на ранній стадії і оцінки технічного стану досліджуваного об'єкта. Але наразі більш поширеними є декілька видів діагностування, які не потребують виведення ЕД з експлуатації: вібраційний [194], за споживаним струмом двигуна [192], тепловізійні [195] тощо.

Основні методи діагностики ЕД можна представити у вигляді структурної схеми, представленої на рис. 4.3 [12].

Кожен з методів має свої переваги і недоліки, які більш детально представлені у роботі автора [12]. Та найбільш інформативним, а значить і найбільш ефективним з усіх методів є вібраційний метод. 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 [12].



Рисунок 4.3 – Класифікація методів діагностування

4.3 Обґрунтування критеріїв і методів оцінки електродвигунів тягового електроприводу за вібродіагностичними характеристиками

Актуальність застосування методів оцінки тягових ЕД, які використовуються в електробусах, за ВДХ в першу чергу пов'язана з особливістю режимів їх роботи. Тим паче, це відноситься до електробусів, призначених для перевезення пасажирів в міських умовах експлуатації. Дані режими роботи характеризуються довільним чергуванням режимів розгону, гальмування і руху з усталеною швидкістю, подоланням підйомів і спусків, короткочасних стоянок на зупинках, заторах, світлофорах, перехрестях і «випадкового» навантаження на систему тягового електроприводу [124]. Така динаміка є причиною виникнення підвищеної вібрації електродвигунів [190]. Основні джерела шуму і вібрації ЕД на прикладі асинхронного ЕД і розроблена класифікація основних причин і джерел вібрації і шуму ЕД представлені на рис. 4.4, а на рис. 4.5 – віброакустична граф-модель ЕД [12, 190, 191].



Рисунок 4.4 – Причини і джерела вібрації асинхронних електродвигунів

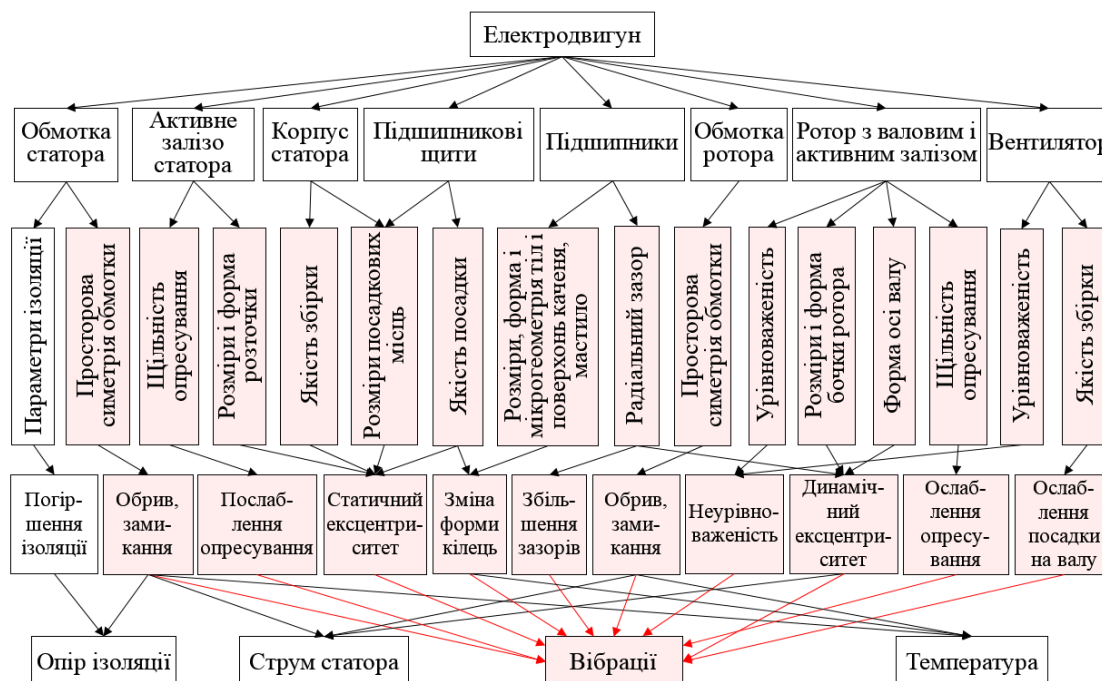


Рисунок 4.5 – Віброакустична граф-модель асинхронного електродвигуна

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

До переваг дослідження ВДХ для оцінки ЕД можна віднести [190]:

- пропорційну залежність зміни вібрації від навантаження і частоти обертання, зазору, значень геометричних похибок;
- фізичні властивості збудження вібрації, що дозволяють в якості діагностичного параметра використовувати динамічні ознаки;
- властивості вібраційних сигналів швидко реагувати на зміну технічного стану, що дозволяє в реальному часі спостерігати і зіставляти реакцію всіх компонент ЕД, пов'язаних кореляційною залежністю зі зміною конструкції, технології виготовлення, робочих процесів, режимів роботи;
- можливості використання сучасних комп'ютерних технологій для швидкого отримання інформації про технічний стан, підвищення точності діагнозу технічного стану, зниження трудомісткості ресурсних і експлуатаційних випробувань і діагностування.

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 [12, 190, 191].

Неможливо виготовити двигун, який не має вібрації взагалі, але є рівні вібрації, які можна розглядати як допустимі. Збільшення вібрації більше або менше допустимого рівня свідчить про наявність дефектів, несправностей і зміну режимів роботи. Кожен дефект збуджує вібрації на певній частоті, групі частот або широкій смузі частот [190]. Це дає можливість визначати технічний стан електродвигуна, наявність або відсутність несправності способом простого визначення рівнів спектральних складових вібраційного процесу і порівнянням їх з вихідним значенням.

З класифікації методів діагностування ЕД (рис. 4.3) та системного аналізу їх технічних можливостей [190] випливає, що ефективність застосування вібраційних методів на всіх стадіях життєвого циклу ЕД обумовлена високою чутливістю вібраційних процесів до зміни конструкції, технології, динамічного стану вузлів і деталей, до розподілу пульсацій швидкості, навантаження або тиску в робочих середовищах вузлів, до поля силових впливів, умов експлуатації, до зміни робочих процесів і режимів функціонування.

Достовірність вібраційної діагностики забезпечується прямим зв'язком вібраційних процесів зі структурними параметрами зазорів кінематичних і геометричних похибок деталей і функціонуванням механізмів.

Основною відмінною особливістю методів вібраційного діагностування є використання в якості діагностичних ознак, динамічних параметрів, які є результатом зовнішнього впливу і взаємодії деталей електродвигуна в процесі його роботи. Широкі частотні і динамічні діапазони коливальних процесів, мала інерційність, велика швидкість поширення віброакустичних хвиль по деталях і корпусу ЕД обумовлює швидку реакцію вібраційного сигналу на зміну технічного стану. Ці властивості є найважливішими для швидкого визначення технічного стану, застосування бортових систем контролю аварійних ситуацій, коли швидкість постановки діагнозу і прийняття рішення є гарантією запобігання аварійних ситуацій [190].

Сучасні експериментальні методи вібраційного діагностування із застосуванням віброаналізатора і програмного забезпечення ПК на стадії доведення ЕД є зручним інструментом швидкого отримання інформації, необхідної для усунення динамічних проблем і прийняття конструктивних рішень щодо оптимізації робочих процесів і режимів роботи. Це дозволяє застосовувати економічно найбільш ефективний метод вібраційної організації динамічних і технологічних властивостей конструкції ЕД, що полягає у виготовленні прототипів на основі інженерних знань і досвіду з подальшим проведенням їх вібраційних випробувань в лабораторних умовах. Фахівцю набагато простіше користуватися методами вібраційного діагностування. З їх допомогою можна шви-

дше і з більшою вірогідністю визначати ті параметри і характеристики, які істотно підвищують ефективність доведення ЕД в процесі конструювання.

Вібродіагностика – найбільш інформативний і універсальний метод в порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю, параметричного контролю та трібодіагностикою. Висока універсальність методу базується на властивостях вібраційних процесів, загальних для багатьох типів механізмів і систем. Тому методи дослідження вібраційних характеристик дозволяють піти до аналізу стану деталей і вузлів електродвигуна з різними фізичними процесами їх функціонування, але з єдиною спільною позицією виникнення вібраційних процесів. Це дозволяє з меншими витратами створювати єдині засоби автоматизації процесів діагностування для забезпечення контролепридатності ЕД.

Розглянемо основні властивості вібраційних сигналів, які використовуються для оцінки якості тягового електродвигуна для електробуса.

1. Пропорційна залежність зміни вібрації від навантаження і частоти обертання, зазору, значень геометричних похибок, що дозволяє нормувати вихідні та граничні їх значення для контролю якості проектування, виготовлення і експлуатації електродвигуна.

2. Висока універсальність, чутливість і вибірковість вібраційного сигналу до параметрів технічного стану електродвигунів, що дозволяє:

- діагностувати більшість дефектів механічних систем і систем;
- виявляти дефекти, що зароджуються;
- діагностувати дефекти збірки деталей і вузлів (несоосність, вигин, переки, дисбаланс).

3. Фізичні властивості збудження вібрації, що дозволяють у вигляді діагностичного параметра використовувати динамічні – комплексні ознаки структурного, функціонального та динамічного стану електродвигуна:

- вібродіагностичні характеристики ЕД;
- власні частоти в зборі деталей, вузлів і агрегатів;
- резонансні явища;
- жорсткісні характеристики.

4. Властивості вібраційних сигналів швидко реагувати на зміну технічного стану ЕД, що дозволяють спостерігати і зіставляти в реальному часі реакцію всіх компонент – структурного, функціонального та динамічного стану механізмів на зміни: конструкції; технології виготовлення і збірки; робочих процесів; режимів роботи; регульовальних робіт; кореляційної залежності дефектів механізмів.

5. Можливість створювати системи автоматизації контролю і попередження аварійних ситуацій і управління роботою електродвигуна.

6. Можливість створювати сучасні комп'ютерні і мікропроцесорні бортові, стаціонарні і переносні системи швидкого отримання достовірної інформації про технічний стан ЕД на стадіях доведення конструкції, виготовлення і експлуатації.

7. Наявність великого обсягу інформації в одному вимірі вібрації.

8. Велика достовірність вібраційного діагностування.

9. Прогресивна технологія діагностування (без розбирання).

10. Зниження трудомісткості ресурсних і експлуатаційних випробувань і діагностування.

Комп'ютерні та мікропроцесорні системи дають можливість вібраційного діагностування макетних і дослідних зразків, якості виготовлення і експлуатації за рахунок змінних блоків (плат) запам'ятовуючих пристроїв програмного забезпечення та єдності метрологічного забезпечення, що робить їх доступними в частині вартості, навчання персоналу і зручності в роботі. Можливості комп'ютерних і мікропроцесорних систем автоматизувати процес діагностування ЕД дозволяють створювати універсальні вбудовані (бортові і штатні) і зовнішні (портативні і стаціонарні) засоби діагностики, придатні для використання водієм, діагностом, оператором, при будь-яких формах організації технічного сервісу.

Вплив зазору між магнітопроводами статора і ротора на вібраційні характеристики електродвигунів.

Зі збільшенням зазору між магнітопроводами ротора і статора змінюються вібрації роторних і статорних гармонік поля, які при певній величині зазору, співвідношень чисел пазів ротора і статора є оптимальними для конк-

ретної конструкції ЕД. Тому збільшення зазору на 0,24-0,4 мм не завжди може призводити до зниження рівнів вібрації двигунів [191].

Зниження рівнів вібрації на зубцевих частотах (частотах рівних добутку частоти обертання валу на число зубів) залежить від величини механічних складових в області дії магнітних сил. Вібрації, викликані гармоніками магнітного поля, наприклад, наявністю на поверхні магнітопроводу шліців, зі збільшенням зазору знижується в більшій мірі, ніж вібрації, викликані зубцевим полем.

Оптимальною величиною зазору між магнітопроводами ротора і статора двигунів А92 -2 8-го габариту – зазор 1,2 мм. Є припущення, що зі зростанням габариту електродвигуна величина оптимального зазору збільшується, але ці дослідження не входили в завдання даної роботи [191].

Вплив індукції в зазорі магнітопроводів ротор-статор на вібраційні характеристики електродвигунів.

Дослідження впливу індукції в повітряному проміжку між магнітопроводами ротора і статора і в спинці статора на вібраційні характеристики проводилися на дво полюсних асинхронних ЕД шляхом порівняння спектральних складових вібрації двигунів з різними величинами індукції. Зменшення індукції забезпечувалося заміною обмотки статора [191].

Недоліком такої методики дослідження є необхідність перезбірки ЕД, що вносить похибку у результати випробувань. Тому аналіз впливу величини індукції на вібраційні характеристики ЕД проводиться в області зубцевих частот, де вплив перезбірки на рівні вібрацій мінімальний.

Випробування ЕД проводилися в трьох монтажних виконаннях: горизонтальному на лапах і вертикальному на лапах і на вертикальному фланці в режимах холостого ходу і номінального навантаження.

Вимірювання вібрації проводилися на голівках гвинтів, що кріплять електродвигун через амортизатори до стенду. Рівні вібрації в третьоктавних смугах частот визначалися в децибелах по середньому квадратичному значенню коливального прискорення. Вимірювання вібрації проводилося в напрямку, перпендикулярному площині кріплення.

Проведені дослідження показали що зниження на 25...40 % індукції

призводить до зниження до 7 дБ рівнів вібрації на зубцевих частотах. Величина зниження залежить від монтажного виконання ЕД. Вона проявляється сильніше при кріпленні електродвигуна на лапах (як вертикально, так і горизонтально) і слабкіше на фланці.

Для двополюсного електродвигуна зниження вібрації становить 7...8 дБ при кріпленні на лапах і 2 дБ при кріпленні на фланці [191].

Вплив якості електроенергії живлення асинхронних двигунів на рівні вібрації на частоті 100 Гц.

Від якості електроенергії живлення асинхронних двигунів напряму залежить їх віброактивність, а саме: чим ближче крива поля до синусоїди, тим менше рівень магнітної вібрації і шуму. Тобто для безшумної роботи ЕД необхідно мати якомога більше пазів на полюс і фазу. При виборі ротора з числом пазів набагато більшим, ніж у статора, зменшуються гармоніки поля ротора. Для зниження додаткових втрат в цьому випадку ($z_2 \gg z_1$) застосовуються закриті пази ротора з висотою містка більшої глибини проникнення зубцевої гармоніки статора в розшаровану поверхню ротора.

Живлення ЕД від неякісної електроенергії (синусоїдальності чи імпульсної частоти, що спричиняють статичні або напівпровідникові перетворювачі) істотно впливає на збільшення рівнів вібрації ЕД. Причини високочастотної вібрації асинхронних ЕД при синусоїдальній неякісній електроенергії полягають в обмотувальних і зубцевих гармоніках, гармоніках насичення, ексцентриситету і т.д. При несинусоїдальній напрузі живлення виникають додаткові високочастотні магнітні сили і моменти від взаємодії основної гармоніки поля з вищими часовими гармоніками струмового навантаження на частотах, кратних $6f_0$; $6nf_0$; $(6n \pm 2)f_0$; $6nf_0 \pm kf_p$, де f_0 – частота мережі; n і $k = 1, 2, 3 \dots$; f_p – частота обертів.

Виходячи з вище зазначеного, розглядається вплив спотворення форми кривої напруги і розбалансу напруги мережі частотою 50 Гц на рівні вібрації на прикладі двополюсних електродвигунів АН 92-2 горизонтального виконання потужністю 90 кВт, напругою живлення 380 В [191].

При вимірюванні коефіцієнта спотворення синусоїдальної форми напруги до 14 % збільшується третя гармонійна складова напруги, п'ята і сьома гармонійні складові струму зменшуються, а рівні вібрації двигуна на частоті 100 Гц практично не змінюються. При розбалансі напруги мережі від 0,13% до 5% рівні вібрації електродвигунів збільшуються на частоті 100 Гц у напрямі осі Z на 11...14 дБ, осі Y – на 13...18 дБ [191].

Проведені дослідження показують, що визначення вібраційних характеристик при приймально-здавальних випробуваннях двигунів і їх експлуатації повинно проводитися при різниці лінійної напруги мережі живлення не більше 4 В [191].

Експериментальні дослідження впливу якості напруги живлення на електродвигунах, встановлених в електробус не проводилися, але, беручи до уваги дослідження авторів статті [196], можна стверджувати, що від якості напруги залежить не тільки якість роботи ЕД, але і його надійність.

Для забезпечення надійної роботи тягового ЕД, встановленого в електробус, необхідно приймати всі можливі засоби для підвищення якості електроенергії, що живить двигун.

У більшості електрокарів використовуються трифазні тягові двигуни/генератори змінного струму. Оскільки батареї забезпечують постійний струм, то для перетворення постійного струму в змінний, потрібні інвертори (перетворювачі частоти). Але інвертори можуть негативно впливати на роботу ЕД: вони викликають небажані напруги на валу двигуна, що дуже впливає на роботу підшипників. Ця напруга на валу поступово псує і в кінцевому підсумку, руйнує підшипники електродвигуна.

Повторювані і швидкі імпульси, які подаються на двигун окрім підшипників, викликають пошкодження обмоток ЕД. Тож сукупність гармонік, паразитна ємність, ємнісний зв'язок, електростатичне накопичення і синфазна напруга є дуже серйозною проблемою, бо суттєво знижує надійність тягових ЕД. В будь якому випадку, високі пікові напруги і швидкий час наростання напруги можуть викликати кумулятивне погіршення ізоляції, підшипників,

лаку котушки тощо. Якщо комплексний опір навантаження вище, ніж опір на лінії, струм протікає назад до інвертора, створюючи стрибки напруги на клеммах двигуна. Ці стрибки можуть бути в два рази вище, ніж напруга на шині постійного струму.

Щоб вирішити проблему з пошкодженням електричних підшипників і зробити інверторні системи більш надійними, потрібен ефективний метод заземлення валів двигуна [185]. Заземлення валу двигуна може відводити шкідливі струми, перш ніж вони спричиняють пошкодження підшипників і гарантувати загальну надійність електробуса.

У випадку електричного пошкодження підшипників двигуна основною причиною є синфазна напруга, що виникає з несинусоїдальних сигналів, створюваних схемою перемикачності потужності інвертора. Надзвичайно швидкий час наростання напруги (dU/dt), пов'язаний з біполярними транзисторами з ізолюваним затвором, які зазвичай зустрічаються в сучасних інверторах з широтно-імпульсною модуляцією, може привести до накопичення зарядів на валу двигуна. Без ослаблення, ця напруга розряджається через підшипники, викликаючи небажаний електроерозійний вплив, який руйнує шарико-підшипники і доріжки кочення і призводить до передчасного виходу з ладу підшипника/двигуна [196].

ЕД в транспортних засобах працюють в діапазоні від 1000 до понад 16000 об/хв. При таких швидкостях дуже тонкий шар мастила між елементами кочення і доріжкою кочення в підшипнику може руйнуватися через розряди напруги від 5 до 40 В. Кожен раз, коли змащувальний діелектрик долається, електрична дуга, що проходить через підшипник, спалює мастило і підриває крихтну ямку (кратер плавлення) на поверхні сталі. На несучих частотах інвертора більше 12 кГц може створюватися багато мільйонів ямок за дуже короткий час. Також цей процес генерує сталеві і вуглецеві частинки, які забруднюють мастило, ще більше знижуючи його мастильні властивості.

Незабаром часті розряди можуть залишити всю обойму підшипника пронизаною ямами. У явищі, що має назву флютинг (перемикачності), робоча

частота інвертора викликає концентровану точкову корозію через регулярні проміжки вздовж стінки обойми підшипника, утворюючи ребристі борізки, які призводять до шуму і вібрації.

Вібрації електродвигуна в динамічних режимах експлуатації.

Для міських електробусів характерні динамічні режими роботи, які характеризуються частим пуском, гальмуванням, реверсом, змінами режимів навантаження, скидами та набросами навантаження тощо. Саме в цих режимах відбувається істотне зростання рівнів вібрації ЕД.

Вібрація ЕД під час пуску в основному визначається електромагнітними перехідними процесами, які збуджують коливання, близькі до крутильних. Дослідження показали, що найбільша відмінність в спектрах вібрації ЕД спостерігається в низькочастотному діапазоні в області власних частот, що визначаються жорсткістними характеристиками кріплення ЕД (жорстке, що амортизує), рис. 4.6 [197].

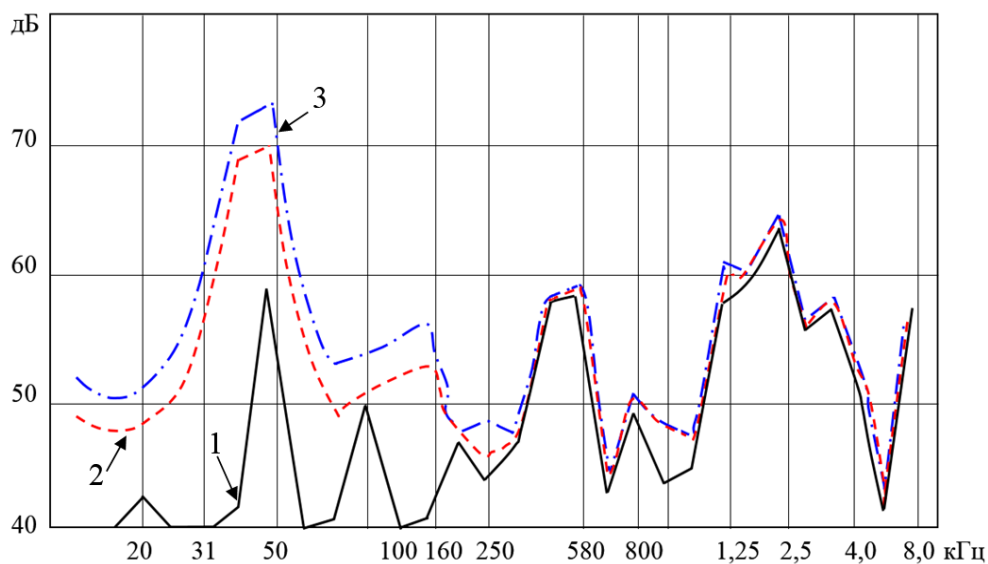


Рисунок 4.6 – Пускова вібрація асинхронного двигуна: 1 – режим холостого ходу; 2 – при пуску $t_0 = 8$ с; 3 – $t_0 = 4$ с

Спектри перехідних процесів пов'язані з їх тривалістю, тобто з часом від початку включення живлення до досягнення сталого режиму роботи. Чим коротші пускові режими, тим інтенсивніше вібраційні процеси, рис. 4.6 [197].

Розмахи коливань при пуску мають максимальні значення в перші 120...150 мс і потім, у міру загасання електромагнітного перехідного процесу і досягнення ротором номінальної частоти обертання, знижуються до встановлених значень. Залежно від моментів інерції роторів і напруги з яких здійснюються пуски, тривалість перехідних процесів в асинхронних двигунах становить 75...500 мс.

4.4 Параметри вібраційних сигналів

Вібродіагностика заснована на розпізнаванні технічного стану машин і механізмів за вихідною інформацією, що міститься у вібраційному сигналі. Вібраційним сигналом узагальнено називають фізичні величини (зміщення, швидкості, прискорення), що характеризують механічні коливання, які супроводжують функціонування механізму. Залежно від способу збудження вібрації поділяються на: вільні, вимушені, пов'язані, автоколивання, параметричні коливання [190]. Основними параметрами вібрації є амплітуда, частота і фаза.

Джерелами порушення вібрації механізмів є зіткнення деталей. Фізично носієм інформації про стан елементів механізмів у вібраційній діагностиці служать пружні хвилі, які збуджуються в механізмах деталей, що стикаються. Серія імпульсів з періодом T утворює спектр імпульсів вібрації механізму (рис. 4.7, в).

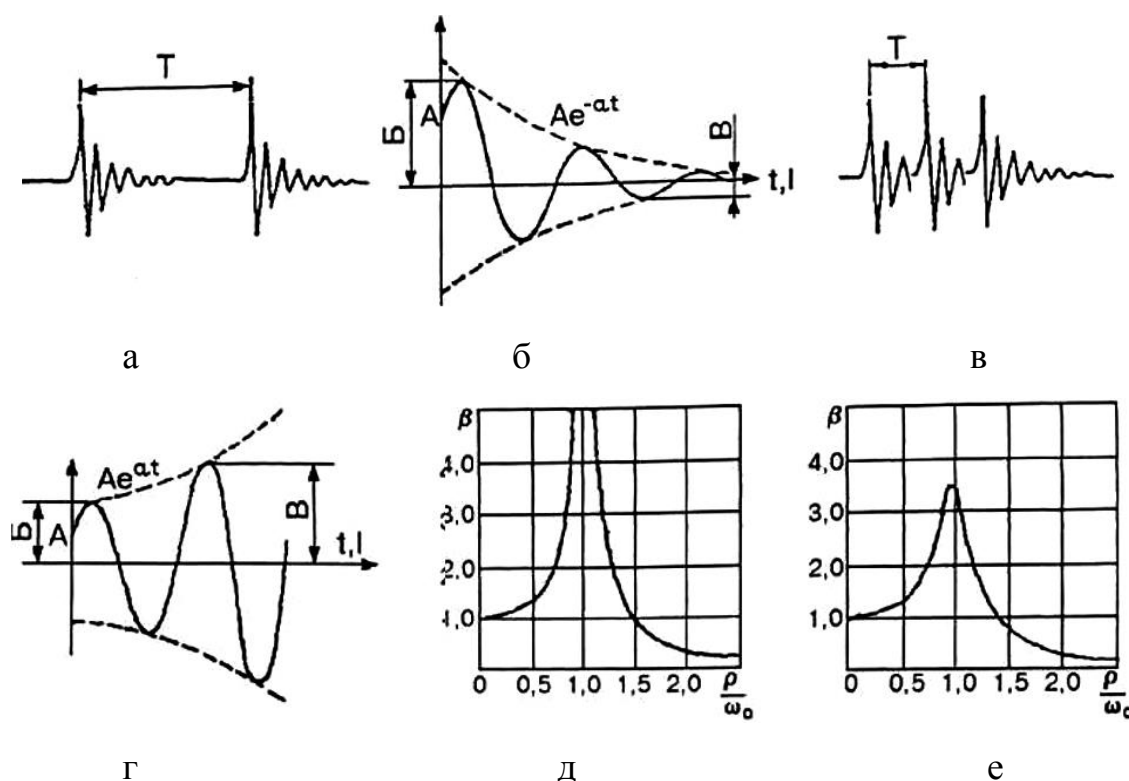
Розрізняють два основних випадки формування сигналу вібрації.

1. Коли черговий імпульс з'являється після того, як припинилися коливання першого імпульсу. Цей випадок є простою формою сигналу при малих числах обертів, але він рідко зустрічається в ЕД (рис. 4.7, а).

2. Коли перший імпульс не встигає затухати, а доповнюється новими імпульсами, збільшуючи рівні вібрації (рис. 4.7, в). Зокрема, збільшення може дорівнювати Ae^{at} , і рух має вигляд, зображений на рис. 4.6, г, при збігу вимушених і власних частот деталей виникає резонанс (рис. 4.7, д, е).

Сукупність амплітуд і частот вібрації називають спектром вібрації. При

графічному зображенні спектрів вібрації по осі абсцис відкладають частоту, а по осі ординат – рівні вібрації (рис. 4.8) [190]. Спектри періодичного і майже періодичного процесів є дискретними лінійчатиими, причому у першого (рис. 4.8, а), на відміну від другого (рис. 4.8, б) відстань між сусідніми лініями кратна основній частоті. Спектр, обмеженого в часі детермінованого і стаціонарного випадкового процесу, є суцільним (рис. 4.8, в). Якщо процес являє собою накладення періодичних і випадкових процесів, то спектр має змішаний характер (рис. 4.8, г), тобто складається з накладення суцільного і дискретного спектрів.



Б – амплітуда, що порушується дефектом; В – амплітуда при контролі вібрації на великих відстанях від джерела вібрації

Рисунок 4.7 – Графіки сигналів вібрації: а – послідовність імпульсів з періодом T ; б – загасаюча амплітуда A сигналу за часом t в просторі конструкції; в – накладення сигналів вібрації; г – посилення вібрації, зокрема що дорівнює Ae^{at} ; д – посилення вібрації β при збігу вимушених сил p і власних частот ω_0 деталей, при періоді $p/\omega_0=1$ для ідеалізованої системи, в якій відсутній опір, викликаний тертям; е – залежність коефіцієнта посилення вібрації в реальних системах з внутрішнім тертям

При дослідженні вібрації розглянутий частотний діапазон зазвичай розбивають на смуги. Приклад графічного зображення спектра в смугах з постійною відносною шириною наведено на рис. 4.8, д.

Параметри вібраційних сигналів, порушуваних в кінематичних парах підшипників кочення і породжувані ними вібраційні процеси в даній роботі не розглядаються.

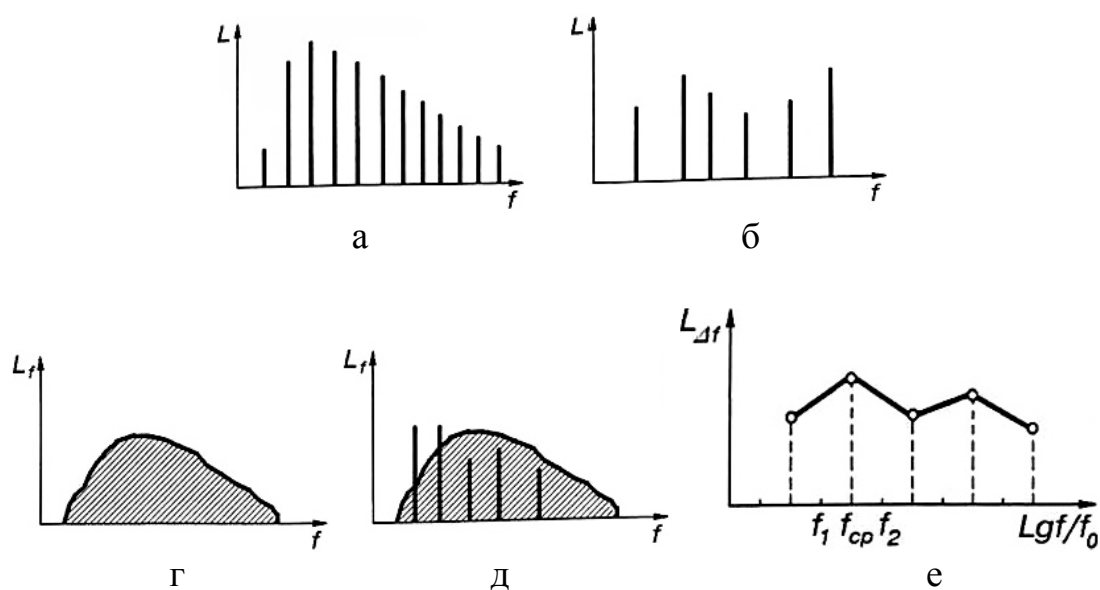


Рисунок 4.8 – Приклади графічного зображення спектрів: а – аперіодичний процес, лінійчатий спектр; б – майже періодичний процес, лінійчатий спектр; в – випадковий процес, суцільний спектр; г – змішаний процес, змішаний спектр; д – спектр в смугах частот з постійною відносною шириною; L , L_f , $L_{\Delta f}$ – рівні; f – частота, Гц ($f_0=1$ Гц)

Вібрація широкого спектру частот, поширюючись по конструкціях механізмів агрегатів і створюючи додаткові рухи до основного робочого руху елементів, викликає інтенсивні коливання насамперед тих елементів, власні частоти яких співпадають з окремими ділянками спектра, що збуджується. Ось чому важливо отримати розрахункові методи визначення збуджуваних сил частот і рівнів вібрації, порушуваних дефектами складових ЕД для побудови розрахункового спектра вібрації на стадії проектування і діагностування дефектів при доведенні конструкції, контролі якості виготовлення і експлуатації ЕД. За роз-

рахунковим спектром вібрації можна визначити дефекти і слабкі вузли конструкції і вже на стадії проектування розробити заходи для їх усунення.

Середній потік енергії $\vec{\Phi}$, яка проходить через поверхню S , перпендикулярно до напрямку поширення вібрації, дорівнює добутку середньої щільності енергії на швидкість поширення хвилі v і на площу поверхні S [190]:

$$\vec{\Phi} = 0,5 \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot v \cdot S, \quad (4.1)$$

де ρ – щільність середовища.

При поширенні сферичної хвилі від точкового джерела середня щільність потоку енергії \vec{J} (Вт/м²) обернено пропорційна квадрату відстані від джерела:

$$\vec{J} = \Phi / (4\pi r^2). \quad (4.2)$$

Крім того, вібрація характеризується вібраційною потужністю, яка передається через елементарні ділянки поширення вібрації:

$$N = \frac{1}{T} \int_0^T F(t)v(t)dt, \quad (4.3)$$

де $F(t)$ – діюча сила.

Очевидно, що чим менше товщина стінок або контактних майданчиків деталей що сполучаються, тим більше щільність енергії хвиль, які проходять, і більша їх руйнівна дія. Швидкість поширення пружних хвиль приблизно дорівнює 5000 м/с з частотою порядку 65000 Гц [190].

Дуже важливою характеристикою негармонійної вібрації є розподіл щільності вібрації по частотному діапазону – спектр потужності. Цю характеристику отримують в процесі спектрального аналізу вібраційних сигналів.

Розпізнавання технічного стану механічної системи можливо, якщо вібраційний процес в кожній контрольній точці уявити періодичними функціями у вигляді ряду Фур'є [190]:

$$x(t) = 0,5a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t, \quad (4.4)$$

де $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$ коефіцієнти Фур'є.

Коефіцієнт 0,5 характеризує середнє за період значення величини вібрації, коефіцієнти a_1 і b_1 – компоненти руху з частотою ω . Ці компоненти – перша або основна гармоніка частоти вібраційного руху. Компоненти руху з частотами $k\omega$, де $k > 1$ – вищі гармоніки (k – номер гармоніки). Сукупність частот гармонійних складових, розташованих в порядку їх зростання, становить частотний спектр періодичного процесу. Кожній частоті відповідає амплітуда A_k і початкова фаза φ_k :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}. \quad (4.5)$$

Сукупність амплітуд, які характеризують гармонійні вібрації, розподілені в порядку збільшення частот, представляють амплітудний спектр періодичного процесу. Визначення спектру частот і коефіцієнтів Фур'є по заданим функціям часу становить основу спектрального аналізу вібрації.

Оскільки на шляху від джерела збудження вібрації до точки вимірювання завжди є проміжні деталі, то від їх якості, маси, форми, габаритів, характеру сполучень, а також від частоти збудження залежить характер загасання вібрації і поява резонансних явищ (рис. 4.7). Тому реальні вібраційні процеси можуть бути викликані дефектами, резонансними явищами при збігу будь-якої з частот збудження з однією з власних частот елементів механізму або їх зміні через локальні або постійні прояви лінійності пружних і демпфуючих властивостей окремих вузлів агрегатів.

Таким чином, вібрація механізму агрегату визначається величиною діючої змінної сили, механічним опором (імпедансом) деталі, що коливається, коефіцієнтом передачі вібрації від місця її виникнення до місця вимірювання, величиною конструктивного демпфірування вібрації. Зазначені фактори не-

обхідно враховувати при виборі точок контролю вібрації в ході дослідження динамічних характеристик ЕД і діагностування якості виготовлення, складання, експлуатації та ремонту.

Розглянемо дані кількісних параметрів вібрації та допустимих їх значень. З теорії коливань відомо, що вібраційний процес підпорядковується гармонійним законом $\omega = a \cdot \sin \omega t$.

Цей процес можна характеризувати чотирма параметрами: амплітудою переміщення a , амплітудою швидкості $v = a\omega$, амплітудою прискорення $w = a\omega^2$ і круговою частотою ω .

Для характеристики вібрації можна задати два будь-яких параметра, наприклад, a й v або a і w та інші, якщо вибрати будь-який з шести можливих поєднань чотирьох елементів по два. При цьому, теоретично, не має значення, які з цих параметрів вибрати, так як вибравши один який-небудь, легко отримати всі інші.

Основним параметром нормованої вібрації на низьких частотах часто приймають амплітуду коливань, оскільки інерційні зусилля при цьому невеликі. У цьому випадку найбільш об'єктивна оцінка вібрації можлива тільки за величиною прискорень. У тих випадках, коли при вібрації з'являються великі навантаження, її нормування за величиною прискорень виявляється єдиною можливою. Очевидно, що прискорення є більш загальною характеристикою вібрації, оскільки визначаються сукупністю значень частоти і амплітуди. Незважаючи на малі значення a , добуток $a\omega^2$ виходить більшим через значні величини частот ω .

4.5 Методи дослідження рівня вібрації для оцінки технічного стану ЕД

Дослідження всього комплексу завдань наукової проблеми проводилися теоретично і експериментально.

Основним методом теоретичних досліджень були системний аналіз, класифікація та розпізнавання образів вібраційного стану тягового електродвигуна електробуса. Методологія системного підходу до підвищення якості

ЕД на базі параметра вібрації, заснована на нормуванні вібрації ЕД за критерієм забезпечення заданого ресурсу і надійності на стадії проектування і за критерієм збереження заданої проектної якості на стадіях виготовлення, доведення і експлуатації. Для цього розробляються 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.

Такий системний підхід до використання вібродіагностичних характеристик для контролю технічного стану на всіх стадіях життєвого циклу ЕД дозволив створити єдину методологію і засоби, що забезпечують поетапний і безперервний ефективний контроль процесу створення, виготовлення і експлуатації тягового ЕД, включаючи передпроектне прогнозування вихідних показників якості ЕД. Для розуміння проблеми і сутності шляхів її вирішення прийнятий логічний системний аналіз, метод дерева цілей (рис. 4.1).

При теоретичних дослідженнях вібраційних параметрів і вібраційних властивостей ЕД використовувалися: методи класифікації і розпізнавання образів вібраційного стану ЕД, спектральний аналіз ВДХ, ймовірнісно-статистичні методи оцінки і нормування вібрації.

При експериментальних дослідженнях і розробці методів оцінки якості ЕД використовувалися апробовані на практиці, що пройшли експертизу фахівців [182, 184, 198] і мають гарантовану ступінь достовірності методи і моделі розпізнавання рівня вібрації.

1. Натурні випробування по визначенню ВДХ ЕД із застосуванням високоточної вимірювальної і віброаналізуючої електронної апаратури.

2. Спектральний, амплітудно-часовий і статистичний аналіз віброспектрів і дискретних його складових як найбільш статистично стійких інформативних характеристик ЕД.

3. Зіставлення розподілів спектрів і дискретних складових контурних,

швидкісних, навантажувальних і режимних вібраційних характеристик вихідної і зміненої конструкції або технології виробництва по всьому діапазону частот від 5 Гц до 10 кГц.

4. Класифікації та системний аналіз причин і джерел вібрації за походженням, систем їх діагностичних ознак, видів зміни вібрації за часом напруцювання ЕД, методів діагностування.

5. Класифікація діапазонів експлуатаційної вібрації для якісної оцінки технічного стану ЕД в експлуатації.

6. Статистичний аналіз і зіставлення структурних і вібраційних діагностичних параметрів відомих і власних досліджень механізмів ЕД.

7. Статистична обробка віброектрів і нормування вібрації відомими методами теорії ймовірності.

8. Поділ джерел вібрації і розпізнавання дефектів, засновані на розпізнаванні образів по частоті, амплітуді, фазовому співвідношенню, напрямку вібрації, гармонікам і модуляційним характеристикам частот і амплітуд обвідної, шляхом зміни режимів роботи і послідовного демонтажу деталей або зміни конструкцій

9. Методи математичної статистики в оцінці і нормуванні вібраційних діагностичних параметрів.

10. Прогнозування ресурсу деталей і вузлів по екстраполяції знайденого тренда зміни вібраційних параметрів за часом напруцювання ЕД.

11. Розробка розрахункових методів оцінки рівнів вібрації, порушуваних ЕД. Прогнозування технічного стану на основі розрахункових і статистичних даних зміни експериментальної вібрації з напруцювання ЕД.

Необхідний рівень надійності і ресурсу забезпечується проектуванням ЕД заданого рівня вібрації. Для цього визначаються рівні вібрації, досягнуті в аналогах (ціль 2.7, рис. 4.1), визначаються допустимі вібрації, розробляються класи вібрації ЕД, проводиться предпроектний розрахунок рівнів вібрації і методи зниження і доведення вібрацій до вимог заданого класу (цілі 2.3-2.5, рис. 4.1).

Основними методами досліджень вібрації ЕД на стадії проектування є спектральний аналіз вібрації аналогів і розрахунок рівнів вібрації, а при доведенні – натурні вібровипробування макетних і дослідних зразків; графічні та аналітичні розрахунки величин зниження вібрації ЕД; зіставлення спектрограм вібрації вихідної і зміненої конструкції, номінальних і змінених режимів роботи, пошук і усунення резонансних явищ, нестабільності вібрації, забезпечення віброконтролепридатності ЕД. Поділ джерел вібрації і розпізнавання дефектів проводиться за частотою, амплітудою, фазовому співвідношенні і напрямку вібрації, гармонікам і модуляційним характеристикам частот і амплітуд обвідної дефекту, а також шляхом зміни режимів роботи і послідовного демонтажу деталей або зміни конструкції.

Основним критерієм прогнозування якості проектування є клас вібрації ЕД, а при доведенні конструкції – усунення нестабільності вібрації і резонансних явищ, забезпечення контролепридатності до вібраційного діагностування на стадіях виготовлення і експлуатації.

Ухвалення показника рівня вібрації основним критерієм прогнозування якості проектування і доведення передбачає для конструктора розробку обґрунтованих вимог до вихідних рівнів вібрації ЕД, виконання яких забезпечує задане зниження віброактивності і, відповідно, підвищення ресурсу та надійності. У цьому випадку рівень оптимізації при варіюванні конструктивно-технологічних параметрів і обмежень маси, енерговитрат та інших параметрів визначається за мінімізацією вібрації в заданій смузі частот і порівняно її значень з досягнутими в світовій практиці. Проектування складових вузлів, агрегатів і їх монтаж по обґрунтовано заданим вібраційним вимогам є основним принципом створення надійних і довговічних ЕД. Поставлені вимоги до віброактивності проєктованого ЕД і його складових частин уточнюються і досягаються доведенням макетних і дослідних зразків.

Основним критерієм якісного доведення електродвигунів є зниження рівня вібрації до заданих норм (класу вібрації), усунення резонансних явищ і нестабільності вібрації в заданих режимах експлуатації, забезпечення прис-

тосованості ЕД до вібродіагностування на стадіях виготовлення і експлуатації (ціль 2.13, рис. 4.1).

Збереження проектної якості ЕД на стадії виготовлення забезпечується індивідуальним вібраційним доведенням технічного стану до вимог норм вібрації шляхом порівняння фактичних рівнів вібрації в контрольних точках. Це дозволяє при приймально-здавальних випробуваннях виявити вироби з прихованими і випадковими дефектами, потенційно ненадійними елементами, обґрунтовано встановлювати доцільність і необхідний обсяг індивідуального доведення ЕД для виключення випуску неякісної машини або посилення норм на допустимі вібрації з метою підвищення якості виготовлення. Вид індивідуального доведення ЕД визначається за джерелами спектральних складових вібрації, що перевищує вимоги норм. Якість збірки ЕД оцінюється рівнями вібрації на частотах, які характеризують співвісність лінії валів, точність центрування, відсутність небезпечних перекосів і люфтів (зазорів) в сполученнях, симетричність навантажень, необхідну жорсткість кріплення вузлів між собою і відсутність резонансних явищ.

Норми вібрації, як вибраковочна ознака оцінки якості виготовлення, розробляються за результатами вібраційних випробувань ЕД серійного виробництва, систематизації вимірної вібрації по точках контролю і режимам випробувань, статистичної обробки спектрограм вібрації випробуваної вибірки, аналізу спектрограм вібрації з метою виділення інформативних контрольних точок, режимів роботи і умов вимірювання для виробничого контролю. Статистична обробка спектрограм вібрації проводиться відомими методами теорії ймовірності. Норми вібрації розробляються з урахуванням заданої вибірки, надійності і поля допуску.

Споживач ЕД може в заданих контрольних точках вимірювання вібрації здійснювати контроль якості виготовлення і пред'являти обґрунтовані претензії до виробника при покупці, введенні в експлуатацію та протягом гарантійних строків служби ЕД.

Збереження проектної якості електродвигунів при експлуатації і ремонті забезпечується контролем вібрації на відповідність вимогам експлуатаційних норм зміни вібрації для прогнозування залишкового ресурсу і обслуговування за технічним станом. Фактичний технічний стан ЕД в умовах експлуатації визначається за величиною перевищення вібраційного параметра у контрольних точках над вихідним (опорним) рівнем і шляхом зіставлення цього параметра з граничним значенням вібрації. Вихідні і граничні значення діагностичного вібраційного параметра однотипних виробів встановлюються однаковими на стадії виготовлення або індивідуальними на стадії вхідного контролю вібрації при введенні ЕД в експлуатацію після обкатки.

Вихідні значення вібраційного параметра експлуатаційних норм вібрації визначаються з урахуванням норм контролю якості виготовлення і класу вібрації механізму електродвигунів, тобто технічного рівня проектування і технології виготовлення. Граничні значення вібрації визначаються на підставі аналізу аналітичних та експериментальних досліджень структурного і вібраційного параметрів.

Прогнозування залишкового ресурсу ЕД здійснюється за трендовими характеристиками зростання вібрації за часом напрацювання і за величиною різниці рівнів вібрації між поточними і граничними значеннями.

Проведення регулювальних робіт і ремонт складових частин здійснюється за фактичним технічним станом. Обсяг регулювальних і ремонтних робіт визначається за результатами діагностування дефектів і несправностей конкретних деталей і вузлів. Оцінка якості регулювання, ремонту і рівня відновлення характеристик надійності ЕД здійснюється шляхом порівняння рівнів вібрації відремонтованих ЕД з початковими (опорними) рівнями. Рівні вібрації відремонтованих складових частин ЕД, що відповідають значенням, встановленим при виготовленні, визначають 100 %-ве відновлення характеристик надійності після ремонту.

4.6 Визначення дефектів електродвигунів за джерелами вібрації

Проведений аналіз дозволив зробити наступні висновки.

1. Дозволив визначити за джерелами вібрації основні дефекти електродвигунів, розробити типовий спектр вібрацій електродвигунів (рис. 4.9) і способи зниження вібрації [12, 191].

Основні джерела вібрації, що збуджуються дефектами двигуна представлені на рис. 4.9 піками від А до К, а основні їх групи – частотними діапазонами I, II, III. Третя група джерел, що збуджують вібрації електродвигунів не нормується.

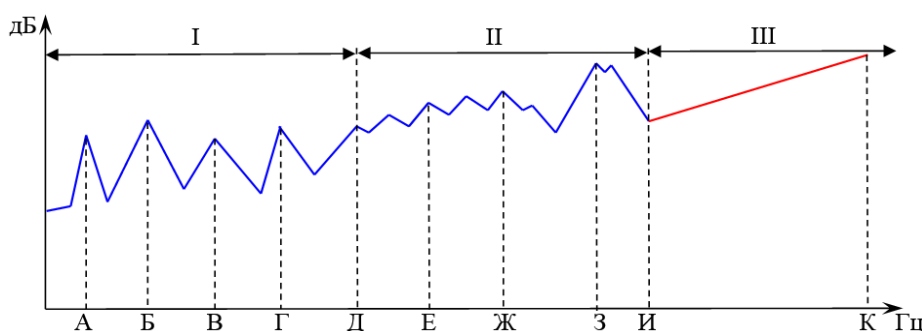


Рисунок 4.9 – Модель типового спектра вібрацій електродвигуна на підшипниках кочення

Діагностування джерел вібрації двигунів типу АН в частотних діапазонах засноване на виділенні і аналізі дискретних складових високих рівнів вібрації, рис. 4.9 [12, 191]:

- пік А – на частоті обертання від невірноваженості обертових частин;
- пік Б – на подвійній частоті обертання;
- пік В – на частоті живлення;
- пік Г – на подвійній частоті живлення;
- область Д-Ж – широка смуга спектра максимальних рівнів вібрації, що збуджуються підшипниками кочення;
- пік Е – на частотах, що збуджують аеродинамічні сили;
- пік З – на частоті, що збуджує зубцеве поле;

– область Е-З – широка смуга спектра максимальних рівнів вібрацій, збуджуваних механічними й магнітними джерелами і поява резонансних явищ деталей й вузлів;

– область Е-К – збільшення рівнів вібрацій, обумовлених погіршенням параметрів мастила і зносу поверхонь кочення;

– область И-К – рівні вібрації, зумовлені резонансними явищами, силами тертя і зносу підшипника (И = 20 кГц, К = 30 кГц).

2. Рівні вібрацій електродвигунів АНУ 92-2 на частотах А і Б досить високі і практично знаходяться в верхніх межах вимог ТУ.

Зниження рівня вібрації на частоті обертання (пік А) на 8 дБ представляється можливим навіть при існуючій конструкції вузлів балансування ротора і технології балансування, про що свідчить розкид до 15 дБ мінімальних і максимальних значень рівнів вібрацій електродвигунів.

Зниження рівня вібрації на частоті обертання на 16 дБ представляється можливим за рахунок вдосконалення технології балансування ротора, а також конструкції вузла балансування підбалансиру ротора, збільшення жорсткості і зменшення зазорів в сполученнях деталей підшипників кочення.

3. Є підстави припускати, що рівні вібрацій ЕД на подвійній частоті обертання Б від овальностей шийок валу сильно відрізняються за типами ЕД. Але для типів досліджених машин вони незначні. Останнє вказує на те, що на рівень вібрації на подвійній частоті обертання впливає не тільки технологія шліфування шийок валів, а й конструктивні особливості ЕД.

З приводу зниження допусків на овальність шийок валів слід зауважити, що овальність збуджує вібрацію не тільки на подвійній частоті, але і модулює також по амплітуді ті вібрації, які спостерігаються на деяких характеристичних власних частотах підшипників. Отримані попередні експериментальні дані показують, що при зниженні величини овальності шийок валів з 6 мкм до 2 мкм знижується рівень вібрації на частотах від 125 Гц до 630 Гц на що досі не зверталось достатньої уваги. Звідси випливають вимоги шліфування шийок валів з допусками на овальність не більше 2 мкм.

4. Можливості зниження вібрації електродвигунів на подвійній частоті живлення В залишаються невивченими.

5. Порівняльна оцінка максимальних і середніх квадратичних відхилень рівнів вібрації ЕД на частотах А, Б, В, і Г-Д показує, що без урахування можливого зниження рівнів вібрації на частотах А і В, основне завдання при поліпшенні вібраційних характеристик на частотах механічного походження ЕД зводиться до зменшення підшипникових вібрацій.

Оцінка максимальних і мінімальних рівнів вібрацій ЕД на частотах Г-Д, що збуджуються підшипниками кочення, виявляє розкид в 20 - 30 дБ, що вказує на можливість знайти оптимальні конструктивно-технологічні параметри деталей і вузлів системи "вал-підшипник-капсуль-щит-корпус" ЕД, які дозволили б знизити максимальні значення вібрацій принаймні до середніх значень рівнів, тобто мінімум на 6-8 дБ.

Про нестабільних характеристиках конструкторсько-технологічних параметрів сполучень деталей підшипникових вузлів і підшипників свідчать великі відхилення 3-9 дБ середніх квадратичних значень рівнів вібрації на частотах 160-1250 Гц.

Високий рівень вібрацій ЕД на частоті 1250 Гц, пояснюється магнітними силами. Рівні вібрацій ЕД на магнітних частотах в режимі холостого ходу мають менші середні квадратичні відхилення, ніж на інших ділянках спектра. Розкид в 5-15 дБ рівнів максимальних і мінімальних значень вібрацій вказує на існуючу нестабільність магнітних характеристик застосовуваних матеріалів і технології виготовлення пакетів ротора і статора.

4.7 Забезпечення нормативних значень технічного рівня тягових ЕД електробусів за вібродіагностичними характеристиками

Науково-технічні основи нормування вібрації полягають в знаходженні таких її граничних рівнів, які з найбільшою об'єктивністю дозволяли б встановлювати критерії ЕД.

Рішення поставленого завдання може здійснюватися різними методами, кожен з яких виражає певну форму відповіді і характеризується своїм алгоритмом. Найбільший практичний інтерес представляє метод, що ґрунтується на статистичному підході до вирішення поставленого завдання. У якості

вихідної передумови тут вважається відомим розподіл ймовірностей рівнів вібрації на кожній частоті спектра для вибірки даного обсягу. Найявні дані по машинах різних типів показують, що розподіл ймовірностей рівнів вібрації, виражених в децибелах, з достатнім ступенем наближення відповідає нормальному закону [199]. Застосовувані спільно з результатами експериментальних досліджень імовірнісних методів відкривають можливість теоретичного обґрунтування норм вібрації [190].

Гранично-допустимі величини вібрації ЕД встановлюються на підставі статистичної обробки отриманих даних вимірювань вібрації за «загальним рівнем» в третьоктавних смугах частот:

$$W = \bar{W} + 2\sigma, \quad (4.6)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення.

Для управління якістю виготовлення ЕД нормування вібрації може проводитися при різних значеннях ймовірності браку, зазвичай позначаються через 2β [199]. Потім за відомими величинами емпіричної дисперсії і середнього значення визначаються верхні і нижні толерантні межі віброприскорень і встановлюється поле допуску [199].

$$t_1 = \bar{W} - l \cdot S, \quad (4.7)$$

$$t_2 = \bar{W} + l \cdot S, \quad (4.8)$$

де S – емпіричне середнє відхилення середніх значень;

l – коефіцієнт, який є функцією P , Q і об'єму вибірки n .

При цьому необхідно задатися таким значенням надійності P , при якому буде забезпечено потрапляння в ці межі частки сукупності замірених рівнів вібрації не менше встановленої частки ймовірності $Q = 1 - 2\beta$ [199].

Наближене значення коефіцієнта l , що є функцією P , Q і обсягу вибірки n може бути знайдено за допомогою допоміжних таблиць [200].

Сутність статистичного методу полягає у визначенні на основі експериментальних даних поля допуску для рівнів вібрації на частотах, що нас цікавлять (інтервалах частот), які характерні для електродвигунів даного типу і дають можливість браку не більше деякої попередньо встановленої величини.

Для складання проектів норм на рівні вібрації використовуються дані тих ЕД, у яких значення рівнів вібрації в третьоктавних смугах частот задовольняють критеріям для неприйняття спостережень, що різко виділяються, з ймовірністю не менше $P \geq 0,95$.

У якості норм за спектральними складовими третьоктавних смуг частот приймаються значення рівня вібрації як верхньої межі поля допуску, яка визначається на основі статистичної обробки вибірки даних:

$$H = \bar{W} + l \cdot S_a \quad (4.9)$$

де H – рівень вібрації, що відповідає верхній межі поля допуску;

\bar{W} – середнє арифметичне значення рівнів вібрації для вибірки;

l – коефіцієнт, що визначає поле допуску [190].

S_a – емпіричне значення середнього квадратичного відхилення одиничного вимірювання.

Середнє арифметичне значення рівнів вібрації знаходиться з виразу:

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{ij} \quad (4.10)$$

де W_i – значення i -го виміру рівнів вібрації, $i=1 \dots n$;

n – величина вибірки;

S_a – емпіричне значення середнього квадратичного відхилення одиничного вимірювання:

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (W_{ij} - \bar{W})^2 \right]} \quad (4.11)$$

Нижня толерантна межа віброприскорень становить практичний інтерес для контролю технічного стану ЕД при ремонті, як допустиме зниження вібрації нижче встановленої норми внаслідок порушення якості збірки (ослаблення кріплень, провертання валу, зниження частоти обертання тощо). При контролі якості експлуатації ЕД рівні вібрації нижчі толерантної межі є діагностичними ознаками відключення окремих елементів ЕД, зменшення частоти обертання, потужності і т.п. У якості норми вібрації нижньої межі поля допуску, на підставі (4.7), приймається:

$$H_H = \bar{W} - l \cdot S. \quad (4.13)$$

При нормуванні вібрації за спектром третьоктавних частот крива, проведена через значення верхніх меж H (4.9), для кожної частоти буде спектральною нормувальною кривою (нормою). Теоретично, ймовірність браку при цьому буде зростати в міру збільшення числа контрольованих частот, оскільки ймовірність браку по частотах підсумовується і ЕД, що задовольняють нормі на одній з частот, можуть перевищувати цю норму на інший. Однак практика спостереження за машинами показує, що при нормуванні вібрації за спектром в 16-24 частотних смуг результуюча ймовірність браку значно менша суми ймовірностей на окремих частотних складових. Це пояснюється перш за все кореляційним зв'язком між рівнями вібрації у механізмів на окремих залежних частотах [199].

Для контролю якості ремонту електродвигунів, розробляються частотні вібраційні діагностичні ознаки дефектів, види контрольованих дефектів і методи усунення. У таблицях 4.3 і 4.4 наведено класифікацію джерел вібрації і шуму і отримані вібраційні діагностичні ознаки дефектів асинхронних електродвигунів. Якщо вібрації не перевищують норму – електродвигун задовольняє заданій якості. Перевищення вібрації над нормою визначає вид дефекту (таблиця 4.4) і рівень дефектності ЕД. При перевищенні вібрації значення норми до 4 дБ дефект вважається незначним, і його усунення можливе обкаткою. При перевищенні вібрації до 8 дБ потрібне проведення регулювальних робіт. Критичні де-

фекти з перевищенням вібрації понад 8 дБ усуваються заміною вузла [190].

Для контролю якості поточного і капітального ремонту ЕД розробляються норми на 80 % і 100 % відновлення проектного ресурсу.

Таблиця 4.3 – Класифікація джерел вібрації і шуму асинхронних ЕД

Джерело вібрації	Причини виникнення	Основні частоти збудження, Гц
Механічне	Дисбаланс ротора	$n/60$
	Подвійна жорсткість ротора	$2n/60$
	Овальність цапф ротора	$2n/60$
	Підшипники кочення	$n/60; 2n/60;$ $\frac{z}{2} \left(1 - \frac{d_{ш}}{D_0} \cos \beta\right) \frac{n}{60};$ $\frac{1}{2} \left(1 - \frac{d_{ш}}{D_0} \cos \beta\right) \frac{n}{60};$ $\frac{D_0}{d_{ш}} \left(1 - \frac{d_{ш}^2}{D_0} \cos \beta\right) \frac{z}{2} k \frac{n}{60}$
	Щітки	$\frac{k \cdot n}{60} i$
Магнітне	Періодична зміна магнітної провідності повітряного зазору	$zn/60;$ для АД: $f_c \left[\pm 2 + \frac{z_2 k}{p} (1 - S) \right];$ для СД: $2 f_c k$
Аеродинамічне	Вентилятор	$zn/60$

Таблиця 4.4 – Вібраційні діагностичні ознаки дефектів асинхронних електродвигунів

Вид дефекту	Відповідність до норм вібрації	Методи усунення
Припустимий	відповідає нормі вібрації	
Незначний	перевищує норму до 4 дБ	обкатка
Значний	перевищує норму до 8 дБ	регулювання
Критичний	перевищує норму більше 8 дБ	заміна ЕД

Для 100 % відновлення ресурсу рівні вібрації відремонтованих ЕД не повинні перевищувати норми вібрації якості виготовлення (4.9). При 80 % відновленні ресурсу рівні вібрації по всьому спектру третьоктавних значень вібрації H_p не повинні перевищувати норму якості виготовлення більше, ніж на 4 дБ (4.6):

$$H_p = \alpha + l \cdot S_\alpha + 4 \text{ дБ}, \quad (4.12)$$

де 4 дБ – становить 20 % зниження ресурсу, обчисленого від граничного збільшення вібрації 20 дБ для нового ЕД.

Висновки за розділом 4

1. 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.

2. Обґрунтовано переваги застосування методів оцінки за рівнем вібрації електродвигунів на стадіях проектування, виробництва і експлуатації.

3. Запропоновано здійснювати оцінку електродвигунів за вібродіагностичними характеристиками, як відхилення від заданих норм вібрації.

4. Розроблено оцінку якості ремонту тягових електродвигунів електробусів за рівнями вібрації.

6. Запропонована послідовність рішення наукової проблеми пов'язує між собою напрямки і завдання розробки методів оцінки якості електродвигунів за ВДХ на стадіях проектування, виготовлення і експлуатації.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [5, 12, 17–19, 36].

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ
ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОБУСА ЗА
ПОКАЗНИКАМИ ВІБРАЦІЇ

За критерій оцінки якості електродвигунів прийняті їх вібраційні характеристики, оскільки вони є основним показником досконалості їх конструкції і технології [191].

Як було зазначено раніше, віброакустична діагностика забезпечує для більшості машин вирішення 80 % діагностичних завдань, а достовірність результатів аналізу і прогнозу забезпечена більш ніж на 90 %. За рівнем вібрацій електродвигуна можна визначати дефекти проектування і виробництва, а в експлуатації – їх несправності [191]. Висока універсальність, чутливість і вибірковість вібраційних сигналів дозволяє діагностувати окремі дефекти і взаємозв'язок механічних, магнітних і електричних систем. Здатність вібраційних сигналів швидко реагувати на зміну технічного стану електродвигунів дозволяють спостерігати і зіставляти в реальному часі реакцію всіх компонент структурного, функціонального та динамічного стану електродвигунів на зміну конструкції, технології виготовлення і збірки, робочі процеси, регульовальні роботи, кореляційну залежність дефектів електродвигуна.

Для нормування рівнів вібрації електричних машин з метою зниження шкідливого впливу високих рівнів вібрації на конструкцію, що знижують надійність і підвищують зношування машин існують стандарти [183, 201, 202]. Основним недоліком цих стандартів по нормуванню вібрації є обмеження рівнів вібрації на окремих частотах, ділянках спектра або за загальним рівнем, а не по всьому спектру вібрацій, що збуджуються. Це не дає можливість оцінювати за рівнями вібрації вплив всіх діючих джерел на технічний стан для доведення конструкції і технологічних процесів виробництва електричних машин. Нормування вібрації по всьому спектру дозволяє контролювати

якість виробництва і зміни технічного стану машин під час технічного обслуговування в експлуатації.

5.1 Об'єкти, методи, обладнання та засоби вимірювання вібрації електродвигунів

Обґрунтування вибору досліджуваних ЕД. Для дослідження були вибрані двополюсні асинхронні ЕД типу АНУ 92-2 потужністю 90 кВт. Це пов'язано наступним:

- це електродвигуни високої технології серійного виробництва;
- АНУ 92-2 призначені для використання на транспорті;
- асинхронні двигуни мають найбільш широкий і насичений спектр електромагнітних сил, що збуджують вібрацію;
- двополюсні ЕД мають найбільшу вібрацію (зі збільшенням пар полюсів вібрація зменшується).

Даний вибір дозволяє провівши експериментальні дослідження і їх статистичну обробку розробити системний підхід до оцінки якості тягових електродвигунів за вібродіагностичними характеристиками на стадіях проектування і експлуатації; розробити методи оцінки якості електродвигунів за вібродіагностичними характеристиками; розробити рекомендації щодо проектування, вибору тягового електродвигуна електробуса і оцінки якості його ремонту.

Об'єкт дослідження – вібраційні характеристики електродвигунів типу АНУ 92-2.

Експериментальні дослідження проводилися в ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж» спільно з ХНАДУ.

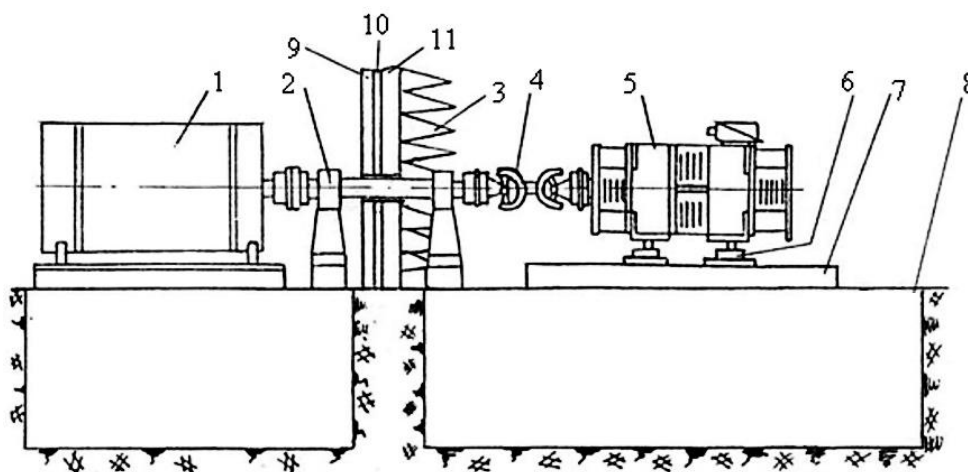
Об'єм вимірювання вібрації. Рівні вібрацій електродвигунів вимірювались в децибелах за середнім квадратичним значенням

віброприскорень. За базові вібраційні характеристики електродвигунів типу АНУ 92-2 прийняті третьоктавні рівні віброприскорень і вузькосмугові спектри вібрації з шириною смуги 3-10 % в області від 5 Гц до 10 кГц в режимах холостого ходу і під навантаженням.

Кількість досліджувальних двигунів АНУ 92-2 – 10 од. [191].

Умови вимірювання вібрації. Вимірювання вібрації ЕД здійснювалося після його попередньої роботи на холостому ходу протягом 30 хв.

Схему стенду віброакустичної камери досліджуваних асинхронних ЕД, представлено на рис. 5.1.



1 – навантажувальна балансувальна електрична машина; 2 – опори валу приводу балансування машини; 3 – звукоізоляція всіх стін, стелі та підлоги приміщення заглушеної камери; 4 – карданний вал приводу; 5 – випробуваний ЕД; 6 – віброізолятори типу АКСС; 7 – монтажна плита; 8 – фундамент віброакустичної розв'язки; 9 – стіни будівлі; 10 – повітряна акустична розв'язка; 11 – стіни віброакустичної камери

Рисунок 5.1 – Схема стенду віброакустичної камери досліджуваних електродвигунів АНУ 92-2 в режимі навантаження і холостого ходу

Рівні вібрації електродвигунів АНУ 92-2 визначалися в децибелах за максимальним середнім квадратичним значенням коливального прискорення на стенді з віброакустичною розв'язкою, яка виключає вплив перешкод в точках вимірювання вібрації двигуна (рис. 5.1):

- маса фундаменту і жорстко приєднаних до нього частин (плит, підставок) перевищувала масу двигунів, що досліджувалися, не менше ніж у 8 разів;
- рівень перешкод на всьому частотному діапазоні вимірюваної вібрації працюючого двигуна (в точках вимірів) був не менше ніж на 8-10 дБ нижчий значення рівня вібрації, що утворювався досліджуваним двигуном. Рівні перешкод визначалися в точках вимірювання вібрації на непрацюючому двигуні при включенні всіх допоміжних стендових механізмів і пристроїв, що забезпечують роботу двигуна.

За умовний нульовий рівень вібрації прийнято прискорення a , що дорівнює $3 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$.

Досліджувані двигуни АНУ 92-2 випробовувалися в режимі холостого ходу і під навантаженням.

В режимі номінального навантаження двигун встановлювався на стенд віброакустичної камери і з'єднувався карданним валом з навантажувальною машиною, рис. 5.1.

Обладнання, яке використовувалось для проведення експериментальних досліджень, рис. 5.2:

- аналізатор частот типу 2120 фірми "Briel & Kjaer" (Данія) з вибірко-вим і лінійним частотними діапазонами 2 Гц...20 кГц, рис. 5.2,а;
- аналізатор частот типу 2130 фірми "Briel & Kjaer" (Данія), що працює в реальному масштабі часу з частотними полосами шириною 1/1, 1/3, 1/12 та 1/24 октави;
- аналізатори частот типу 2133 фірми "Briel & Kjaer" (Данія), що працює в реальному масштабі часу з частотними полосами шириною 1/1, 1/3, 1/12 та 1/24 октави, рис. 5.2, б;
- віброперетворювач (акселерометр) типу 4376 фірми "Briel & Kjaer" (Данія), рис. 5.2, в;
- підсилювач заряду типу 2635 "Briel & Kjaer" (Данія), рис. 5.2, г.

Всі прилади пройшли планове калібрування і повірку в Харківському Національному науковому центрі «Інститут метрології».

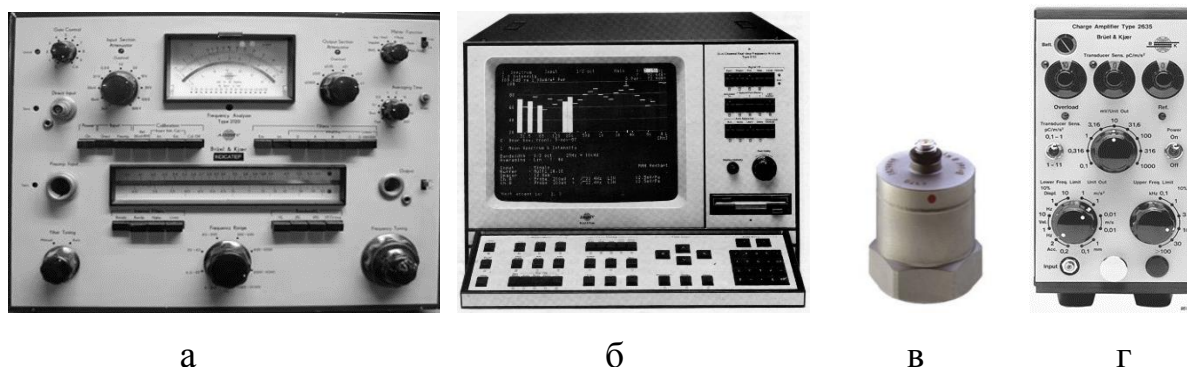


Рисунок 5.2 – Експериментальне обладнання фірми "Bruel & Kjaer":
 а – аналізатори частот типу 2120; б – аналізатори частот типу 2133;
 в – віброперетворювач типу 4376; г – підсилювач заряду типу 2635

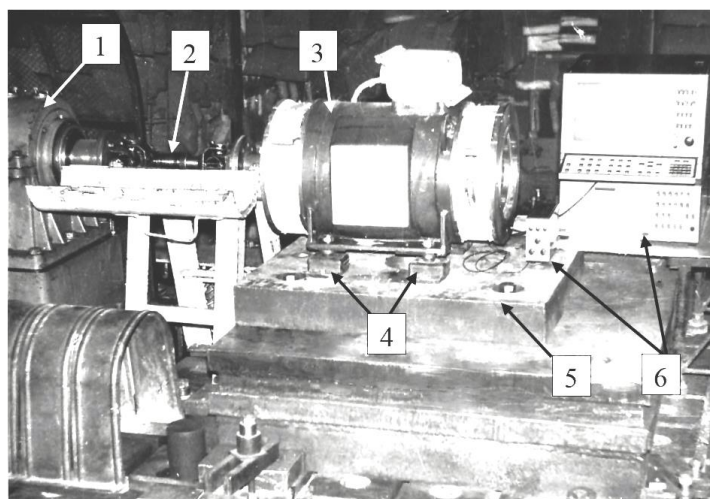
5.2 Опис експериментального стенду

Для проведення експериментального дослідження були відібрані 10 висококласних асинхронних двигунів АНУ 92-2 М362, що використовуються на транспорті. Двигуни досліджувалися на стенді у віброакустичній камері з підключенням експериментального обладнання. рис. 5.3.

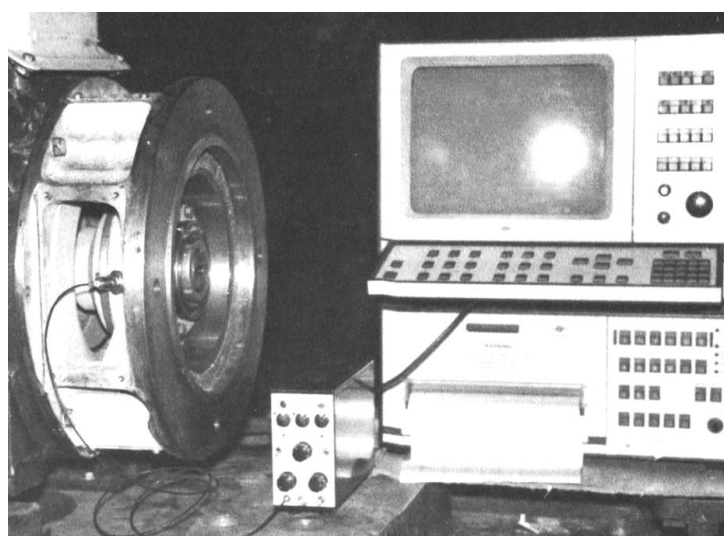
Експериментальний стенд (рис. 5.3) складається з навантажувальної машини 1; електродвигуна 3, що досліджується; віброізоляторів 4, які встановлені на лапи двигуна; плити стенда 5 і експериментального обладнання 6.

Досліджуваний двигун і навантажувальна машина з'єднуються за допомогою карданного валу 2.

Віброізолятори використовувались для гасіння середніх і високих частот і для ізоляції вібрацій, що створюються двигуном. Використовувались віброізолятори типу АКСС-25м, додаток Б. Вони підібрані з таким розрахунком, щоб частота вільних коливань перебувала в межах 0,5...2,5 від частоти обертання валу двигуна. Кріплення електродвигуна на віброізоляторах здійснювалося спеціальними пристроями і гвинтами з майданчиком і різьбленням для встановлення і кріплення віброперетворювача.



а



б

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

Рисунок 5.3 – Фото стенда віброакустичної камери для випробування двигуна: а – загальний вигляд; б – підключення експериментального обладнання

Існує 2 способи кріплення віброперетворювача. Перший – з використанням електроізоляційні прокладки 5 і спеціальної гайки 4 з заданим зусиллям затяжки, додаток Б. Такі кріплення виключають вплив способу кріплення на достовірність вимірювань вібрації, що збуджується ЕД.

Спосіб установки ЕД на віброізолятори типу АКСС-25м представлено в додатку В. На голівці гвинта, що кріпить двигун до віброізоляторів встанов-

лювався віброперетворювач типу 4376, рис. 5.2, в.

Другий спосіб (додаток В) – без електроізоляції – віброперетворювач прикручується напряду до віброізолятора. Такий спосіб кріплення впливає на достовірність вимірювань вібрації. Тому для проведення досліджень використовувався перший спосіб, додаток В.

Важливо відзначити, що на достовірність результатів дослідження впливає чистота обробки поверхонь і монтажної різьби площадок місць вимірювання вібрації. Тому були виконані вимоги до чистоти обробки і різьби у відповідності до креслення, представленого в додатку В.

Креслення схеми кріплення віброперетворювача представлено в додатку В.

Засоби визначення та аналізу вібраційних характеристик двигуна.

Весь комплекс експериментальних досліджень проводився сучасними науково-технічними засобами. Вібраційні характеристики ЕД досліджувалися при використанні обладнання, описаного вище і представленого на рис. 5.1, 5.2.

Використання приладів високої роздільної здатності дозволило реєструвати вібрації в частотній області, часовий розвиток сигналу. Застосовувана апаратура дозволяла вирішувати проблемні питання розпізнавання сигналів вібрації, поділу джерел вібрації, описати вібраційні ознаки дефектів в спектрі вібрації підшипникових вузлів кочення. Це дало змогу дослідити вібраційні процеси і методи розпізнавання дефектів, проілюструвати широкі наукові і технічні можливості оцінки за вібродіагностичними характеристиками якості проектування, контролю, виготовлення і експлуатації електродвигунів.

5.3 Експериментальне дослідження вібраційних характеристик вибірки випробуваних електродвигунів

На першому етапі досліджень рівні вібрації ЕД АНУ 92-2 визначалися в децибелах за середнім квадратичним значенням коливального прискорення.

Як було зазначено раніше, вимірювання вібрації ЕД здійснювалося піс-

ля його попередньої роботи на холостому ході протягом 30 хв.

Важливо зазначити, що вибір вібраційного прискорення як параметра, що контролюється, має суттєві переваги. Сила, що діє на рухоме тіло (деталь, що коливається), пропорційна прискоренню, тому можна вважати, що прискорення характеризує навантаження, що діє на деталь при вібрації. Прискорення механічних коливань часто відноситься до прискорення сили тяжіння. При вимірюванні прискорення в дБ охоплюється вібрація в широкому діапазоні частот без «втрат» інформації о процесі, що досліджується [190].

Досліджувані двигуни мали трапецеїдальну форму закритих пазів ротора. Під час експерименту використовувались підшипники з вимогами до рівню вібрації Ш1.

В таблиці (додаток Б) представлено усереднені за результатами 3-х вимірювань значень віброприскорення (дБ) для кожного з десяти досліджуваних асинхронних електродвигунів АНУ 92-2 ($D=D_1, \dots, D_{10}$) у спектрі 1/3 октавних частот від 50 Гц до 10 кГц.

Після проведення вимірів вібрації електродвигунів на 1/3 октавному спектрі частот проведена статистична обробка отриманих результатів.

Статистична обробка отриманих результатів першого етапу експериментальних досліджень.

У додатку В представлено усереднені за результатами 3-х вимірювань значення віброприскорення (дБ) кожного з досліджуваних електродвигунів. Результати експерименту були представлені у вигляді матриці $W = (W_{ij})$ в якій рядки $i = 1, 2, \dots, 24$ відповідають спектру досліджуваних частот, стовпці $j = 1, 2, \dots, 10$ номеру двигуна на якому було отримано значення вібрації W_{ij} .

Первинна обробка результатів проведеного експерименту представлена в таблиці додатку В. У цій таблиці прийняті наступні позначення:

– \min – найменше значення величини вібрації на i -ій частоті, що визначається за умовою $\min = \min_j W_{ij}, i=1, 2, \dots, 24, j = 1, 2, \dots, 10$;

– \max – найбільше значення величини вібрації на i -ій частоті, що визначається за умовою $\max = \max_j W_{ij}, i=1,2,\dots,24, j = 1, 2,\dots,10$;

– σ і v_i – відповідно статистичні середні квадратичні відхилення і коефіцієнт варіації вібрації.

Статистичні середні квадратичні відхилення σ визначалися за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{ij} - \bar{W})^2}. \quad (5.1)$$

Коефіцієнт варіації вібрації всієї сукупності двигунів v_i визначався за формулою:

$$v_i = \bar{W} / \sigma. \quad (5.2)$$

З таблиці додатку В можна зробити висновок про велику неоднорідність отриманих результатів. Мінімальний коефіцієнт неоднорідності отриманий при частоті $f = 50$ Гц (частоті живлення) – вплив мережевої напруги, максимальний коефіцієнт неоднорідності отриманий при частоті $f = 80$ Гц – вплив електродвигунів.

На рис. 5.4 представлено спектрограми вібрацій досліджуваних електродвигунів АНУ92-2 М362 в режимі холостого ходу.

З графіків, наведених на рис. 5.4, важко зробити висновок про випадковість досліджуваної виборки електродвигунів. Тому було проведено додатковий аналіз отриманих результатів. Для цього аналізу був застосований метод критерію серій, заснований на медіані вибірки і критерій квадратів послідовних відносин. Ці методи докладно описані в роботі [203].

Для застосування методу критерію серій, заснованому на медіані вибірки розглянемо ряд даних $W = W_1, W_2, \dots, W_i, W_{i-1}, W_n, n = 24$. Чисельні значення елементів цього ряду відповідають даним, наведеним в стовпці W_i , представленим в таблиці додатку В. Перетворимо цей ряд в варіаційний, тобто в

такий, для якого справедливо правило: $(W)=(W_1),(W_2),\dots,(W_i),(W_{i-1}),(W_n)$, де $(W_1) = \min_i W_i$, $(W_n) = \max_i W_i$.

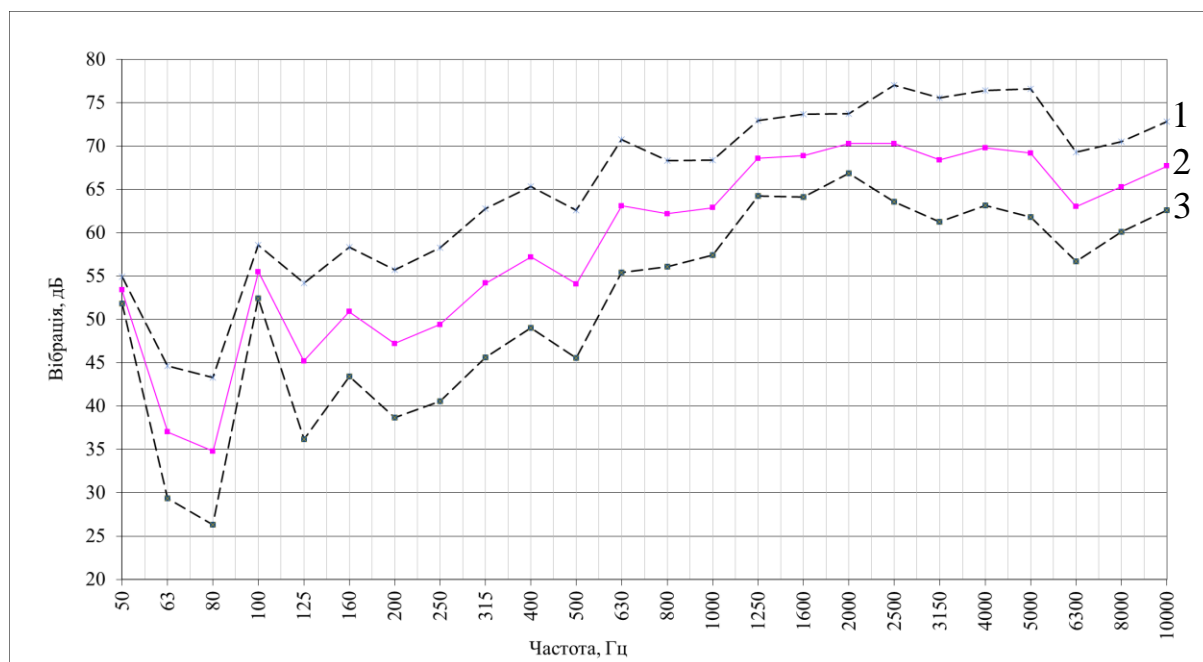


Рисунок 5.4 – Спектрограми вібрацій ЕД АНУ92-2: 1, 3 – середні квадратичні відхилення рівнів вібрації; 2 – середні значення рівнів вібрації

Для послідовності $(W_{i-1}),(W_i)$ справедлива умова $W_{i-1} \leq W_i$. Медіану послідовності (W) , що дорівнює величині $W_{med}(n)$ визначимо за правилом:

$$W_{med}(n) = \begin{cases} (W_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}), & \text{якщо } n = 2k + 1 \\ \frac{1}{2} \left[\left(W_{\frac{n}{2}} \right) + \left(W_{\frac{n}{2}+1} \right) \right], & \text{якщо } n = 2k \end{cases} \quad (5.3)$$

Потім побудуємо послідовність σ , кожен елемент якої σ_i отримано за правилом:

$$\sigma_i = \begin{cases} a & \text{если } \bar{W} - W_{med}(n) < 0 \\ b & \text{если } \bar{W} - W_{med}(n) > 0 \end{cases}. \quad (5.4)$$

Якщо різниця Δ_i :

$$\Delta_i = \bar{W} - W_{med}(n) = 0, \quad (5.5)$$

то елемент W_i далі ігнорується. Послідовність поспіль однакових символів називають серією. Найпростіша серія складається з одного елемента. Прийнято, що величина $\nu(n)$ дорівнює загальній кількості серій, величина $\tau(n)$ дорівнює кількості елементів в найдовшій серії незалежно від символу. Складемо систему нерівностей (5.6):

$$\begin{cases} \nu(n) > \nu_0(n); & \nu_0(n) = \left\lfloor \frac{1}{2}(2n-1) - 1,96\sqrt{\frac{16n-29}{90}} \right\rfloor \\ \tau(n) < \tau_0(n); & \tau_0(n) = \lfloor 3,3(\lg n + 1) \rfloor \end{cases} \quad (5.6)$$

Якщо система нерівностей (5.6) виконана, то слід прийняти гіпотезу про те, що досліджувана вибірка випадкова.

Значення величини $\tau_0(n)$ наведені в роботі [203]. У нашому випадку, при кількості спостережень над величиною 24 $\tau(n) = 5$. В умові (5.6) прийнято, що $\lfloor A \rfloor$ означає цілу частину числа A .

Для перевірки гіпотези про випадковість вибірки з використанням критерію квадратів послідовних відношень були обчислені значення наступних виразів:

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_{ij}; \quad (5.7)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2; \quad (5.8)$$

$$q^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (W_{i+1} - W_i)^2; \quad (5.9)$$

$$\gamma = \frac{q^2}{S^2}; \quad (5.10)$$

$$\gamma_\alpha = 1 + \frac{u_\alpha}{\sqrt{n+1}}, \quad (5.11)$$

де S^2 – емпірична дисперсія – показник мінливості окремих рівнів вібрації у виборці.

У виразі (5.11) величина u_α дорівнює α – квантилі нормального розподілу. У нашому випадку при $\alpha = 0,95$, $u_\alpha = 1,64$. Якщо величина $\gamma < \gamma_\alpha$, то гіпотезу о статистичній незалежності вибірки слід відкинути.

Проведені розрахунки підтвердили, що отримана послідовність середніх значень результатів досліджень не є випадковою, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

Аналіз результатів першого етапу досліджень.

Вібрація ЕД залежить не тільки від конструкції і якості виготовлення, але і від якості електроенергії системи живлення, якості технологічних операцій збірки в агрегатах, появи зносу, дефектів в електричних і магнітних колах, в системах охолодження [12, 190, 191].

З класифікації основних причин і джерел вібрації ЕД (рис. 4.4) і віброакустичної граф-моделі (рис. 4.5) видно, що практично всі види дефектів ЕД впливають на їх ресурс, змінюють параметри сигналу вібрації.

Отримані результати експериментів, представлені на рис. 5.4 дозволяють оцінити можливості зменшення вібрації при внесенні деяких змін в конструкцію ЕД.

Вплив на віброактивність ЕД здійснюють механічні, магнітні і аеродинамічні джерела.

Що стосується останніх – вони впливають лише на частоті $zn/60$ і їх джерелом є вентилятор. Основним шляхом зменшення цих вібрацій є використання водяного охолодження або встановлення глушників шуму. Тому в даній роботі дослідження аеродинамічних джерел вібрації не проводилось.

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 надані рекомендації щодо їх усунення [190, 199, 200, 204, 205].

З механічних джерел найбільше впливають на вібраційну активність

підшипники і підшипникові вузли. Дослідження щодо цього впливу було проведено в роботі [206]. Автор розробив рекомендації в яких визначив, що якість монтажу підшипника і точність виконання посадочних місць під підшипник має більший вплив на зниження вібрації, ніж застосування підшипників підвищеної точності. Тому оптимальним є вибір підшипника ШЗ. Використання більш точних підшипників (тобто Ш4, Ш5) є економічно і технічно невиправданим. Опираючись на дані рекомендації прийнято рішення при проведенні подальших досліджень для зниження рівня вібрації замість підшипників Ш1 використовувати підшипники ШЗ.

Найбільший вплив на вібрацію в ЕД, здійснюють магнітні сили. Їх дія більш помітна в діапазоні частот від 100 Гц до 5 кГц. Як бачимо з результатів експериментальних досліджень (рис. 5.4), саме в цьому діапазоні спостерігається суттєве збільшення вібрації, тому подальші дослідження будуть спрямовані на усунення їх причин.

Магнітні сили зумовлюють виникнення аксіальної, радіальної і тангенціальної вібрацій електродвигуна.

Як було зазначено раніше, асинхронні ЕД мають найбільш широкий і насичений спектр електромагнітних сил, що збуджують вібрацію. У повітряному зазорі асинхронного ЕД, крім основної гармоніки поля, що створює корисний крутний момент, присутні додаткові гармоніки поля, 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 і шуму, викликана магнітними полями, визначається за формулою:

$$f = f_p \cdot z_2 \cdot k_1 \quad (5.12)$$

де f_p – частота обертання ротора, Гц;

z_2 – число пазів ротора;

$k = 1, 2, 3$ – порядок гармоніки.

Досить 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:

$$\mu = \pm k \frac{z_2}{p}. \quad (5.13)$$

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

$$f = f_0 \left[2 \pm k \frac{z_2}{p} (1 - S) \right], \quad (5.14)$$

а для $r = p\mu + p\nu$:

$$f = f_0 \left[k \frac{z_2}{p} (1 - S) \right]. \quad (5.15)$$

де ν – порядок статорної гармоніки поля;

r – порядок радіальної сили;

p – число пар полюсів основної гармоніки поля;

μ – порядок роторної 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

через резонанс, що особливо проявляється в процесі пуску машин і в машинах з широкими межами регулювання частоти обертання [197].

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 [197]:

$$f = 2f_0 \left[\frac{z_2}{p} (1 - S) \pm 1 \right] \quad (5.16)$$

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. Статичний ексцентриситет грає велику роль в двигунах з $2p = 2$.

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 дією тангенціальних сил 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 всієї конструкції, інтенсивність якої залежить від величини вимушених сил, пружних властивостей матеріалів, використовуваних в ЕД, конструкції і її акустичних властивостей [197].

Виткове замикання в роторах (особливо багатополюсних ЕД) може викликати істотну вібрацію. Замикання частини обмотки фазного ротора асинхронного ЕД призводить до вібрації з частотою ковзання.

Електрична несиметрія різних видів ЕД призводить до тангенціальних коливань статора, що виявляється особливо на частотах $f_p; 2f_0; 2pf_p; 2Sf_0$ [197].

Області ознак електричної несиметрії статора і несиметрії напруги мережі перетинаються, тому при вібродіагностуванні має контролюватися якість напруги мережі.

При великому числі полюсів віброактивність асинхронного ЕД трохи вища за рахунок зниження жорсткості (при виконанні в одному габариті), а при зміні габариту – за рахунок збільшення відстані від опорної поверхні до осі поворотних коливань. Для ЕД малої потужності при переході від холостого ходу до навантаження збільшення тангенціальної вібрації становить в середньому при $p = 1, 2, 3$ відповідно 2-4 дБ, 4-6 дБ, 8-9 дБ [197].

Основним заходом щодо зниження магнітної вібрації ЕД є дослідження впливу різних форм пазів.

Дефекти виготовлення, складання і зносу електромагнітних систем ЕД розділяти набагато складніше, ніж механічних систем. При виборі точки і напрямку вимірювання вібрації необхідно враховувати, що в асинхронних ЕД через розбіжність осей, інерції коливання ротора і статора розрізняються за формою. В результаті при тангенціальних коливаннях ротора в коливаннях статора, будуть присутні радіальні складові і навпаки. Тому точки і напрямки вимірювання сигналу вібрації для вібродіагностичних моделей механічної та електромагнітної систем асинхронного ЕД різні.

5.4 Експериментальне дослідження впливу форми паза магнітопроводу ротора на вібраційні характеристики електродвигунів

У загальному випадку зниження магнітних вібрацій досягається вдало обраним співвідношенням чисел пазів статора і ротора, правильно обраною величиною повітряного зазору між магнітопроводами статора і ротора, сколом пазів ротора, зниженням ексцентриситету повітряного зазору і іншими конструктивними і технологічними рішеннями, п.п. 5.3.

Одним з таких рішень є зміна форми паза ротора. Були досліджені трапецеїдальні, т-подібні і дугоподібні форми закритих пазів асинхронних дво- полюсних двигунів. Форми паза досліджених роторів показані на рис. 5.5.

У пазі дугоподібної форми нахил дуги змінювався справа наліво по довжині паза через 20 мм.

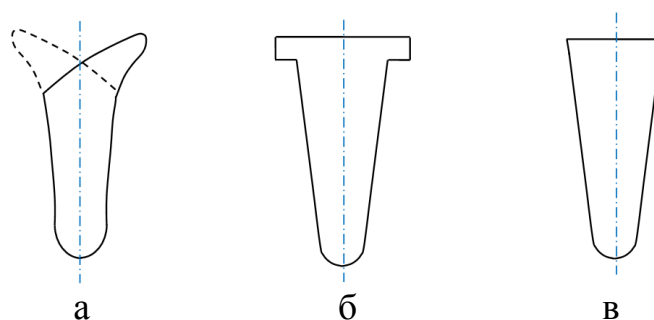


Рисунок 5.5 – Форми паза роторів: а – дугоподібний паз;
б – т-подібний паз; в – трапецеїдальний паз

Визначення вібраційних характеристик електродвигунів проводилося в режимах холостого ходу і номінального навантаження, в монтажних виконаннях: горизонтальному на лапах, вертикальному на лапах і на фланці.

Проведені дослідження показали, що форма паза пакету магнітопроводу ротора істотно впливає на рівні вібрації ЕД в області магнітних частот і мало впливає на інших ділянках спектра від частоти обертання до 1000 Гц. Виділити магнітну складову від впливу форми паза ротора на рівні вібрації на цій ділянці спектра не вдалося, оскільки розкид рівнів вібрації визначається механічними вібраціями: якістю підшипників, технологією виготовлення і складання деталей ротора і підшипникових вузлів.

Для двополюсного електродвигуна АНУ 92-2 масою 830 кг, потужністю 90 кВт в режимах холостого ходу і номінального навантаження рівні вібрації ЕД з дугоподібним пазом ротора в області зубцевих частот на 7-8 дБ нижчі в порівнянні з ротором, що має т-подібний паз і на 14-15 дБ нижче рівнів вібрації електродвигуна з трапецеїдальним пазом.

5.5 Експериментальне визначення допустимої вібрації і зв'язок вібрації з ресурсом електродвигуна

Для визначення допустимої вібрації ЕД проведено експериментальне дослідження серійних доопрацьованих конструкцій асинхронних малощумних електродвигунів типу АНУ 92-2 потужністю 90 кВт високої технології серійного виробництва, що призначені для використання на транспорті.

У відповідності до п.п. 5.3, для зниження рівня вібрації, підшипники ШІ замінені на більш точні підшипники ШЗ.

У відповідності до результатів експериментів, представлених у п.п. 5.4 у досліджуваних ЕД замінено ротор з трапецеїдальним пазом на ротор з дугоподібним пазом, ЕД кріпився на лапах.

Данні зміни проведені для визначення допустимої вібрацій ЕД.

У таблиці додатку В представлено усереднені за результатами другого етапу досліджень значення віброприскорення, дБ, кожного з електродвигунів.

Результати експерименту були представлені у вигляді матриці $W = (W_{ij})$ в якій рядки $i = 1, 2, \dots, 24$ відповідають спектру досліджуваних частот, стовпці $j = 1, 2, \dots, 10$ номерам двигуна на якому було отримано значення вібрації W_{ij} .

Після проведення вимірів вібрації електродвигунів на 1/3 октавному спектрі частот від 50 Гц до 10 кГц проведена статистична обробка отриманих результатів.

Статистична обробка результатів другого етапу експериментальних досліджень.

За базову вибірку досліджуваних двигунів прийняті 10 асинхронних малощумних електродвигунів типу АНУ 92-2 потужністю 90 кВт високої технології серійного виробництва, що призначені для використання на транспорті, представлені в таблиці додатку В.

При організації, плануванні і обробці результатів експерименту за основу були прийняті положення, описані в роботі [207].

Первинна обробка результатів експерименту представлена в таблиці додатку В. У цій таблиці прийняті наступні позначення:

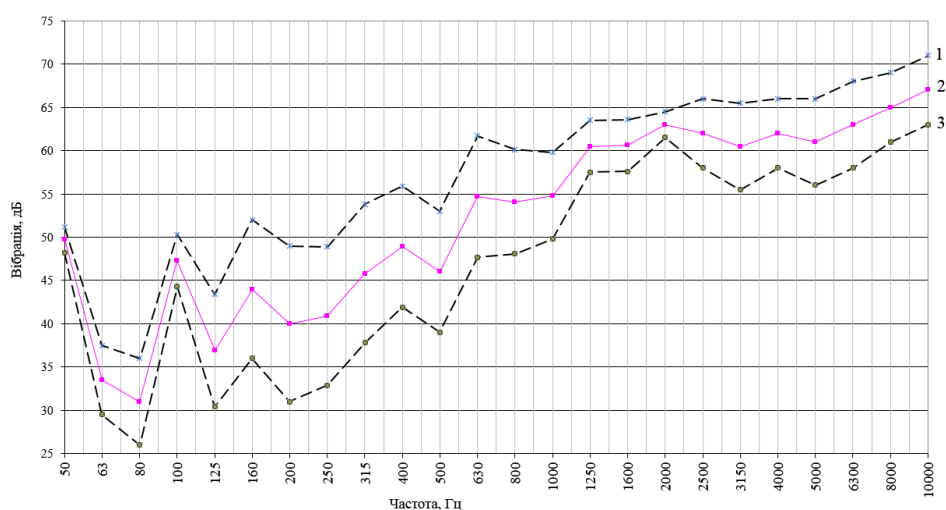
- \min – найменше значення величини вібрації на i -ій частоті, що визначається за умовою $\min = \min_j W_{ij}, i=1, 2, \dots, 24, j = 1, 2, \dots, 10$;
- \max – найбільше значення величини вібрації на i -ій частоті, що визначається за умовою $\max = \max_j W_{ij}, i=1, 2, \dots, 24, j = 1, 2, \dots, 10$;
- σ і v_i – відповідно статистичні середні квадратичні відхилення і коефіцієнт варіації вібрації, що визначаються за формулами (5.1), (5.2).

З таблиці додатку В можна зробити висновок про велику неоднорідність отриманих результатів. Мінімальний коефіцієнт неоднорідності отриманий при частоті $f = 50$ Гц (частоті живлення) – вплив мережевої напруги, максимальний коефіцієнт неоднорідності отриманий при частоті $f = 80$ Гц – вплив ЕД.

Спектрограми максимальних, мінімальних, середніх статистичних та середніх квадратичних розкидів вібраційних характеристик електродвигунів АНУ 92-2 представлені на рис. 5.6.

Для побудови сплайн-апроксимації був використаний програмний продукт STATGRAPHICS V.15. Більш детально відомості про цей пакет наведені в роботі [208].

На рис. 5.7 показана сплайн-апроксимація [209] вібрації ЕД АНУ 92-2.



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

Рисунок 5.6 – Спектрограми вібрацій електродвигунів АНУ92-2

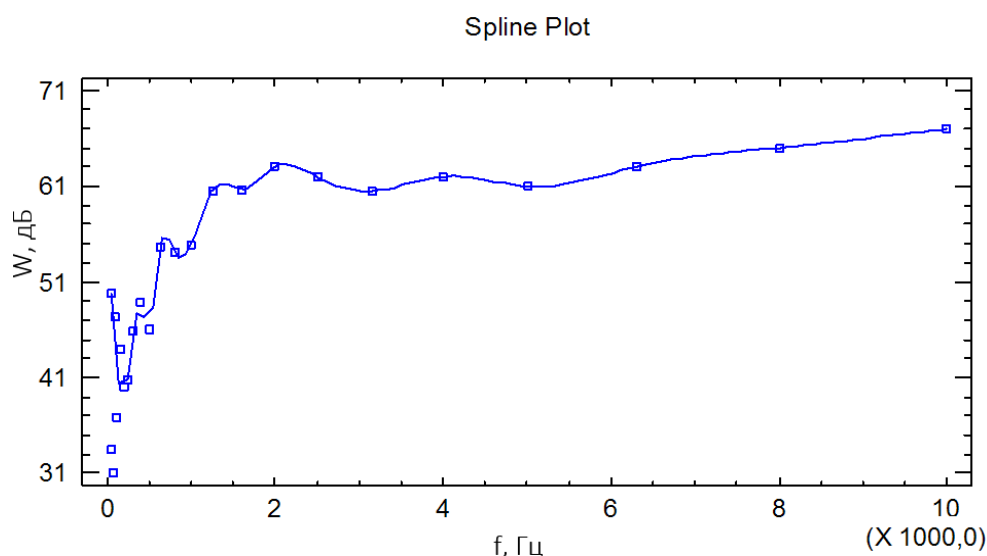


Рисунок 5.7 – Сплайн-апроксимація вібрації ЕД АНУ92-2 в досліджуваному спектрі частот

З графіків, наведених на рис. 5.6 і 5.7, важко зробити висновок про випадковість досліджуваної виборки електродвигунів. Тому було проведено додатковий аналіз отриманих результатів. Для цього аналізу був застосований метод критерію серій, заснований на медіані вибірки і критерій квадратів послідовних відносин. Ці методи докладно описані в роботі [203].

Для застосування методу критерію серій, заснованого на медіані вибірки розглянемо ряд даних $W = W_1, W_2, \dots, W_i, \dots, W_n$, $n = 24$. Чисельні значення елементів цього ряду відповідають даним, наведеним в стовпці W_i , представленим в таблиці додатку В. Перетворимо цей ряд в варіаційний, тобто в такий, для якого справедливо правило: $(W) = (W_1), (W_2), \dots, (W_{i-1}), (W_i) \dots (W_n)$, де $(W_1) = \min_i W_i$, $(W_n) = \max W_i$.

Для послідовності $(W_{i-1}), (W_i)$ справедлива умова $W_{i-1} \leq W_i$. Медіану послідовності (W) , що дорівнює величині $W_{med}(n)$ визначимо за виразом (5.3). Потім побудуємо послідовність σ , кожен елемент якої σ_i отримано за правилом (5.4).

Якщо різниця $\Delta_i = \bar{W} - W_{med}(n) = 0$, то елемент W_i далі ігнорується. Як зазначено у п.п. 5.3.1, величина $v(n)$ дорівнює загальній кількості серій; вели-

чина $\tau(n)$ дорівнює кількості елементів в найдовшій серії незалежно від символу. Складемо систему нерівностей (5.6). Якщо ця система нерівностей виконана, то слід прийняти гіпотезу про те, що досліджувана вибірка випадкова.

Значення величини $\tau_0(n)$ наведені в роботі [203]. У нашому випадку, при кількості спостережень над величиною 24 $\tau(n) = 5$. В умові (5.6) прийнято, що $\lfloor A \rfloor$ означає цілу частину числа A . Виділення серій для цього способу показано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Виділення серій для перевірки випадковості вибірки за критерієм серій, заснованому на методі медіан

Результати експерименту		Обробка результатів експерименту	
Частота, f , Гц	Середнє значення вібрації, дБ	Величина σ_i	Символ серії
50	49,7	-4,7	a
63	33,5	-20,9	a
80	31	-23,4	a
100	47,3	-7,1	a
125	36,9	-17,5	a
160	44	-10,4	a
200	40	-14,4	a
250	40,9	-13,5	a
315	45,8	-8,6	a
400	48,9	-5,5	a
500	46	-8,4	a
630	54,7	0,3	a
800	54,1	-0,3	b
1000	54,8	0,4	a
1250	60,5	6,1	b
1600	60,6	6,2	b
2000	63	8,6	b
2500	62	7,6	b
3150	60,5	6,1	b
4000	62	7,6	b
5000	61	6,6	b
6300	63	8,6	b
8000	65	10,6	b
10000	61,5	12,6	b
Медіана	54,4	-	-

Для перевірки гіпотези про випадковість вибірки з використанням критерію квадратів послідовних відношень обчислимо вирази (5.7)-(5.11).

У виразі (5.11) величина u_α дорівнює α – квантилі нормального розподілу. У нашому випадку при $\alpha = 0,95$, $u_\alpha = 1,64$. Якщо величина $\gamma < \gamma_\alpha$, то гіпотезу о статистичній незалежності вибірки слід відкинути. Результати підготовчих обчислень для використання критерію квадратів послідовних відношень показані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Обчислення послідовних різниць і їх статистичних характеристик

Результати експерименту		Послідовні різниці
Частота, f , Гц	Середнє значення вібрації, дБ	
50	49,7	
63	33,5	-16,2
80	31	-2,5
100	47,3	16,3
125	36,9	-10,4
160	44	7,1
200	40	-4
250	40,9	0,9
315	45,8	4,9
400	48,9	3,1
500	46	-2,9
630	54,7	8,7
800	54,1	-0,6
1000	54,8	0,7
1250	60,5	5,7
1600	60,6	0,1
2000	63	2,4
2500	62	-1
3150	60,5	-1,5
4000	62	1,5
5000	61	-1
6300	63	2
8000	65	2
10000	67	2
Результати розрахунку		
σ^2	113,3985	39,63988
q^2	-	19,81994
γ	-	0,174781

Результати перевірки гіпотези про незалежність результатів випробувань показані в таблиці 5.3.

Таким чином, отриману послідовність середніх значень результатів ви-

пробувань не можна визнати випадковою і тому слід визначити фактори, які можуть впливати на результати вимірювань. Можна припустити, що на результати вимірювань впливають два фактори: частота сигналу, що виконується відповідно до плану експерименту, представленому рядками в таблиці В.3 додатку В і природною неоднорідністю результатів (дефекти двигунів), обумовленою використанням для їх отримання десяти двигунів (стовпці в таблиці В.3 додатку В).

Таблиця 5.3 – Перевірка гіпотези про випадковість послідовності середніх значень результатів випробувань

Метод розрахунку	Параметри розрахунку					
	γ	γ_{α}	$\nu(n)$	$\nu_0(n)$	$\tau(n)$	$\tau_0(n)$
Критерій квадратів	0,174	1,328	-	-	-	-
Критерій серій	-	-	4	7	11	7

Для оцінки впливу цих факторів на результат експерименту був використаний дисперсійний аналіз. Його використовують для перевірки гіпотези про наявність зв'язку між результатами експерименту і факторами, які можуть на них впливати.

Так як вибірка, призначена для отримання результату експерименту невелика – всього десять об'єктів, тому був використаний метод непараметричного дисперсійного аналізу. Зокрема, був використаний критерій Фрідмана (вільний від розподілу двофакторний дисперсійний аналіз). Основні принципи його застосування описані в роботі [210]. Для отримання результатів було використано програмну систему AtteStat. Відомості про неї викладено в роботі [211]. Результати обчислень представлені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати двофакторного дисперсійного аналізу (Критерій Фрідмана)

Ефекти	Величина ефекту	Величина Pv
Фактор строк (частота)	1,452	0,469
Фактор стовбців (двигуни)	3,072	0,40

Для визначення значущості отриманих результатів використана величина F_v . Її статистичне обґрунтування дано в роботі [211]. Так, як величини F_v для ефектів рядків і стовпців перевищують 0,05, то слід визнати їх значущими [208, 212].

Для визначення величини вкладу кожного з факторів у загальну дисперсію скористаємося стандартним двухфакторним аналізом без повторень у вигляді, викладеному в роботі [210]. Слід підкреслити, що параметричний аналіз в даному випадку застосований не для встановлення суттєвості впливу фактору рядків або стовпців, бо це було встановлено при використанні непараметричного дисперсійного аналізу і приведено в таблиці 5.4, а для визначення відносної величини кожного з факторів в загальну суму квадратів і, власне, визначення його важливості у порівнянні з іншими. Результат цього аналізу наведено в таблиці 5.5.

Так як внесок в загальну похибку можна порівняти із загальною похибкою, в подальшому будемо розглядати тільки побудову регресійного рівняння виду $W = \varphi(f)$. Для його побудови і подальшого аналізу використані процедури, які є складовою частиною пакету STATGRAPHICS V.15.

Таблиця 5.5 – Визначення відносної частки суми квадратів кожного з факторів у загальній сумі квадратів

Джерело варіації	Сума квадратів	Питома вага, %
Строки (частота)	26081,65	76,4
Стовбці (електродвигуни)	4141,983	12,1
Похибка	3899,017	11,4
Разом	34122,65	1,0

Детальне їх обґрунтування наведено в роботі [212]. Важливою особливістю цього пакета є те, що він пропонує краще регресійне рівняння з великої кількості вбудованих в нього рівнянь. Було вибрано рівняння виду:

$$\ln W = \sqrt{a + b \cdot \ln f} . \quad (5.17)$$

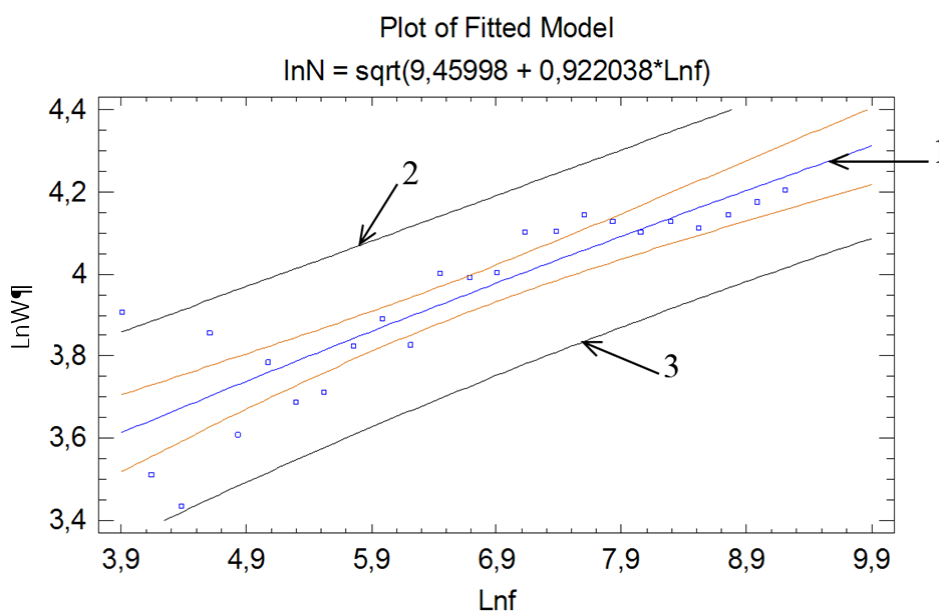
В результаті обчислень отримано вираз виду:

$$\hat{\ln}(W_i) = \sqrt{9,45998 + 0,9220 \cdot \ln f_i} . \quad (5.18)$$

Графік, що відповідає цьому рівнянню показаний на рис. 5.8.

З графіка видно, що всі точки фактичних експериментальних значень, крім однієї, знаходяться в їх межах. Це свідчить про те, що отримане рівняння не суперечить дослідним даним. Слід зазначити, що отримана залежність встановлює залежність між частотою обертання ЕД в діапазоні від 50 Гц до 10 кГц і усередненим значенням вібрації ЕД. З рис. 5.8 випливає, що якість апроксимації задовільна, бо тільки одне експериментальне значення вийшло за межі довірчого інтервалу – значення вібрації на частоті 50 Гц. Це вплив напруги мережі. Такий стрибок вібрації пов'язаний з тим, що в даній роботі не було проведено кроків по покращенню якості напруги, що живить ЕД. А значить, в даному випадку, ця точка, що вийшла за межі довірчого інтервалу не є показовою для визначення якості ЕД.

Результати статистичного аналізу коефіцієнтів рівняння наведено в таблиці 5.6 в тому вигляді, в якому їх видає пакет STATGRAPHICS V.15.



1 – графік отриманий з рівняння регресії (5.18); 2, 3 – границі довірчих інтервалів рівняння регресії

Рисунок 5.8 – Графік регресійної залежності між величиною натурального логарифма частоти обертання ЕД і вібрацією ЕД

Результати дисперсійного аналізу рівняння регресії наведені в таблиці 5.7 в тому вигляді, в якому їх видає пакет STATGRAPHICS V.15.

Так, як величини *P-Value*, наведені в таблиці 5.6 і таблиці 5.7 менші, ніж 10^{-4} , то і отримані коефіцієнти регресійного рівняння і саме рівняння слід вважати статистично значущими.

Статистична оцінка кореляції середнього значення вібрації електродвигунів приведена в таблиці 5.8.

Таблиця 5.6 – Результати статистичного аналізу коефіцієнтів регресійного рівняння

	<i>Least Squares</i>	<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
Intercept	9,45998	0,71076	13,3097	0,0000
Slope	0,922038	0,10524	8,76125	0,0000

Таблиця 5.7 – Дисперсійний аналіз рівняння регресії

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
Model	51,8499	1	51,8499	76,76	0,0000
Residual	14,8607	22	0,675485		
Total (Corr.)	66,7106	23			

Таблиця 5.8 – Статистична оцінка кореляції середнього значення вібрації електродвигунів

Коефіцієнт кореляції, <i>r</i>	0,88181
Коефіцієнт детермінації, %	77,7237
Коефіцієнт детермінації скоригований, %	76,7111
Середньоквадратична помилка оцінювання	0,821879
Середня абсолютна помилка	0,602861

Для більшої наочності отриманих результатів скористаємося наведеною в роботі [213] таблицею для кількісної оцінки тісноти зв'язку аргументів і розрахункових значень, отриманих з використанням відповідного регресійного

рівняння, доповненої величинами коефіцієнтів детермінації (R-squared), які наведені в таблиці 5.9.

Порівнюючи наведені в таблиці 5.8 коефіцієнти кореляції і коефіцієнти детермінації зі значеннями, наведеними в таблиці 5.9 можна зробити висновок про те, що встановлений статистична зв'язок між частотою і вібрацією може бути віднесеним до категорії сильного. Це означає, що отримане регресійне рівняння виду (5.18) придатне для практичного застосування.

Таблиця 5.9 – Кількісні критерії тісноти зв'язку

Характер зв'язку	Величина коефіцієнта кореляції	Величина коефіцієнта детермінації, %
практично відсутній	$< \pm 0,3$	$< 0,09$
слабкий	$\pm 0,3 \dots \pm 0,5$	$0,09 \dots 0,25$
помірний	$\pm 0,5 \dots \pm 0,7$	$0,25 \dots 0,49$
сильний	$\pm 0,7 \dots \pm 0,1$	$0,49 \dots 1$

Для оцінки інтерполяційних властивостей отриманого рівняння в роботі [213] запропоновано використовувати величину абсолютної середньої процентної оцінки помилки MAPE (Mean Absolute Percent Error), яка визначається за умовою:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\ln(W_i) - \hat{\ln}(W_i)|}{W_i} \cdot 100\%, \quad (5.19)$$

де $\ln(W_i)$ – фактичне середнє значення вібрації двигуна на частоті f_i ;

$\hat{\ln}(W_i)$ – розрахункове значення середнього значення вібрації двигуна на частоті f_i , що визначається за виразом (5.18).

Необхідні дані для розрахунку величини *MAPE* наведені в таблиці 5.10.

У таблиці 5.10 значення, занесені в останній стовпець отримані за виразом (5.18).

Величина *MAPE* визначена за умовою (5.18) склала 2,06 %, тобто точність апроксимації результатів експерименту отриманим регресійним рівнянням виду (5.19) можна вважати цілком задовільною.

Додатково проведено статистичну обробку спектрограм вібрації серійних доопрацьованих конструкцій електродвигунів в яку входило визначення мінімальних, максимальних і середніх арифметичних і середніх квадратичних відхилень від їх середнього значення, рис. 5.10.

Таблиця 5.10 – Результати експерименту та їх розрахункові значення

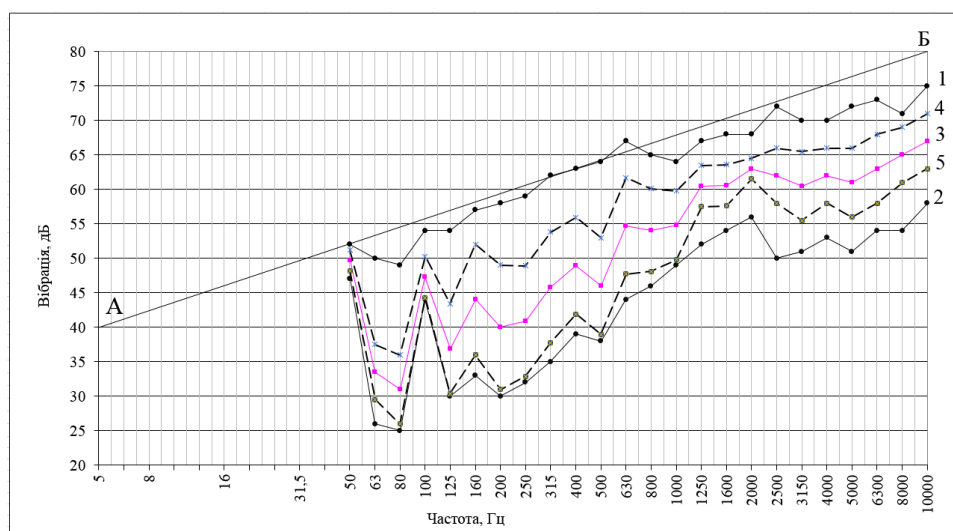
Результати експерименту		Логарифмічно перетворені результати експерименту		Розрахункове середнє значення вібрації, $\hat{\ln}(W_i)$
Частота обертання двигуна, f , Гц	Середнє значення вібрації, дБ	Частота обертання двигуна, $\ln(f)$	Середнє значення вібрації, $\ln(W_i)$	
50	49,7	3,912023	3,906005	3,61483
63	33,5	4,143135	3,511545	3,64419
80	31	4,382027	3,433987	3,67429
100	47,3	4,60517	3,85651	3,70218
125	36,9	4,828314	3,608212	3,72986
160	44	5,075174	3,78419	3,76025
200	40	5,298317	3,688879	3,78751
250	40,9	5,521461	3,71113	3,81457
315	45,8	5,752573	3,824284	3,8424
400	48,9	5,991465	3,889777	3,87096
500	46	6,214608	3,828641	3,89745
630	54,7	6,44572	4,001864	3,92469
800	54,1	6,684612	3,990834	3,95265
1000	54,8	6,907755	4,00369	3,97859
1250	60,5	7,130899	4,102643	4,00436
1600	60,6	7,377759	4,104295	4,03269
2000	63	7,600902	4,143135	4,05812
2500	62	7,824046	4,127134	4,08339
3150	60,5	8,055158	4,102643	4,1094
4000	62	8,29405	4,127134	4,13611
5000	61	8,517193	4,110874	4,16091
6300	63	8,748305	4,143135	4,18644
8000	65	8,987197	4,174387	4,21266
10000	67	9,21034	4,204693	4,23701

Рівень технології виробництва ЕД визначали за розкидом значень мінімальних і максимальних рівнів вібрації. Вибір конструктивних рішень щодо зниження вібрації електродвигунів здійснювався за джерелами високих рівнів вібрацій, збуджуваних конструктивними і технологічними дефектами досліджуваних двигунів при їх живленні від мережі 380 В і частоті 50 Гц.

Живлення ЕД від мережі 380 В і частоті 50 Гц прийнято для полегшення практичної реалізації приймальних випробувань на підприємствах, де виготовляють двигуни.

Визначення допустимого рівня вібрації і її зв'язок з ресурсом ЕД

Результати статистичної обробки вібраційних характеристик відпрацьованих (доведених) ЕД у відповідності до рекомендацій, представлених в п. 5.4 на прикладі електродвигуна потужністю 90 кВт, рис. 5.9, є максимально досягнутими можливостями зниження вібрації існуючої конструкції і технології серійного виробництва.



1, 2 – максимальні і мінімальні значення рівнів; 3 – середні значення рівнів; 4, 5 – середні квадратичні відхилення рівнів

Рисунок 5.9 – Спектрограми вібрацій ЕД АНУ92-2 М362 в режимі холостого ходу:

Великий розкид рівнів вібрації (до 26 дБ, рис. 5.9), що збуджують підшипникові вузли, дисбаланс, неспіввісність і перекося деталей і магнітні дже-

рела (область спектрів вібрації 1250 Гц) – до 16 дБ вказує на те, що існуюча конструкція і технологія виробництва не забезпечують точність і стабільність параметрів, а великі значення середньоквадратичних відхилень рівнів вібрації двигунів і двигунів з низькими рівнями вібрації вказують на можливості вдосконалення (зміни) конструкції і технології виробництва.

Для подальшого підвищення якості (надійності і ресурсу) електродвигунів за базові вихідні рівні вібрації прийняті досягнуті значення спектрів, що апроксимуються прямою АВ (рис. 5.9), 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.

За подальше підвищення якості ЕД прийнята відома залежність. Зниження вібрації ЕД на 8 дБ нижче прямої АВ вказує на перехід ЕД в інший (вищий) клас технічного стану (таблиця 5.11). На цій підставі розроблені класи Г, Д, Е норм вібрації ЕД на холостому ході і під навантаженням (рис. 5.10).

Таблиця 5.11 – Рівні вібрації ЕД в 1/3 октавних смугах частот, дБ

Частота, Гц	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63
АВ	40	41	42	43	44	45	47	48	50	51	52	54
АВ - 8 дБ	32	33	34	35	36	37	39	40	42	43	44	46
АВ - 16 дБ	24	25	26	27	28	29	31	32	34	35	36	38
Частота, Гц	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
АВ	55	57	59	59	60	62	62	63	64	67	68	69
АВ - 8 дБ	48	49	50	52	53	54	56	57	58	60	61	62
АВ - 16 дБ	36	37	39	40	41	43	44	45	47	48	49	50
Частота, Гц	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000		
АВ	70	71	72	73	74	75	76	77	78	80		
АВ - 8 дБ	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72		
АВ - 16 дБ	52	53	56	57	58	59	60	61	61	64		

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 АБ до застосування в електромобілях не рекомендуються через те, що високі рівні вібрації знижують надійність, прискорюють процеси зношування електродвигуна [124, 205], а також можуть мати шкідливий вплив на людину і навколишнє середовище.

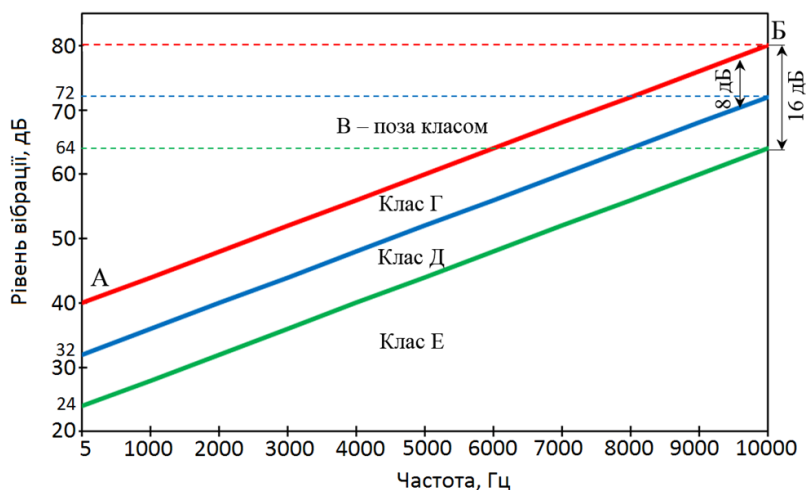


Рисунок 5.10 – Діапазони класів вібрації електродвигунів

Науково доведено, що при зменшенні вібрації на 8 дБ збільшується ресурс ЕД в два рази, а при зменшенні на 16 дБ – в три рази [214]. У відповідності до цього і на основі проведених досліджень, використовуючи методи оцінки за вібраційними характеристиками ресурсу машин [124, 205], можна стверджувати, що ресурс електродвигунів класу Е в три рази більший, ніж класу Г і в два рази більший, ніж класу Д. А це означає, що підвищивши клас електродвигуна хоча б на один (тобто з класу Г до Д або з Д до Е), можна прогнозувати збільшення ресурсу його роботи в два рази.

Розробка конструктивних і технологічних рішень щодо зниження вібрацій ЕД до класу Д і Е, що збуджуються механічними джерелами, підшипниковими вузлами, неспіввісною і перекосами деталей, від способу кріплення ЕД і технології зборки електродвигунів в даній роботі не розглядалась.

Висновки за розділом 5

1. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що розкид максимальних і мінімальних рівнів вібрацій електродвигунів тягового приводу електробуса знаходиться в межах 10...30 дБ, а середньоквадратичних відхилень 2...9 дБ. Найбільші середні квадратичні відхилення рівнів вібрацій знаходяться на частотах 160...1250 Гц.

2. Розроблено метод зниження рівня вібрації, що збуджується магнітними джерелами, який базується на виборі форми паза магнітопроводу ротора, що дозволило розробити рекомендації щодо зниження цього рівня і виявлено можливість випуску електродвигунів з рівнем вібрацій нижчим на 8дБ від вимог ТУ (без урахування частоти обертання і частоти живлення).

3. Експериментальним шляхом визначено, що на зниження рівня вібрації, що збуджується магнітними джерелами впливає форма паза магнітопроводу ротора. Вона істотно впливає в області магнітних частот і мало впливає на інших ділянках спектра від частоти обертання до 1000 Гц.

4. Визначено критерії оцінки якості проектування, виробництва і вибору тягового електродвигуна для підвищення ресурсу експлуатації електробусів.

– Розроблено 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);

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 дозволя-

ють оцінювати їх технічний рівень:

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

- не допустимими вібраціями являються рівні вібрації, що перевищують пряму 40 дБ на частоті 5 Гц і 80 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.

Прийняті основні методи статистичних досліджень вібродіагностичних характеристик тягових електродвигунів для електробусів, мають гарантовану ступінь достовірності. Абсолютна середня процентної оцінки помилки MARE склала 2,6 %.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [19, 12, 5, 17].

РОЗДІЛ 6

РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

6.1 Рекомендації щодо створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ в транспортній інфраструктурі

Рівень розвитку сучасного суспільства досяг розуміння того, що необхідно піклуватися не тільки про сьогодні, але й про майбутнє. Паливно-ресурсні проблеми, як і проблеми екології, в цьому аспекті займають передові позиції. Найгострішими є екологічні проблеми міст, які переповнені автомобільним транспортом, що є визначальним у забрудненні атмосфери.

З середини 1990-х років в ряді розвинених зарубіжних країн на загальнодержавних та міських рівнях було здійснено «Зелену податкову реформу», в результаті якої власники гібридних автомобілів та електромобілів отримали помітні податкові пільги [16]. До того ж, Єврокомісія запропонувала до 2050 р. заборонити використання в містах ЄС автомобілів з ДВЗ зовсім, ґрунтуючи стратегію розвитку транспорту на найближчі десятиліття на «Білій Книзі з транспорту». І тому зараз у багатьох розвинених країнах світу почався масованій «перехід» автомобілебудівників на виробництво електромобілів і на переобладнання інфраструктури під цей вид транспорту.

Звісно, це не може не стосуватися України. З кожним роком на наш ринок потрапляє все більша кількість автомобільного електротранспорту, тому швидка підготовка транспортної інфраструктури України дозволить з легкістю прийняти і обслуговувати велику кількість електромобілів, що найближчим часом замінять звичні нам бензинові автомобілі.

У зв'язку з цим важливим завданням є розробка методів системного впровадження енергозберігаючих технологій. Це дозволить не тільки генерувати ЕЕ, але й автоматизувати обслуговування доріг, забезпечити рух автот-

ранспорту, вирішить проблему з електрозаправками, а значить і прискорить процес переходу від ДВЗ до сучасних ТЗ на електричному приводі.

Як відомо, до сучасної транспортної інфраструктури ставиться ряд серйозних вимог. Вона повинна бути екологічною, безпечною, незалежною, обслуговувати себе, зручною, а також такою, що вписується в природний або міський ландшафт.

Метод інтеграції альтернативної енергетики в транспортну інфраструктуру представлено на рис. 6.1 [16]. Відповідно до нього, основними джерелами енергії повинні бути сонячні електростанції, перетворювачі кінетичної енергії в електричну, вітрогенератори тощо.



Рисунок 6.1 – Інтеграція АСГЕЕ в транспортну інфраструктуру

Що стосується перетворювачів сонячної енергії, вони встановлюються на ліхтарі вуличного освітлення, на світлофори, на дахи зупинок, вбудовуються в так звані «розумні дороги». Протягом світлового дня вони заряджають підключені до них акумуляторні батареї, а в темний час доби – висвітлюють дорогу і прилеглі території. Також ця енергія може слугувати для підігріву зупинок і лавок в холодну пору доби, для підзарядки мобільної апаратури.

тури (телефонів, планшетів, ноутбуків тощо), для живлення світлофорів, для зарядки транспортних засобів. Надлишки енергії можуть передаватися до-вколишнім споживачам.

В останні роки не тільки в європейських містах, а й в Україні з'явилася велика кількість електромобілів. Більш того, якщо буде вирішена проблема з заправними станціями для електромобілів, то це прискорить заміну автомобілів з ДВЗ на їх екологічні електричні аналоги, а значить дасть поштовх для розвитку економіки країни. Тому дуже важливо при плануванні нової транспортної інфраструктури врахувати необхідність установки електрозаправок не тільки в населених пунктах, а й на всіх трасах (починаючи від міжнародних і закінчуючи обласними).

Ці електрозаправки повинні живитися не тільки від загальної мережі, а від й сонячних батарей, від вітрогенераторів і від самих енергогенеруючих доріг. Тоді витрати на утримання заправок будуть мінімальними, а згодом вони почнуть приносити прибуток.

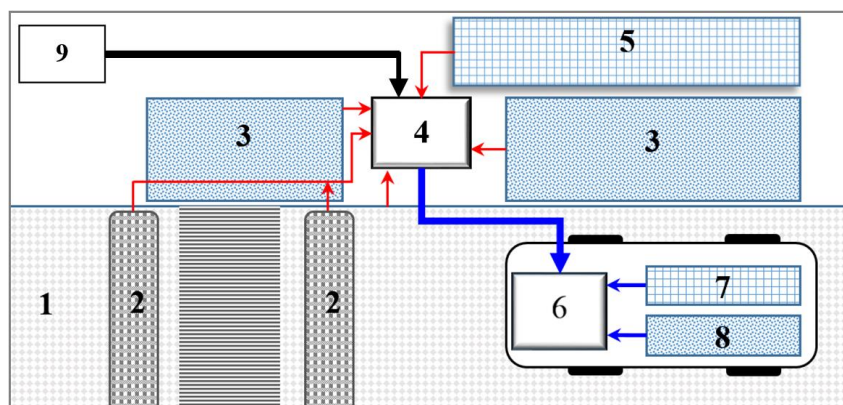
Що стосується вітрогенераторів, то їх краще встановлювати далеко від населених пунктів уздовж або над автострадами [16]. Завдяки різноманітності існуючих вітрогенераторів є можливість вибирати їх конструкцію і розміри в залежності від конкретних умов експлуатації. Завдяки цьому можна досягти найбільшої ефективності їх роботи.

Але самі по собі альтернативні джерела енергії не настільки ефективні як хотілося б. Важливо об'єднати їх в єдину замкнену систему, що і передбачають, так звані, «розумні дороги» [16].

У Харківському національному автомобільному-дорожньому університеті розроблено і запатентовано ряд розробок, що реалізують ідею «розумних доріг» [151, 152, 158, 215]. Їх впровадження дозволить зробити великий стрибок у розвитку транспортної інфраструктури України, ставши передумовою широкого використання електромобілів.

Запропоновано метод створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ в транспортній інфраструктурі. На рис. 6.2 представлено

елемент даної системи на прикладі однієї зупинки і прилеглої до неї транспортної інфраструктури.



1 – енергогенеруюче дорожнє покриття; 2 – пристрої примусового зниження швидкості, що генерують ЕЕ; 3 – енергогенеруюча платформа з лінійним електрогенератором та електричною машиною обертового типу з триступеневим мультиплікатором; 4 – зарядна станція для ЕБ; 5 – сонячні панелі розташовані на зупинці і на зарядній станції; 6 – блок суперконденсаторів; 7 – сонячні панелі на даху ЕБ; 8 – АСГЕЕ з лінійним електрогенератором та електричною машиною обертового типу з триступеневим мультиплікатором на борту ЕБ; 9 – тягова підстанція

Рисунок 6.2 – Елемент об'єднаної системи альтернативних джерел генерації електричної енергії для зарядки міських електробусів

Для успішної і швидкої реалізації даного методу необхідно послідовно виконувати наступні положення, які представлені на рис. 6.3:

- прийняття підзаконних актів, щодо підтримки і стимулювання розробки і впровадження енергоефективних технологій у транспортну інфраструктуру, як шлях до енергонезалежності і екологічної безпеки України;
- розробка енергоефективного обладнання і технологій для електричного автотранспорту, відповідно до рис. 6.1;
- розробка методичних вказівок і технічної документації;
- пошук постачальників сучасних матеріалів і виробників обладнання, згідно з технічною документацією;
- розробка програмного забезпечення для «інтелектуалізації» системи;
- підбір та навчання фахівців, які буду виконувати роботи з будівництва, монтажу та наладки;

- монтаж у відповідності до технічної документації;
- електричне підключення всіх складових системи;
- установка програмного забезпечення;
- налагодження роботи;
- експлуатаційний догляд і контроль за роботою.

Слід зазначити, що кожен з представлених пунктів вимагає глибокого аналізу і уточнень.



Рисунок 6.3 – Реалізація методу створення об'єднаної системи альтернативних джерел генерації ЕЕ для зарядки міських електробусів

На сьогоднішній день в Україні є фактори, що перешкоджають повномасштабній модернізації транспортної інфраструктури, таблиця 6.1. Щоб уникнути помилок і додаткових витрат часу і фінансів, необхідно заздалегідь врахувати кожен з них. Планомірне їх вирішення дозволить з найменшими психологічними, фінансовими і часовими втратами інтегрувати енергоефективні технології у транспортну інфраструктуру України.

Дотримання алгоритму впровадження, згідно з методом інтеграції енергозберігаючих технологій в транспортну інфраструктуру, з паралельним вирішенням проблем, переставлених в таблиці 6.1, дозволить швидко і ефективно підготувати транспортну інфраструктуру України до масштабного використання сучасного автомобільного електротранспорту.

Таблиця 6.1 – Фактори, що перешкоджають повномасштабній модернізації транспортної інфраструктури України

	Фактори	Шляхи вирішення
1	Економічні	Пошук міжнародних інвестицій і фінансових донорів
2	Технічне обладнання	Пошук провідних виробників сучасного високотехнологічного обладнання; аналіз можливостей, розробка і запуск власних виробничих потужностей з випуску деяких позицій обладнання.
3	Людський фактор	Пошук фахівців в країнах, де вже проводилися подібні роботи; навчання власних фахівців.
4	Складність завдання	Повна заміна старих технологій на сучасні, інтелектуальні та енергоефективні.

6.2 Рекомендації щодо проектування і вибору електродвигунів тягового електроприводу електробусів

Рекомендації щодо проектування вибору тягових електродвигунів для електробусів складаються з наступного.

1. Вибір електродвигунів для електробусів повинен розглядатися з урахуванням всієї енергетичної системи і умов експлуатації ТЗ.
2. Тягові колекторні електродвигуни постійного струму в нових розробках електробусів застосовувати недоцільно, оскільки їх висока вартість і експлуатаційні витрати на технічне обслуговування не можуть бути компенсовані дещо нижчою вартістю силового електронного керуючого блоку.
3. Рекомендується застосовувати у якості тягових двигунів електробусів – асинхронні частотно-керовані електродвигуни. Це дозволить в широкому діапазоні частот обертання мінімізувати вагу і габарити ЕД, а також, в порівнянні з колекторними двигунами, знизити вартість технічного обслуговування.

4. Для контролю якості і надійності експлуатації асинхронних електродвигунів при прийнятно-здавальних випробуваннях необхідно спиратися на розроблені класи двигунів за рівнем вібрації:

- Клас Г (при $f = 5$ Гц вібрація ≤ 40 дБ; при $f = 10$ кГц вібрація ≤ 80 дБ);
- Клас Д (при $f = 5$ Гц вібрація ≤ 32 дБ; при $f = 10$ кГц вібрація ≤ 72 дБ);
- Клас Е (при $f = 5$ Гц вібрація ≤ 24 дБ; при $f = 10$ кГц вібрація ≤ 64 дБ).

Електродвигуни з рівнями вібрацій більше 40 дБ на частоті $f = 5$ Гц і більше 80 дБ на частоті $f = 10$ кГц використовувати в електробусах як тягові електроприводи не рекомендується.

5. При проектуванні електродвигунів з метою зниження рівня вібрації і підвищення надійності експлуатації тягових ЕД електробуса, необхідно враховувати наступне:

– оптимальна величина повітряного зазору між ротором і статором залежить від полюсності, габариту, кількості пазів ротора і статора, характеристик жорсткості коливальної системи ротор-статор двигунів. Для двополюсних двигунів оптимальним є зазор 1,2 мм;

– використання дугоподібної форми паза магнітопроводу ротора дає можливість знизити вібрацію ЕД в області магнітних частот на 7-8 дБ в порівнянні з ротором, що має т-подібний паз і на 14-15 дБ від електродвигуна з трапецеїдальним пазом. Такі зниження вібрацій магнітного походження укладаються в рівні вібрацій класу Д і Е верхнього діапазону;

– зниження індукції в зазорі магнітопроводів ротор-статор на 25-40 % призводить до зниження до 7 дБ рівнів вібрації на зубцевих частотах. Величина зниження залежить від монтажного виконання електродвигуна. Вона проявляється сильніше при кріпленні ЕД на лапах і слабкіше на фланці;

– при прийнятно-здавальних випробуваннях двигунів і їх експлуатації визначення вібраційних характеристик проводиться за різниці лінійних напруг мережі живлення не більше 4 В. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної форми напруги не повинен перевищувати 14 %.

Розроблені рекомендації і отримані критерії призначені для впровадження в серійне виробництво тягових електродвигунів. Вони дозволяють:

- проектувати асинхронні тягові двигуни на задані рівні вібрації, що веде до підвищення надійності експлуатації та ресурсу;
- здійснювати контроль якості виготовлення на стадії виробництва;
- контролювати технічний стан ЕД по перевищенню їх рівнів вібрації при експлуатації, тобто перехід в інший клас технічного стану.

6.3 Рекомендації щодо забезпечення технічного стану тягового електроприводу електробуса у відповідності до нормативних значень

Для контролю якості ремонту тягових ЕД треба використовувати частотні вібраційні діагностичні ознаки дефектів, види контрольованих дефектів і методи їх усунення, що представлені у таблицях 4.3 і 4.4., а також граничні значення діапазонів класів вібрації ЕД, що представлені на рис. 5.15.

На рис. 6.4 представлено алгоритм оцінки якості ремонту тягових електродвигунів. Для оцінки якості ремонту тягових електродвигунів необхідно діяти у відповідності до даного алгоритму.

Рисунок 6.4 у своєму складі має наступні блоки:

- 1 – ввод класу ЕД у відповідності до рис. 5.15;
- 2 – проведення вимірювань вібрації в спектрі частот 5 Гц – 10 кГц;
- 3 – рівні вібрації відповідають нормам для класу досліджуваного ЕД у відповідності до блоку 1;
- 4 – ЕД не потребує ремонту;
- 5 – ЕД – в експлуатацію;
- 6 – вібрації перевищують норми більше, ніж на 4 дБ;
- 7 – незначний дефект;
- 8 – потрібне 100 % відновлення ЕД;
- 9 – проведення обкатки ЕД (для нового ЕД) / незначного ремонту;
- 10 – вібрація відповідає класу двигуна, блок 1;

- 11 – зниження класу ЕД на один, рис. 5.15;
- 12 – вібрації перевищують норми більше, ніж на 4 дБ;
- 13 – значний дефект;
- 14 – визначення причин виникнення вібрації, таблиця 4.3;
- 15 – усунення причин, регулювання ЕД;
- 16 – параметри ЕД дозволяють перевести його в нижчий клас, рис. 5.15;
- 17 – зниження класу ЕД на один, рис. 5.10;
- 18 – критичний дефект, ЕД використовувати не рекомендується.

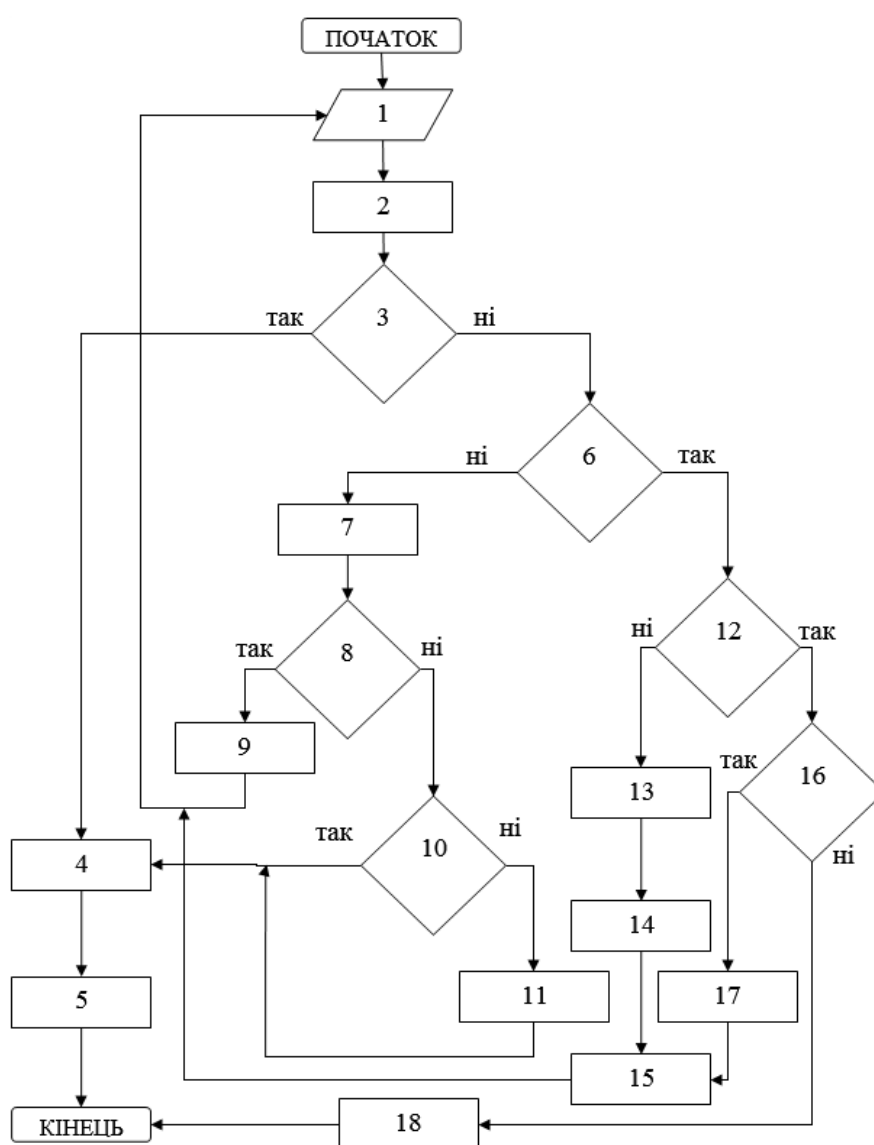


Рисунок 6.4 – Алгоритм оцінки якості ремонту тягових електродвигунів

Якщо вібрації не перевищують норму (блок 3), яка відповідає класу да-

ного двигуна (блок 1), то значить, що ЕД задовольняє заданій якості, рис. 6.2. Перевищення вібрації над нормою визначає вид дефекту (таблиця 4.4), в залежності від частоти на якій спостерігається це перевищення, і рівень дефектності ЕД – в залежності від величин вібрації.

Для контролю якості поточного і капітального ремонту ЕД треба дотримуватися норм на 80 % і 100 % відновлення проектного ресурсу.

Для 100 % відновлення ресурсу рівні вібрації відремонтованих ЕД не повинні перевищувати норми вібрації якості виготовлення (4.9). При 80 % відновленні ресурсу рівні вібрації по всьому спектру третьоктавних значень вібрації не повинні перевищувати норму якості виготовлення більше, ніж на 4 дБ у відповідності до формул (4.6), (4.12).

При перевищенні вібрації значення норми до 4 дБ (блок 6) дефект вважається незначним (блок 7), і його усунення можливе обкаткою (блок 9) при необхідності 100 % відновлення.

При перевищенні вібрації більше ніж на 4 дБ (блок 12), ЕД має значний дефект (блок 13), тому треба визначення причин виникнення вібрації (блок 14) у відповідності до таблиці 4.3 і усунути їх (блок 15).

Критичні дефекти з перевищенням вібрації понад 4 дБ використовувати не рекомендується (блок 18).

6.4 Економічна ефективність від впровадження електробуса на типовому міському маршруті

Місто Харків є другим за кількістю населення в Україні, займає площу близько 350 км², тому громадський транспорт є найважливішою складовою для повноцінного існування міста. В Харкові є різні види наземного міського транспорту, а саме: тролейбуси, автобуси, трамваї і маршрутні таксі.

Як відомо, тролейбусні мережі є відносно розгалуженими, але через відсутність мобільності не можуть повністю вдовольнити потреби городян. Автобуси і маршрутні таксі є більш дорогим видом транспорту, мають гнучкі

маршрути, але вони забруднюють навколишнє середовище, незручні і часто є небезпечними для пасажирів.

Виходячи з економічних і технічних можливостей, можна зробити висновок, що одночасна заміна всіх маршрутів тролейбусів на електробуси неможлива. Тому пропонується починати впровадження електробусів, охоплюючи нові маршрути і поступово замінюючи короткі маршрути, що мінімально перетинаються з іншими. При цьому виникає важливе питання вибору параметрів електробусу з урахуванням пасажиромісткості, часу автономного ходу, часу зарядки і, що важливо – вартості. Тому розглянемо три основні види електробусів: електробус з нічною зарядкою; електробус з зарядкою на кінцевих зупинках; електробус на суперконденсаторах, таблиця 6.2 [17].

Таблиця 6.2 – Порівняльні характеристики різних видів електробусів

	Електробус з нічною зарядкою	Електробус з зарядкою на кінцевих зупинках	Електробус на суперконденсаторах
Ємність батарей, кВт·год	від 250	35-120	від 15
Час зарядки	3-10 год.	5-20 хв.	десятки секунд
Пробіг, км	150 і більше	10-70	2-50
Зарядний струм, А	60-90	350-500	60-250
Інфраструктура	КТП і зарядні станції в депо	ЕТП і зарядні станції на кінцевих зупинках	ЕТП і зарядні станції на маршруті
Вартість, тис. доларів	390-570	360-500	220-290

В Розділі 3 було проведено аналіз різних видів електробусів, який дозволив зробити наступні висновки. З одного боку нічна зарядка електробусів є економічно вигіднішою, ніж зарядка вдень через те, що оплата за спожиту електроенергію здійснюється за нічними тарифами (згідно з постановою НЕК “Укренерго” від 01.12.2017 № 01/14392 [71]). До того ж, зменшується навантаження на міські електричні мережі у денний час. Але при цьому виникає така проблема, як необхідність встановлення потужних зарядних станцій на території депо. І чим більше електробусів буде впроваджено в експлуатацію, тим більша кількість зарядних станцій буде потрібна. Крім цього у електро-

бусів з нічною зарядкою встановлюються акумуляторні батареї в якості накопичувачів енергії. Найбільш поширений тип батарей, що використовуються в електромобілях різних виробників – це літій-іонні (Li-ion) і нікель-метал-гідридні акумулятори (NiMH) [18]. Вони мають малий ресурс експлуатації. Витримують до 1000 зарядів/розрядів. Тобто при щоденному використанні у найкращому випадку акумулятор прослужить менше трьох років. Після цього необхідно буде міняти його на новий. А вартість нового акумулятора складає близько половини вартості всього електробуса [17].

Ще одним недоліком використання акумуляторів є їх залежність від температури навколишнього середовища. До того ж, в них не припустимі глибокі розряди, бо можуть призводити до повної їх непрацездатності.

На відміну від акумуляторних батарей позбавлені таких недоліків. Але вони не призначені для довгого зберігання енергії і можуть забезпечити невелику автономність ходу електробуса.

Електробуси з зарядкою на кінцевих зупинках можуть використовувати у якості накопичувачів енергії як акумуляторні батареї, так і суперконденсатори. При використанні АКБ, виникають ті самі проблеми з акумуляторами, що були зазначені вище, з тією відміною, що зарядні станції треба встановлювати на кінцевих зупинках і час зарядки буде складати до 20 хв. в залежності від ємності АКБ і потужності зарядної станції.

При використанні суперконденсаторів, у цих видах електробусів, час зарядки складає до 7 хв. при можливості автономного ходу до 50 км.

Вибір виду електробуса і ємності накопичувача енергії залежить від декількох факторів:

- від довжини маршруту;
- від інфраструктури (можливості встановлення зарядних станцій);
- від кількості транспортних засобів, які потребують одночасної зарядки на кінцевих зупинках тощо.

Враховуючи все вище зазначене, а також особливості конкретного маршруту, пропонується у Харкові впровадити новий маршрут з використанням

електробусів на суперконденсаторах, що будуть заряджатися під час посадки/висадки пасажирів на зупинках.

Початкове впровадження електробусів пропонується здійснити на маршруті, який охоплює житловий мікрорайон Північна Салтівка м. Харкова. Це найкрупніший спальний район, де зараз проживає біля півмільйона людей [216].

Проблема цього району у тому, що все населення змушене з кінцевої станції метро пересідати на маршрутні таксі через те, що тролейбусні мережі не охоплюють повністю цей район. Вартість проїзду в маршрутних таксі у два рази більше, ніж у тролейбусах, при тому, що довжина найбільшого маршруту не перевищує 3,5 км.

На рис. 6.5 представлено карту на якій відображена частина Північної Салтівки, де пропонується впровадити новий електробусний маршрут [17].

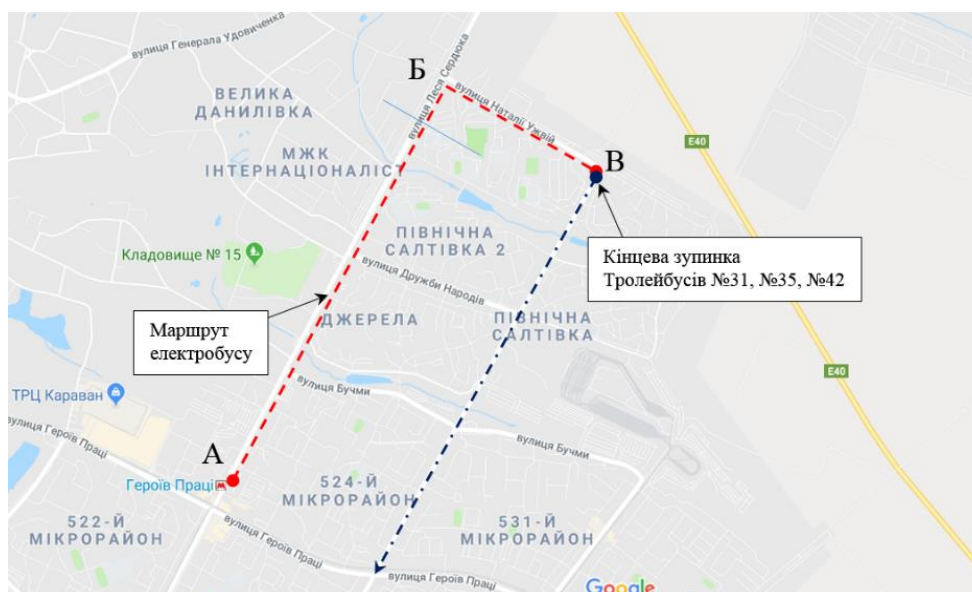


Рисунок 6.5 – Транспортні маршрути в м. Харкові в житловому районі Салтівка

На сьогодні від станції м. Героїв Праці (точка А) курсує маршрутне таксі (міський автобус «Богдан», середнього класу) № 41е (рис. 6.4. А-Б-В). Довжина маршруту складає 3,5 км. Пропонується саме на цьому маршруті впровадити пілотний проект з електробусами на суперконденсаторах.

Варто відзначити, що в т. В (зупинка Північна Салтівка) знаходиться кінцева зупинка тролейбусів №31, №35 та № 42. Це означає, що там можна встановити зарядну станцію для електробусів під'єднавшись до тролейбусної мережі. Це дозволить суттєво зекономити на тяговій підстанції.

В зв'язку з тим, що з т. А до т. В (кінцевої зупинки тролейбусів) і електробусу приблизно 3,5 км, виходячи з табл. 6.2, найбільш обґрунтовано вибрати електробус зі швидкою зарядкою на суперконденсаторах з автономним ходом близько 10 км. Це дозволить поставити лише одну зарядну станцію на маршрут електробусу. Тобто, електробус зарядиться в т. В на кінцевій зупинці під час посадки/висадки пасажирів, проїде повний маршрут в прямому і зворотному напрямках (В-Б-А-Б-В) і знов зарядиться на зупинці Північна Салтівка точка В, рис. 6.4 [17]. Час руху електробуса за маршрутом у прямому і зворотному напрямку займе приблизно 14 хв.

Для того, щоб отримати уявлення про вартість впровадження нового маршруту, а також порівняти витрати на побудову тролейбусного і електробусного приймемо, що для маршруту А-Б-В (рис. 6.4) знадобиться 6 одиниць ТЗ (як тролейбусів, так і електробусів) [17].

Використовуючи дані (вартість робіт, обладнання і матеріалів) з проекту «Міський громадський транспорт в Україні» [66], що знаходиться у відкритому доступі, а також інформацію надану представниками виробників електробусів ВАТ «Белкоммунмаш», проведемо порівняльні розрахунки витрат на прокладення нового маршруту електробуса і тролейбуса [17].

Вартість електробусу суттєво залежить від вартості суперконденсаторів, тобто від їх ємності, а значить і від автономного ходу. Тому можна суттєво знизити його вартість і зменшити час зарядки, якщо вибрати електробус з ємнісними накопичувачами, що забезпечують пробіг до 10 км.

Але через те, що представники ВАТ "Керуючої компанії холдингу "Белкоммунмаш" надали інформацію щодо вартості електробусів на суперконденсаторах E420 "VITOVТ ELECTRO" стандартної комплектації пасажиромісткості – 84 людини з автономним пробігом до 20 км, всі розрахунки про-

водилися саме для цих електробусів.

Результати розрахунків представлено в таблиці 6.3 [17].

З таблиці 6.3 видно, що навіть з урахуванням більшої вартості електробуса у порівнянні з тролейбусом, загальні витрати на прокладання тролейбусного маршруту більші за електробусний приблизно у 2,65 разів. При цьому взагалі не враховані чималі затрати на обслуговування тролейбусної мережі, її ремонт, а також великі втрати електроенергії. Натомість зарядні пристрої для електробусів знаходяться в захисному кожусі і на відміну від контактної мережі, де часто спостерігаються аварійні ситуації (наприклад, обрив), мають кращі показники безаварійної роботи. Також їх технічне обслуговування та ремонт потрібно виконувати значно з меншою періодичністю (різниця майже на порядок), при цьому втрати енергії будуть мінімальні.

Таблиця 6.3 – Витрати на прокладання нового маршруту електробусом і тролейбусом

	Електробус на суперконденсаторах E420 "VITOVIT ELECTRO"			Тролейбус		
	Кількість	Вартість за одиницю, тис. доларів	Всього, тис. доларів	Кількість	Вартість за одиницю, тис. доларів	Всього, тис. доларів
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. доларів	2900			7700		

6.5 Теоретичний розподіл енергії в міському електробусі при використанні альтернативних систем генерації електричної енергії

Використання електричного приводу в міському пасажирському транспорті дає можливість суттєво зменшити загальне енергоспоживання не тільки завдяки вибору конструкції електробуса і вбудованим пристроям генерації ЕЕ, але і завдяки транспортній інфраструктурі, що її генерує.

Для експлуатації електробуса як міського пасажирського транспорту

необхідна енергія на тягу E_T плюс енергія для особистих потреб $E_{o.п.}$. Ця енергія може бути отримана від особистих $E_{особ.}$ і зовнішніх джерел $E_{зовн.дж.}$ енергії, та від мережі живлення $E_{мер.}$

У загальному вигляді баланс енергії в електробусі можна представити у вигляді рівняння витраченої $E_{витр}$ і отриманої $E_{отрим}$ енергії:

$$\sum E_{витр} = \sum E_{отрим}; \quad (6.1)$$

$$\sum E_{витр} = E_T + E_{o.п.}; \quad (6.2)$$

$$\sum E_{отрим} = E_{мер} + \sum_{j=1}^n E_{особ.дж.} + \sum_{k=1}^m E_{зовн.дж.}, \quad (6.3)$$

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

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

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

$$E_T = 3,6 \cdot 10^3 \int_{\text{тяга}} \frac{V}{\eta_T \eta_D} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \quad (6.4)$$

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

η_T і η_D – ККД трансмісії і ЕД відповідно;

i – нахил дороги;

dV/dt – прискорення;

A_f – фронтальна зона електробуса;

ρ – щільність повітря;

δ – коефіцієнт маси, який представляє собою вплив обертових компонентів в силовій передачі;

M – загальна маса транспортного засобу

f_r – коефіцієнт опору коченню електробуса.

Енергія на особисті потреби $E_{о.п.}$ – це енергія, що необхідна для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря та інших пристроїв. Її значення залежить від температури навколишнього середовища і габаритів електробуса, рис. 6.6.

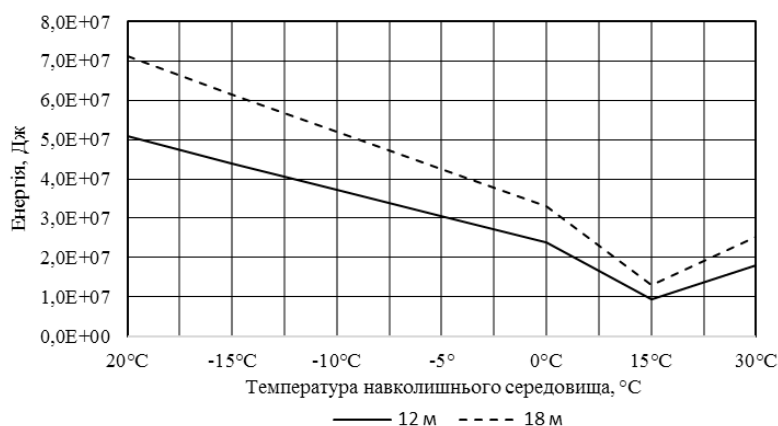


Рисунок 6.6 – Енергія на особисті потреби $E_{о.п.}$ в залежності від температури навколишнього середовища для електробусів 12 м і 18 м

Енергія отримана від особистих джерел електробуса $E_{особ.}$ складається з енергії рекуперації $E_{рек.}$, енергії, що генерують сходинок $E_{сх.}$ і енергії, що надходить від сонячних панелей розташованих на даху $E_{с.п.д.}$:

$$\sum_{j=1}^n E_{особ.дж.} = E_{рек.} + E_{сх.} + E_{с.п.д.} \quad (6.5)$$

Енергія рекуперативного гальмування (Дж) знаходиться за виразом:

$$E_{рек} = 3,6 \cdot 10^3 \int_{рек} \frac{\alpha V}{\eta_T \eta_D} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt, \quad (6.6)$$

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

α – коефіцієнт рекуперативного гальмування – це процентна частка від загальної енергії гальмування, яка може бути використана ЕД ($0 < \alpha < 1$).

Величина енергії, що генерують сходинок залежить від їх кількості і від кількості пасажирів, які будуть заходити в електробус і виходити з нього, тобто від загальної кількості натискань на сходинок $K_{\text{нат.сх}}$ електробуса.

При використанні у якості сходинок енергогенеруючої платформи з триступеневим мультиплікатором і двома кроковими двигунами отримаємо вираз для визначення енергії, що будуть генерувати сходинок встановлені на електробусі, Дж:

$$E_{\text{сх}} = 4,16 \cdot 10^3 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} \quad (6.7)$$

Кількість енергії, що надходить від сонячних панелей розташованих на даху електробуса $E_{\text{с.п.д.}}$ залежить від типу СП, тобто її номінальної потужності і від кількості панелей.

Отримаємо рівняння для визначення енергії, яку генерують СП на даху електробуса, Дж:

$$E_{\text{с.п.д.}} = \frac{3600 \cdot a \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{втр}}}{1000}, \quad (6.8)$$

де a – кількість СП, що знаходяться на даху електробуса;

J – кількість сонячної енергії, що падає на дах електробуса, кВт·год/м² (таблична величина);

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

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність однієї сонячної панелі, Вт;

$K_{\text{втр}}$ – коефіцієнт, який враховує, скільки ЕЕ втрачається у всій системі автономного електропостачання (втрати в проводах, в інверторі, втрати пов'язані з ростом температури модуля, втрати в процесі роботи СП в період низького рівня сонячного випромінювання, втрати пов'язані з затінюванням і

забрудненням СП, втрати шунтуючих діодів).

Врахувавши всі особисті джерела енергії електробуса, отримає загальну формулу для її розрахунку:

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

$$= 3,6 \cdot 10^3 \left[\int_{\text{рек.}} \left(\frac{\alpha V}{\eta_{\text{T}} \eta_{\text{Д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \right) + \right. \quad (6.9)$$

$$\left. + \left(1,16 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх.}_y} \right) + 10^{-3} S \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном.}} \cdot K_{\text{втр}} \right]$$

Другою складовою енергії, що отримує електробус є енергія, яка надходить під час його зарядки або підзарядки на зупинках. Але це енергія не мережева, а та, яку генерують зовнішні альтернативні системи, тобто енергія від сонячних панелей розташованих на даху зарядної станції $E_{\text{с.п.}}$, від лежачих поліцейських, які встановлені на маршруті $E_{\text{леж.пол.}}$, від енергогенеруючого дорожнього покриття $E_{\text{дор.}}$ і енергогенеруючих платформ, розташованих на зупинках $E_{\text{платф.}}$. Вся ця генерована енергія зберігається в накопичувачах на зарядних станціях і при зарядці електробуса використовується в першу чергу. Напишемо загальну формулу для її знаходження:

$$\sum_{k=1}^m E_{\text{зовн.}} = E_{\text{леж.пол.}} + E_{\text{платф.}} + E_{\text{дор.}} + E_{\text{с.п.}} \quad (6.10)$$

Розпишемо по окремоті кожен зі складових виразу (6.10).

Енергія, що генерує лежачий поліцейський розраховується за виразом:

$$E_{\text{леж.пол.}} = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot K_{\text{л.п.}} \cdot \sum_{c=1} \frac{m_c \cdot g \cdot h}{60}, \quad (6.11)$$

де c – кількість транспортних засобів, що перетнуть пристрій;

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

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

h – висота лежачого поліцейського, м;

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

Спростивши вираз (6.11) отримаємо кінцеве рівняння для розрахунку енергії, що генерує лежачий поліцейський, Дж:

$$E_{\text{леж.пол.}} = 0,576 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot K_{л.п} \cdot h \sum_{c=1}^z m_c. \quad (6.12)$$

Для розрахунку енергії, що генерують енергогенеруючі платформи з триступневим мультиплікатором і двома кроковими двигунами, які розташовані на зупинках $E_{\text{платф.}}$ отримаємо вираз:

$$E_{\text{платф}} = 4,16 \cdot 10^3 \cdot \sum_{q=1} K_{\text{нат.пл}_q}, \quad (6.13)$$

де $K_{\text{нат.пл}_q}$ – кількість натискань на q -ту платформу на маршруті електробуса;

q – кількість енергогенеруючих платформ на маршруті.

У відповідності до п.п. 3.3.2, визначено, що 1 м^2 енергогенеруючого дорожнього покриття за вирахуванням енергії потрібної для самообслуговування (обігрів панелей, освітлення, живлення систем керування тощо), дорожнє покриття може віддати для зарядки електробуса $126,7 \cdot 10^3$ Дж. З урахуванням цього отримаємо вираз для розрахунку енергії, що генерує дорожнє покриття на маршруті електробуса:

$$E_{\text{дор.}} = 126,7 \cdot 10^3 \cdot S, \quad (6.14)$$

де S – площа енергогенеруючого дорожнього покриття на маршруті електробуса.

Кількість енергії, що надходить від сонячних панелей розташованих на даху зарядних станцій $E_{с.п.}$ залежить від типу СП, тобто її номінальної потужності $P_{\text{ном.з.с.}}$ і від кількості панелей і розраховується за аналогією виразу (6.8):

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

Враховуючи всі складові отримаємо баланс енергії в електробусі (6.15) з якого знайдемо кількість енергії необхідної для електробуса від мережі живлення (6.17):

$$E_{\text{Т}} + E_{\text{о.п.}} = E_{\text{мер}} + \sum_{j=1}^n E_{\text{особ.дж.}} + \sum_{k=1}^m E_{\text{зовн.дж.}} \quad (6.15)$$

$$E_{\text{мер}} = (E_{\text{Т}} + E_{\text{о.п.}}) - \left(\sum_{j=1}^n E_{\text{особ.дж.}} + \sum_{k=1}^m E_{\text{зовн.дж.}} \right) \quad (6.16)$$

$$E_{\text{мер}} = (E_{\text{Т}} + E_{\text{о.п.}}) - (E_{\text{рек.}} + E_{\text{сх.}} + E_{\text{с.п.д.}} + E_{\text{леж.пол.}} + E_{\text{платф.}} + E_{\text{дор.}} + E_{\text{с.п.}}) \quad (6.17)$$

Підставимо у рівняння (6.17) формули отримані раніше і знайдемо вираз для розрахунку енергії для зарядки електробуса від мережі живлення:

$$\begin{aligned} E_{\text{мер}} = & (3,6 \cdot 10^3 \left(\int_{\text{тяги}} \frac{V}{\eta_{\text{Т}} \eta_{\text{Д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \right) + E_{\text{о.п.}}) - \\ & - (3,6 \cdot 10^3 \left(\int_{\text{рек}} \frac{\alpha V}{\eta_{\text{Т}} \eta_{\text{Д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) dt \right) + 4,16 \cdot 10^3 \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} + \\ & + 3,6 \cdot 10^3 \left(\int_{\text{рек}} \left(\frac{\alpha V}{\eta_{\text{Т}} \eta_{\text{Д}}} (Mg(f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt}) \right) dt + \right. \\ & \left. + \left(1,16 \cdot \sum_{y=1} K_{\text{нат.сх}_y} \right) + 10^{-3} S \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{втр}} \right) + \\ & + 1,15 \cdot 10^3 \cdot K_{\text{л.п}} \cdot h \sum_{c=1}^z m_c + 4,16 \cdot 10^3 \cdot \sum_{q=1} K_{\text{нат.пл}_q} + 126,7 \cdot 10^3 \cdot S + \\ & + 3,6 \cdot a \cdot J \cdot K_0 \cdot P_{\text{ном.з.с}} \cdot K_{\text{втр.з.с}} \end{aligned} \quad (6.18)$$

Отриманий вираз враховує всю енергію вироблену АСТЕЕ, які знаходяться в електробусі і які розташовані зовні на маршруті.

Висновки за розділом 6

1. 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.

2. Розроблено рекомендації щодо проектування і вибору тягового ЕД для підвищення технічного стану та експлуатаційних властивостей міського пасажирського транспорту. Розроблені рекомендації і отримані критерії призначені для впровадження в серійне виробництво тягових ЕД. Вони дозволяють:

- проектувати асинхронні тягові двигуни на задані рівні вібрації, що веде до підвищення надійності експлуатації та ресурсу;
- здійснювати контроль якості виготовлення на стадії виробництва;
- контролювати технічний стан електродвигунів по перевищенню їх рівнів вібрації при експлуатації, тобто перехід в інший клас технічного стану.

3. Розроблено рекомендації щодо забезпечення нормативних значень рівня надійності тягових електродвигунів з використанням частотних вібраційних діагностичних ознак дефектів, видів контрольованих дефектів і методів їх усунення, а також граничних значень діапазонів класів вібрації електродвигунів.

4. Встановлено, що загальні витрати на прокладання тролейбусного маршруту більші за електробусний в 2,65 рази.

5. Визначено баланс енергії для міського електробуса, що 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.

Основні результати дослідження по даному розділу опубліковані в роботах [1, 12, 16–19, 36].

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 триступневим 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 м², 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, 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О. В., та ін. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.
2. Аргун Щ. В. Ретроспектива розвитку объединенной энергетической системы Украины. *Вісник ХНАДУ*. 2014. № 67. С. 134–137.
3. Аргун Щ. 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 Щ. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*. 2018. № 43. С. 36–46.
6. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Дзюбенко О. А. Вибір схеми технічного рішення енергогенеруючої сходинки. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 81. С. 29–38.
11. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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 І. 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 І. В. Алгоритм підготовки транспортної інфраструктури до масштабного використання автодорожнього електротранспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2016. Вип. 10. С. 12–18.

17. Аргун І. В. Електробуси – перспективний міський транспорт Харкова. *Автомобільний транспорт*. 2019. № 44. С. 59–65.

18. Аргун І. В. Визначення найбільш ефективних тягових джерел струму для електромобілів. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 41. С. 11–22.

19. Dvadenko 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 І. 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.

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. Енергогенеруюча 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 X 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. Wlajlawek, 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)

41. Спосіб роботи електробуса на суперконденсаторах з над швидкою зарядкою для міських перевезень: пат. 114643 Україна : В60L11/00, В60L9/00. Гнатов 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 : Н02К 7/00, Н02К 7/12, Н02К 35/00, Н02К 35/02, Н02N 2/18, Н01L 41/04. Гнатов А. В., Аргун Щ. В.; заявл. 02.06.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

43. Канило П. М., Костенко К. В. Перспективы становления водородной энергетики и транспорта. *Автомобільний транспорт*. 2008. Вип. 23. С. 1–6.

44. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Ульянець О. А. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 11. С. 24–28.

45. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Аналіз схем сонячних електростанцій на фотоелектричних модулях для зарядних станцій електромобілів. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 41. С. 163–169.

46. Єрохов В. Ю. Альтернативна енергетика з використанням сонячних елементів : навч. вид. Нац. ун-т «Львів. Політехніка». Львів : Сполом, 2015. 116 с.

47. Тарасова В. В., Разживин В. П., Тельный А. С., та ін. Анализ перспектив развития нетрадиционных источников энергии и оценка возможностей их использования. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 50–56.

48. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Ульянець, О. А. Властивості та способи застосування п'єзоелектричних елементів як генераторів електроенергії. *Автомобільний транспорт*. 2017. № 41. С. 178–187.

49. Gnatov A., Argun S., Ulyanets, O. Joint innovative double degree master program “energy-saving technologies in transport”: *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, Ukraine , 29 June.17. С. 1203–1207.

50. Гнатов А. В., Аргун Щ. В. Ретроспектива основних етапів розвитку електромобілів. Частина 2. *Вісник ХНАДУ*. 2017. № 78. С. 116–124.

51. Этапы развития электромобилей и их конструкции. веб-сайт. URL: <http://www.electro-machines.ru/content/etapy-razvitiya-elektromobilei> (дата звернення: 22.02.18).

52. How many cars are there in the world? - DriveSurfing. веб-сайт. URL: <https://www.drivesurfing.com/en/article/7/how-many-cars-are-there-in-the-world> (дата звернення: 16.02.18).

53. Vynakov O. F., Savolova E. V., Skrynnyk A. I. Modern electric cars of Tesla Motors company. Automation of technological and business-processes. 2016. № 8. С. 9–18.

54. Селиванов С. Е., Филенко В. В., Бажинов А. В., та ін. Электромагнитные загрязнения биосферы автотранспортом (автомобили, электромобили, гибридные автомобили). *Автомобільний транспорт*. 2009. № 25. С. 24–32.

55. nanoFlowcell -Home. веб-сайт. URL: <https://www.nanoflowcell.com/nanoFlowcell>, (дата звернення: 08.09.18).

56. Электромобиль – Википедия. веб-сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Электромобиль> (дата звернення: 21.02.18).

57. Бахмутов С. В., Карпухин К. Е. «Чистые» автомобили; направления реализации и достигаемые результаты. *Журнал автомобильных инженеров*. 2012. Вип. 6. С. 51–54.

58. ЄС хоче заборонити використання бензинових двигунів в 2050 році. URL: <https://www.newsmarket.com.ua/2011/03/yes-hoche-zaboroniti-vikoristannya-benzinovich-dviguniv-v-2050-rotsi/> (дата звернення: 22.02.18).

59. Electric vehicles: India aiming for all-electric car fleet by 2030, petrol and diesel to be tanked - Times of India. веб-сайт. URL: <https://timesofindia.indiatimes.com/auto/miscellaneous/india-aiming-for-all-electric-car-fleet-by-2030-petrol-and-diesel-to-be-tanked/articleshow/58441171.cms>, (дата звернення: 22.02.18).

60. Christoff P. The promissory note: COP 21 and the Paris Climate Agreement. *Environmental Politics*. 2016. Вип. 25, № 5. С. 765–787.

61. Chrisafis A., Vaughan A. France to ban sales of petrol and diesel cars by 2040. веб-сайт. URL: <http://www.theguardian.com/business/2017/jul/06/france-ban-petrol-diesel-cars-2040-emmanuel-macron-volvo> the Guardian, (дата звернення: 22.02.18).

62. Electric Vehicle Outlook 2017 "Bloomberg New Energy Finance" Bloomberg Finance LP. веб-сайт. URL: [https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/Bloomberg New Energy Finance](https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/Bloomberg%20New%20Energy%20Finance), (дата звернення: 22.02.18).

63. В Україну рвуться виробники електрокарів. веб-сайт. URL: <http://autokiev.info/2018/02/v-ukrayinu-rvutsya-virobniki-elektrokariv/> AutoKiev.Info, (дата звернення: 22.02.18).

64. Аргун Щ. В. Алгоритм підготовки транспортної інфраструктури до масштабного використання автодорожнього електротранспорту. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2016. Вип. 10. 12–18.

65. Капітальний ремонт доріг в Україні: чи є досягнення та в чому головна небезпека. веб-сайт. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2017/10/31/pogljad/suspilstvo/kapitalnyj-remont-dorih-ukrayini-chy-ye-dosyahnennya-ta-chomu-holovna-nebezpeka> Слово і Діло, (дата звернення: 12.03.18).

66. Проект «Міський громадський транспорт в Україні». веб-сайт. URL: <http://mtu.gov.ua/news/27947.html> Міністерство інфраструктури України, (дата звернення: 13.12.18).

67. Сколько будет электробусов через 7 лет – смелые прогнозы - News.ua. веб-сайт. URL: <http://news.ua/auto/skolko-budet-elektrobusov-cherez-7-let-smelye-prognozy/> (дата звернення: 14.12.18).

68. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. веб-сайт. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/430-2018-%D1%80> Законодавство України, (дата звернення: 13.12.18).

69. Харьков транспортный. Троллейбус. Общие сведения. веб-сайт. URL: <http://gortransport.kharkov.ua/trol/index.html> (дата звернення: 22.09.18).

70. Комаров, Ю. Я., Метлев, В. С., Дятлов, М. Н., та ін. Особенности отбора, обучения и повышения квалификации водителей троллейбуса. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2018. № 11–1.

71. АТ “Харківобленерго” інформує про введення роздрібних тарифів на електроенергію на 3 квартал 2018 року. Акціонерне товариство “Харківобленерго.” веб-сайт. URL: <https://www.oblenergo.kharkov.ua/>

consumers/tarifs/harkivoblenergo-informuye-pro-vvedennya-rozdribnyh-taryfiv-na-elektroenergiyu-na-3 (дата звернення: 04.01.19).

72. Hu X., Murgovski N., Johannesson L., та ін. Energy efficiency analysis of a series plug-in hybrid electric bus with different energy management strategies and battery sizes. *Applied Energy*. 2013. Вип. 111. С. 1001–1009.

73. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Підгора О. В. Електробус на суперконденсаторах – енергоефективний та екологічно чистий вид міського громадського транспорту. *Всеукраїнський конкурс наукових робіт з галузі «Енергетика»*, 2018. 32 с.

74. Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Ульянець О. А. Екологічний та енергоефективний автомобільний транспорт та його інфраструктура. *Вісник ЖДТУ*. 2016. Вип. 2, № 77. С. 18–26.

75. Patłins A., Hnatov A., Arhun S. Using of Green Energy from Sustainable Pavement Plates for Lighting Bikeways: *Transport Means 2018: Proceedings of 22nd International Scientific Conference*, Lithuania, Trakai, Kaunas University of Technology, 03.October.18. С. 574–579.

76. Флоренцев С. Н., Макаров Л. Н. Городской маршрутный автобус ЛИАЗ 5292ХХ с комбинированной энергоустановкой. Общие характеристики. *Электротехника*. 2009. № 7. С. 20–26.

77. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монографія: Харків: ХНАДУ, 2011. 292 с.

78. ДДСТУ ISO 9000:2007. Системи управління якістю основні положення та словник термінів [Чинний від 2008-01-01]. Київ, 2007.

79. Заруденко В. І. Розробка електробуса та його системи живлення шляхом модернізації тролейбуса "Богдан". *Презентація*. 2018. 16 с.

80. Мельник О. О., Пересада С. М. До визначення потужності тягового асинхронного електропривода міського електробуса. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. 2016. С. 259–263.

81. Standards European. UNE EN 60034-14:2004/A1:2007 Rotating electrical machines - Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher - Measurement, evaluation and limits of vibration severity (IEC 60034-14:2003/A1:2007). 2007.

82. Cavallini A., Montanari G. C., Tozzi M. Electrical aging of inverter-fed wire-wound induction motors: from quality control to end of life: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Diego, CA, USA, 06 June.10. С. 1–4.

83. Тонких В. Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Барнаул. 2009. 181 с.

84. Грабко В. В., Грабко В. В. Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету. *Научные труды Винницкого национального технического университета*. 2008. № 1. С. 1–5.

85. Петухов В. С., Соколов В. А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. *Новости электротехники*. 2005. № 1. С. 31.

86. Вовк О. Ю., Вовк А. Ю., Безменнікова Л. М., та ін. Метод періодичного діагностування асинхронних двигунів. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2010. Вип. 10. Т. 4. С. 39–46.

87. Шефер О. В., Галай В. М., Крицький В. В. Діагностування електродвигунів складних електромеханічних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 2. С. 56–60.

88. Wang J., Wang P., Wang W., та ін. Novel repetitive square wave voltage generator used for the insulation evaluation of rotating machines driven by power electronics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Вип. 24, № 4. С. 2041–2049.

89. Войтенко В. А., Водічев В. А. Оптимізація параметрів конденсаторної батареї автономного джерела живлення електропривода електромобіля.

Електромеханічні і енергозберігаючі системи. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика». 2012. Вип 3, №19. С. 1–3.

90. Войтенко В. А., Семенов К. И., Матковский М. В. Системы накопления энергии в электрическом транспорте. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2019. № 30 (106). С. 63–74.

91. Войтків С. В. Шляхи покращення економічних показників перспективних міських електробусів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2018. Вип. 14. С. 12-20.

92. Скрипко Л. А. Электробус на городском маршруте. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2012. № 2. С. 33–35.

93. Исупов А. А., Якубович С. П., Кункевич А. И. Современные тенденции развития перевозок пассажиров: от автобуса, троллейбуса и трамвая - к электробусу: материалы IV Международной заочной научно-практической конференции. *Перспективы развития транспортного комплекса*, 02-04 октября, Минск, 2018, 2018. С. 4–15.

94. Толстокорова Ю. К. Організація транспортної інфраструктури України на прикладі дизайну зарядних станцій для електромобілів: аналоги, впровадження та перспективи: *Всеукраїнська наукова конференція професорсько-викладацького складу і студентів ХДАДМ*, Харків, Україна, ХДАДМ, 17. С. 263–266.

95. Затилюк Д. О. Модуль керування автоматизованої зарядної станції електромобіля: *дипл. проект КПІ ім. Ігоря Сікорського*. 65 с.

96. Будькл В. І. Розроблення математичної моделі роботи автономної зарядної станції електромобілів від вітроелектричних установок. *Відновлювальна енергетика*. 2017. № 3 (50). С. 6–13.

97. Петраковский Л. Зрядные станции для электромобилей. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2013. № 8. С. 78–80.

98. Голубчик Т. В. Определение характеристик зарядных станций для электротранспорта. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. С. 86–86.

99. Чусов А. Н. Строительство зарядных станций для электромобилей на территории Санкт-Петербурга: *магистерская: Санкт-Петербург, Россия, Инженерно-строительный институт*. 56 с.

100. Zheng Y., Dong Z. Y., Xu Y., та ін. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013. Вип. 29, № 1. С. 221–229.

101. Стадник Л. Д., Колесніков В. О. Сонячні батареї, як допоміжне обладнання для електромобілів: *Матеріали VI міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, Вінниця, Україна, ВНТУ, 13.04.18. С. 198–202.

102. Смирнов О. П. Концептуальні рішення створення екологічно чистих автотранспортних засобів з електроприводом. *Вісник ХНАДУ*. 2011. № 55. С. 52–57.

103. Басараб А. І. Сонячні зарядні станції для електромобілів. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*. 2017. С. 573–574.

104. Jaffery S. H. I., Khan M., Ali L., та ін. The potential of solar powered transportation and the case for solar powered railway in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Вип. 39. С. 270–276.

105. Вертикальна осьова вітроелектрична установка для транспортної електричної мережі: пат. UA 91539 U Вінниця. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Горенюк В. В.; опубл. 10.07.2014.

106. Будько В. І. Особливості зарядження акумуляторної батареї електромобіля від стаціонарної вітроелектричної станції. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 2. С. 16–19.

107. Fairley P. Speed bumps ahead for electric-vehicle charging. *IEEE spectrum*. 2010. Вип. 47, № 1. С. 13–14.

108. Ramadan M., Khaled M., Hage H. E. Using Speed Bump for Power Generation –Experimental Study. *Energy Procedia*. 2015. Вип. 75. С. 867–872.

109. Chen N., Jung H. J., Jabbar H., та ін. A piezoelectric impact-induced vibration cantilever energy harvester from speed bump with a low-power power management circuit. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2017. Вип. 254. С. 134–144.

110. Ehsani M., Gao Y., Longo S., та ін. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: *CRC press, Taylor & Francis Group*, 2018. 58 с.

111. Хрипач Н. А., Шустров Ф. А., Петриченко Д. А. Анализ эффективности энергопотребления безрельсового пассажирского транспорта на базе тягового электропривода. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 6. С. 79–79.

112. Soren H. J., Claus N. R., Guangya Y. WP 1.5 Battery Modeling. веб-сайт. URL: <https://studylib.net/doc/18516383/wp-1.5-battery-modelingStudyLib>, (дата звернення: 13.08.19).

113. Сорокин, А. Суперконденсаторы. веб-сайт. URL: <http://www.electrosad.ru/Electronics/SuperCon.htm>electrosad.ru.

114. Гелевые аккумуляторы, мультигелевые и AGM – в чем разница? веб-сайт. URL: <https://lantorg.com/article/akkumulyatory-gelevye-multigelevye-i-agm-v-chem-raznitsa> (дата звернення: 09.04.19).

115. Rafik F., Gualous H., Gallay R., та ін. Contribution to the sizing of supercapacitors and their applications: *First European symposium on supercapacitors and applications*, 2004. 80 с.

116. Barker P. P. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, 21-25 July 2002, Chicago, IL, USA, 2002. P. 316–320.

117. Barrade P., Rufer A. Current capability and power density of supercapacitors: considerations on energy efficiency: *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2003. С. 1–10.

118. Kim Y. Ultracapacitor technology powers electronic circuits. *Power Electronics Technology*. 2003. Вип. 29, № 10. С. 34–39.

119. Barrade P. Energy storage and applications with supercapacitors. *JOUR*. 2003. № 1. P. 1-10.

120. Cultura A. B., Salameh Z. M. Performance evaluation of a supercapacitor module for energy storage applications: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 20-24 July 2008, Pittsburgh, PA, USA, 2008. С. 1932-5517.

121. Rufer A., Barrade P., Hotellier D. Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy-storage substation in DC-transportation networks. *EPE Journal*. 2004. Вып. 14, № 4. С. 43–49.

122. Тарасова В. В., Суховій С. А., Гнатов А. В., та ін. Використання асинхронного двигуна, як об'єкта автоматичного керування. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вып. 12. С. 171–179.

123. Merwerth J. The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8 challenges with electric traction drives for vehicles. *BMW Group: Workshop University Lund: Lund*, 14 p.

124. Мигаль В. Д., Двадненко В. Я. Выбор электродвигателей для электромобилей и гибридных автомобилей. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 75. С. 116–119.

125. Novotny D. W., Lipo T. A. Vector control and dynamics of AC drives: *Oxford university press*, 1996. 440 p.

126. Zhang D., Huang T. Asynchronous Motor Parameter Identification Based on Vector Control. *Advances in Engineering Research*, Vol. 139. 2018. P. 156-160.

127. Kusko A., Galler D. Control means for minimization of losses in ac and dc motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1983. № 4. С. 561–570.

128. Изосимов Д., Гнездов Н., Журавлев С. Проектирование асинхронных тяговых электродвигателей и синтез векторного управления тяговыми приводами. *Электронные компоненты*. 2010. № 11. С. 17–22.

129. Lajunen A. Powertrain design alternatives for electric city bus: *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, 2012. С. 1112–1117.

130. Bartłomiejczyk M., Hrbáč R., Stýskala V., та ін. Trolleybus with traction batteries for autonomous running. *Technical University of Košice*. 2013. С. 204–206.

131. Teoh L. E., Khoo H. L., Goh S. Y., та ін. Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2018. Вип. 7, № 1. С. 10–25.

132. Hnatov A., Arhun S., Tarasov K., та ін. Researching the Model of Electric Propulsion system for bus with the Matlab Simulink: *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 07 October 2019. С. 1–6.

133. Аргун І. В., Голіков О. Д. Вітрогенераторна установка, як додаткове джерело електричної енергії для електромобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 6–11.

134. Гнатов А. В., Аргун І. В., Череватий В. О., та ін. Сонячна енергія – основні види та типи сонячних електростанцій. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2017. Вип. 12. С. 12–21.

135. Pihlatie M., Paakkinen M., Anttila A. Electric buses and recharging systems Santiago de Chile: *International Conference Electric Mobility and Public Transport*, 10.May 2017, Santiago de Chile. 2017. С. 1–25.

136. Charging solutions for electric bus fleets. веб-сайт. URL: https://www.mobilityhouse.com/int_en/solutions/solutions-for-electric-bus-fleetsThe Mobility House, (дата звернення: 16.04.19).

137. Pavegen: Using the Pavement to Generate Energy. веб-сайт. URL: <https://aurapeyzaj.wordpress.com/2014/08/20/pavegen-using-the-pavement-to-generate-energy/>Aura Peyzaj Mimarlık | Izmir Turkey, (дата звернення: 18.02.18).

138. Li X., Strezov V. Modelling piezoelectric energy harvesting potential in an educational building. *Energy Conversion and Management*. 2014. Вип. 85. С. 435–442.

139. Сбор энергии с дорог и взлетно-посадочных полос RU Patent 2482568. Абрамович Х., Хараш Е., Милгром Ч., та ін.; опубл. 2013.

140. Пьезоэлектрический генератор постоянного тока на основе эффекта казимира RU Patent 2499350: пат. 2499350 Ской, В. Р.; опубл. 2013.

141. Cafiso S., Cuomo M., Di Graziano A., та ін. Experimental Analysis for Piezoelectric Transducers Applications into Roads Pavements. *Advanced Materials Research*. 2013. Вип. 684. С. 253–257.

142. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Дзюбенко О. А. Вибір схеми технічного рішення енергогенеруючої сходинки. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 81. С. 29–38.

143. Solar Roadways. веб-сайт. URL: <http://www.solarroadways.com> (дата звернення: 17.03.18).

144. Solar roadway panel US Patent D712,822 S: пат. D712,822 S Brusaw S., Brusaw J.; опубл. 2014.

145. Bhatnagar S. R. Converting sound energy to electric energy. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012. Вип. 2, № 10. С. 267–270.

146. Xue X., Wang S., Guo W., та ін. Hybridizing Energy Conversion and Storage in a Mechanical-to-Electrochemical Process for Self-Charging Power Cell. *Nano Letters*. 2012. Вип. 12, № 9. С. 5048–5054.

147. Пристрій для генерування електричної енергії та примусового зниження швидкості з мультиплікатором: пат. 129621 Гнатов А. В., Аргун Щ. В.; опубл. 12.11.2018.

148. Glow in the dark road unveiled in the Netherlands. веб-сайт. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-27021291> (дата звернення: 22.06.19).

149. PlasticRoad - A revolution in building roads. веб-сайт. URL: <https://www.plasticroad.eu/en/PlasticRoad>, (дата звернення: 21.07.19).

150. Solar Roadways. веб-сайт. URL: <http://www.solarroadways.com/> (дата звернення: 17.03.18).

151. Багатофункціональні панелі дорожнього покриття: пат. 110807 Україна : E01C5/00, E01C17/00. № у 2016 03332. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова Г. А., та ін.; опубл. 25.10.2016.

152. Автоматична дорожня розмітка для керування рухом транспортних засобів: пат. 110808 Україна : E01C5/00, E01C17/00. № у 2016 03334. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова, Г. А., та ін.; опубл. 25.10.2016.

153. Bhol R., Dash R., Pradhan A., та ін. Environmental effect assessment on performance of solar PV panel: *2015 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, IEEE*, 19-20 March 2015, Nagercoil, India. 2015. С. 1–5.

154. Luboń W., Pełka G., Marszałek K., та ін. Performance analysis of crystalline silicon and CIGS photovoltaic modules in outdoor measurement. *Ecological Chemistry and Engineering S.* 2017. Вип. 24, № 4. С. 539–549.

155. Brito M. A. G. de, Alves M. G., Canesin C. A. Hybrid MPPT Solution for Double-Stage Photovoltaic Inverter. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems.* 2019. Вип. 30, № 2. С. 253–265.

156. Designing a High-Efficiency Solar Power. DigiKey. веб-сайт. URL: <https://www.digikey.com.au/en/articles/techzone/2011/oct/designing-a-high-efficiency-solar-power-battery-charger> (дата звернення: 22.06.19).

157. Features – SolarRoadways. веб-сайт. URL: <http://www.solarroadways.com/Product/Features> (дата звернення: 22.06.19).

158. Пристрій генерування електричної енергії: пат. 106587 Україна, № u 2015 11852, Гнатів А. В., Аргун І. В., Гнатова Г. А.; опубл. 25.04.2016.

159. Спосіб генерування електричної енергії: пат. 106588 Україна, № u 2015 11853 Гнатів А. В., Аргун І. В., Гнатова Г. А.; опубл. 25.04.2016.

160. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле: *Учеб. для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов: Высшая школа*, 1986. 263 с.

161. Patłins A., Hnatov A., Arhun S., та ін. Development of an Energy Generating Platform for Converting Kinetic Energy into Electrical Energy Using the Kinematic Synthesis of a Three-Stage Multiplier: *Transport Means 2019*, Palanga, Lithuania, *Kaunas University of Technology*, 4 oktobris. 2019. С. 403–408.

162. Миличко В. А., Шалин А. С., Мухин И. С., та ін. Солнечная фотovoltaика: современное состояние и тенденции развития. *Успехи физических наук.* 2016. Вип. 186, № 8. С. 801–852.

163. Ахмедов Р. Б. Гелиоэнергетика. Солнечные электрические станции: *Москва: ВИНТИ*, 1986. 120 с.

164. Martí A., Luque A. Next generation photovoltaics: High efficiency through full spectrum utilization: *CRC Press*, 2003. 136 p.

165. Абрамова О. Види та типи: схеми сонячних електростанцій – Укр Енерго. веб-сайт. URL: <https://ukrenerho.com/vidi-ta-tipi-shemi-sonyachnih-elektrostantsij> (дата звернення: 11.08.19).

166. Chapin D. M., Fuller C. S., Pearson G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. *Journal of Applied Physics*. 1954. Вип. 25, № 5. С. 676–677.

167. Ginley D. S., Cahen D. Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability: *Cambridge university press*, 2011. 726 p.

168. Раушенбах Г. П. Справочник по проектированию солнечных батарей. *М.: Энергоатомиздат*. 1983. 357с.

169. Wei C.-Y., Lin C.-H., Hsiao H.-T., та ін. Efficiency improvement of HIT solar cells on p-type Si wafers. *Materials*. 2013. Вип. 6, № 11. С. 5440–5446.

170. Green M. Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion. *Physics Today*. 2004. Вип. 57. С. 71–72.

171. Шидловский С. В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно перестраиваемых систем. *Известия Томского политехнического университета*. 2006. № 8. С. 19–23.

172. Hnatov A., Arhun S., Dziubenko, O. Визначення оптимальних параметрів навантаження для ефективної роботи кремнієвих сонячних батарей. *Вісник ХНАДУ*. 2018. № 80. С. 53.

173. Герасимюк О. Типи сонячних батарей та їх ККД - Альтернативная энергетика – статьи и новости в мире и в Украине. веб-сайт. URL: <https://alternative-energy.com.ua/типи-сонячних-батарей-та-їх-ккд/Енергія природи>, (дата звернення: 11.08.19).

174. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения: *Наука, Ленингр. отд-ние*, 1989. 310 с.

175. Hamakawa Y. Thin-film solar cells: next generation photovoltaics and its applications: *Springer Science & Business Media*, 2003. 244 с.

176. Nakhodov V., Baskys A., Skeie N.-O., та ін. Selection methodology of energy consumption model based on Data Envelopment Analysis. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2016. Вип. 11, № 1. С. 5–12.

177. Racz E., Horompoli B., Varga A. Experimental investigation based on analysis of electric current-voltage characteristics on Pasaan-flasher flashlight irradiated photovoltaic cells aged by various processes. *Elektroenergetika*. 2017. 718 p.

178. Kunith A., Mendelevitch R., Goehlich D. Electrification of a city bus network – An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2017. Вип. 11, № 10. С. 707–720.

179. Kunith A., Goehlich D., Mendelevitch R. Planning and optimization of a fast charging infrastructure for electric urban bus systems: *Proceedings of the 2nd International Conference on Traffic and Transport Engineering*, 2014. С. 43–51.

180. Полковниченко Д. В. Послеремонтная оценка технического состояния короткозамкнутых асинхронных электродвигателей. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2005. Вип. 1. С. 59–62.

181. Худоногов А. М., Лыткина Е. М., Дульский Е. Ю. Инновационная технология повышения надежности и продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2012. № 4 (36). С. 102-108.

182. Сидельников Л. Г., Афанасьев Д. О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации. *Вестник ПНИПУ. Геология, нефтегазовое и горное дело*. 2013. Вип. 7. С. 127–137.

183. ДСТУ EN 60034-14:2016. Машини електричні обертові. Частина 14. Механічні вібрації деяких механізмів із висотою вала 56 мм і вище.

Вимірювання, оцінювання та допустимі рівні вібрації. [Чинний від 2017-11-01]. Київ, 2016.

184. ГОСТ ІЕС 60034-14-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций. 2015.

185. Willwerth A., Roman M. Electrical bearing damage – a lurking problem in inverter-driven traction motors: *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), IEEE, 16-19 June 2013, Detroit, USA, 2013*. С. 1–4.

186. ІЕС 60034-18-41:2014 Machines-Part R. E. Rotating electrical machines - Part 18-41: Qualification and Type Tests for Type I-Electrical Insulation Systems Used in Rotating Electrical Machines Fed from Voltage Converters. ІЕС TS. 2014.

187. Kaufhold M., Borner G., Eberhardt M., та ін. Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters. *IEEE Electrical insulation magazine*. 1996. Вип. 12, № 5. С. 9–16.

188. Model-based fault detection system for electric motors: пат. US6014598A Duyar A., Albas E., Durakbasa O. T., та ін.; опубл. 11.01.2000.

189. Большунова О. М., Большунова А. В., Камышьян А. М. Диагностика технического состояния тяговых асинхронных двигателей карьерного автосамосвала с применением вейвлет-анализа. *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. Вип. 3, № 1. С. 49–52.

190. Мигаль В. Д. Вибрационные методы оценки качества тракторов на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации: д.т.н.: Харьков, ХНАДУ. 513 с.

191. Migal V., Arhun Shch., Hnatov A., та ін. Substantiating the Criteria For Assessing the Quality of Asynchronous Traction Electric Motors in Electric Vehicles and Hybrid Cars. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 2019. Вип. 10, № 36. С. 989–999.

192. Коробейников А. Б., Сарваров А. С. Анализ существующих методов диагностирования электродвигателей и перспективы их развития. *Электротехнические системы и комплексы*. 2015. № 1(26). С. 4–9.

193. Лукьянов С. И., Карандаев А. С., Евдокимов С. А., та ін. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова*. 2014. № 1(45). С. 129–136.

194. Барков А. В., Баркова Н. А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации. *Сборник трудов семинара «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок*. 1999. С. 115–156.

195. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2009. 544 с.

196. Matthew Roman. Bearing damage: A lurking problem in electric cars. веб-сайт. URL: <https://www.ecnmag.com/blog/2012/05/bearing-damage-lurking-problem-electric-cars> Electronic Component News, (дата звернення: 28.07.19).

197. Мигаль В. Д. Вибрация машин и ее диагностические признаки: Харьков: ХГПУ, 1997. 264 с.

198. Петрухин С., Петрухин В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации: *Litres*, 2017. 171 с.

199. Григоров И. П. Вибрация энергетических машин: Справ. пособие: *Ленинград*: 1974. 464 с.

200. Мигаль В. Д. Вибрационные методы и средства распознавания дефектов машин: *Харьков: ХГПУ*, 1996. 236 с.

201. ДСТУ ГОСТ ИСО 10816-1:2007. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. [Чинний від 2008-07-01]. Київ, 2007.

202. ДСТУ ГОСТ ИСО 7919-1:2009. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Общие требования. [Чинний від 2009-07-01]. Київ, 2009.

203. Айвозян С. А. Статистическое исследование зависимостей: Москва: *Металлургия*, 1968. 227 с.

204. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования: *Москва: Библиогр.*, 1996. 276 с.

205. Мигаль В. Д., Мищенко В. М., Волков В. П., та ін. Вибрация и надежность транспортных машин. *Монография: Харків: ХНАДУ*, 2007. 260 с.

206. Мигаль В. Д. Методы расчета возмущающих сил, частот и уровней вибрации, которые возбуждаются подшипниковыми узлами. *Национальный аэрокосмический университет ХАИ*. 2002. Вип. 29. С. 187–193.

207. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента: *Москва: Мир*, 1967. 406 с.

208. Каплан А. В., Каплан В. Е., Мащенко М. В., та ін. Решение экономических задач на компьютере: *Москва: ДМК Пресс*, 2008. 600 с.

209. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам: *Москва: Радио и связь*, 1985. 304 с.

210. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel: *Санкт-Петербург: Питер*, 2008. 608 с.

211. Гайдышев И. П. Моделирование стохастических и детерминированных систем: *Руководство пользователя программы AtteStat: Курган: 2015*. 484 с.

212. Лук'яненко І. Г., Краснікова Л. І. Економетрика: Підручник: *Київ: Товариство "Знання"*, 1998. 494 с.

213. Минашкин В. Г., Шмойлова Р. А., Садовникова Н. А., та ін. Теория статистики: Учебно-методический комплекс: *Москва: Изд. центр ЕАОИ*, 2008. 296 с.

214. Брюль & Кьер. Измерение и анализ механических колебаний: *Дания: Нэрум*, 2003. 40 с.

215. Спосіб перетворення сонячної та кінетичної енергії в електричну за допомогою дорожнього покриття: Пат. 110810 України, E01C5/00, E01C17/00, H01L31/00. № у 2016 03337. Гнатов А., Аргун Щ., Гнатова Г., та ін.; опубл. 25.10.2016.

216. Салтовка. веб-сайт. URL: <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=Салтовка&oldid=95763372> Википедия (дата звернення: 14.12.18).
217. Красовский А. А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления: Наука, 1968.
218. Александров Е. Е., Кузнецов, Б. И., Богаенко, И. Н., та ін. Многоканальные системы оптимального управления: Київ: 1995. 281 с.
219. Александров Е. Е. Синтез и разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами для самоходных гусеничных машин с бесступенчатыми трансмиссиями: д-ра техн. наук: Харків, ХПИ. 390 с.
220. Александров Е. Е., Самородов В. Б. Механические потери мощности в объемной гидромашине радиально-поршневого типа. *Теория механизмов и машин*. 1984. Вип. 6. С. 93–97.

Додаток А

Параметричний синтез систем стабілізації електробуса під час руху

Аналіз науково-технічної літератури з розробки стабілізаторів рухомих об'єктів призначення приводить до висновку, що до 90-х років минулого сторіччя стабілізатори з аналоговими електронними блоками майже вичерпали свої можливості. Поруч з тим, створення цифрових електронних блоків стабілізаторів, що реалізують складні логічні алгоритми стабілізації, стримувались наступними причинами [218-220]:

- відсутністю адекватних математичних моделей збуреного руху замкнених систем стабілізації рухомих об'єктів;
- засоби обчислювальної техніки в той період були не в змозі здійснювати вирішення задач аналізу і синтезу замкнених цифрових систем стабілізації рухомих об'єктів за причиною високого порядку математичних моделей збуреного руху таких систем;
- відсутністю працездатної методики синтезу цифрових систем наведення і стабілізації рухомих об'єктів; теорія аналітичного конструювання оптимальних результатів не знайшла широкого застосування в інженерній практиці;
- відсутністю елементної бази для побудови цифрових систем наведення і стабілізації рухомих об'єктів, що зберігають працездатність в умовах вібрацій, навантажень і високих прискорень об'єктів стабілізації.

Бурхливий розвиток обчислювальної техніки та її програмного забезпечення, сучасної теорії керування та її елементної бази на початку 90-х років минулого сторіччя дозволили поставити проблему створення високоточних цифрових систем стабілізації рухомих об'єктів.

Нехай збурений рух замкненої системи стабілізації рухомого об'єкту описується диференціальним рівнянням n -го порядку:

$$\dot{X}(t) = \Phi[(t), \alpha] + CF(t) \quad (\text{A.1})$$

де $X(t)$ – n -мірний вектор стану рухомого об'єкту;

α – s -мірний вектор варійованих параметрів системи;

$F(t)$ – m -мірний вектор випадкових зовнішніх збурень, що діють на систему;

C – матриця зовнішніх збурень розміром $n \times m$.

При j -й реалізації вектор-функції $F^j(t)$ має місце j -та реалізація вектору стану замкненої системи (A.1).

Задача параметричного синтезу системи (A.1) складається у виборі вектору варійованих параметрів $\alpha \in G_\alpha$, який на рішеннях системи (A.1) додає мінімум інтегральному квадратичному функціоналові:

$$I(\alpha) = \underset{(j=1, N)}{M} \left\{ \int_0^T \left\langle X^j(t, \alpha), QX^j(t, \alpha) \right\rangle dt \right\}, \quad (\text{A.2})$$

де $\underset{j=1, N}{M} \{ \bullet \}$ – символ математичного очікування випадкової величини $\{ \bullet \}$ за

реалізаціями випадкового процесу $X^j(t, \alpha)$, ($j = \overline{1, N}$)

Q – квадратна сильвестрова матриця.

Функціонал (A.2) відображує систему вимог до замкненої системи стабілізації, формалізованих і поданих у вигляді вимог мінімумів системи інтегральних квадратичних функціоналів.

Сформульована задача параметричного синтезу системи стабілізації відноситься до класу задач нелінійного програмування, в якій цільова функція (A.2) для кожного з векторів $\alpha \in G_\alpha$ обчислюється за наступним правилом.

До системи диференціальних рівнянь (A.1) n -го порядку додається ще одне рівняння:

$$\dot{x}_{n+1} = \left\langle X(t), QX^j(t) \right\rangle. \quad (\text{A.3})$$

До входу системи $(n + 1)$ порядку (A.1), (A.3) подається j -та реалізація випадкового процесу $F^j(t)$ і знаходиться рішення $X^j(t, \alpha)$, $x_{n+1}^j(t, \alpha)$. Для N

реалізацій випадкового процесу $F^j(t)$, ($j = \overline{1, N}$) знаходимо N реалізацій випадкової функції $x_{n+1}^j(t, \alpha)$, ($j = \overline{1, N}$). Із співвідношень (A.2) і (A.3) маємо:

$$I_j(\alpha) = x_{n+1}^j(T, \alpha). \quad (\text{A.4})$$

Таким чином:

$$I(\alpha) = \frac{M}{(j=1, N)} \{I_j(\alpha)\} = \frac{M}{(j=1, N)} x_{n+1}^j(T, \alpha) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{n+1}^j(T, \alpha). \quad (\text{A.5})$$

Здійснимо оцінку дисперсії випадкової величини (A.4) [217]:

$$D(\alpha) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \left[x_{n+1}^j(T, \alpha) - I(\alpha) \right]^2. \quad (\text{A.6})$$

Задаємося необхідною точністю оцінки функціоналу (A.2), тобто величинами ε і β , для яких $P \left\{ \left| I(\alpha) - I_j(\alpha) \right| \leq \varepsilon \right\} = \beta$.

У відповідності до [217] за заданою величиною β відшукуємо коефіцієнт t_β і необхідну кількість реалізацій функції $F^j(t)$:

$$\bar{N} = D(\alpha) \cdot t_\beta^2 / \varepsilon^2.$$

В подальшому у функції (A.5) приймаємо $N = \bar{N}$.

Рішення задачі мінімізації функції (A.5) по $\alpha \in G_\alpha$ здійснюється за допомогою програмного продукту Optimization Toolbox пакету MathLAB.

Вибір вагових коефіцієнтів адитивного інтегрального квадратичного функціонала. При вирішенні практичних задач параметричного синтезу систем стабілізації рухомих об'єктів матрицю Q функціоналу (A.2) обирають діагональною [218]:

$$Q = \begin{bmatrix} \beta_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_2^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \beta_n^2 \end{bmatrix}.$$

В цьому випадку функціонал (А.2) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned} I(\alpha) &= \frac{M}{(j=1, N)} \left\{ \int_0^T \left[\beta_1^2 x_1^2(t, \alpha) + \beta_2^2 x_2^2(t, \alpha) + \dots + \beta_n^2 x_n^2(t, \alpha) \right] dt \right\} = \\ &= \beta_1^2 \frac{M}{(j=1, N)} \left\{ \int_0^T x_1^2(t, \alpha) dt \right\} + \beta_2^2 \frac{M}{(j=1, N)} \left\{ \int_0^T x_2^2(t, \alpha) dt \right\} + \dots + \\ &\quad + \beta_n^2 \frac{M}{(j=1, N)} \left\{ \int_0^T x_n^2(t, \alpha) dt \right\}. \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Введемо позначення:

$$I_i(\alpha) = \frac{M}{(j=1, N)} \left\{ \int_0^T x_i^2(t, \alpha) dt \right\}; (i = \overline{1, N}). \quad (\text{A.8})$$

Тоді адитивний функціонал (А.7) записується у вигляді:

$$I(\alpha) = \sum_{(j=1, N)}^n \beta_i^2 I_i^2(\alpha), \quad (\text{A.9})$$

де вагомі коефіцієнти β_i , ($i = \overline{1, N}$) підлягають вибору.

Компоненти вектору стану $X(t)$ мають різні розмірності, тому різні розмірності повинні мати і вагові коефіцієнти β_i , ($i = \overline{1, N}$), щоб адитивний функціонал (А.9) мав розмірність, яка дорівнює розмірності кожного з доданків. В цьому зв'язку приведемо усі часткові функціонали (А.8) до єдиної розмірності:

$$\bar{I}_i(\alpha) = \frac{1}{x_{i \max}^2} I_i(\alpha); i = \overline{1, N}, \quad (\text{A.10})$$

де $x_{i\max}^2$ – максимальне значення, якого може досягти компонента $x_i(t, \alpha)$ в стабілізованому процесі. У цьому випадку усі нормовані часткової функції (А.10) мають однакову розмірність.

Введено також нормовані вагові безрозмірні коефіцієнти:

$$\bar{\beta}_i = x_{i\max} \beta_i; (i = \overline{1, n}). \quad (\text{A.11})$$

Тоді адитивний функціонал (А.9) має розмірність кожного з нормованих часткових функціоналів (А.10) і дорівнює:

$$I(\alpha) = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^2 \bar{I}_i(\alpha). \quad (\text{A.12})$$

При фіксованих значеннях вагомих коефіцієнтів $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$, мінімальне значення функціоналу (А.12) складає:

$$I^* = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^2 \bar{I}_{ii}^*(\alpha), \quad (\text{A.13})$$

де $\bar{I}_{ii}^*(\alpha)$ – мінімальні значення часткових функціоналів (А.8), отримані при мінімізації кожного з цих функціоналів.

Поставимо задачу вибору вагомих коефіцієнтів $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$, таких, щоб досягав мінімуму адитивний функціонал (А.13). Якщо на значення $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$ не накладено ніяких обмежень, то сформульована задача має тривіальне рішення $\bar{\beta}_i = 0, (i = \overline{1, n})$ при якому функціонал (А.13) має нульове значення. Однак це рішення не має практичного значення, тому на коефіцієнти $\bar{\beta}_i, (i = \overline{1, n})$ необхідно накласти обмеження, яке не дозволяло б приймати цими коефіцієнтами нульові значення. Запишемо це обмеження у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i = 1 \quad (\text{A.14})$$

і поставимо задачу мінімізації функції (A.13) при обмеженні (A.14).

Для рішення сформульованої задачі на умовний екстремум складено функцію Лагранжа:

$$F(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2, \dots, \bar{\beta}_n) = \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i^2 \bar{I}_i^* + \lambda \left(1 - \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i \right). \quad (\text{A.15})$$

де λ – множник Лагранжа.

Запишемо умови екстремуму функції (A.15):

$$\frac{\partial F(\bar{\beta}_1, \bar{\beta}_2, \dots, \bar{\beta}_n)}{\partial \bar{\beta}_i} = 2\bar{\beta}_i \bar{I}_i^* - \lambda = 0; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (\text{A.16})$$

Із співвідношень (A.16) маємо:

$$\bar{\beta}_i = \frac{\lambda}{2\bar{I}_i^*}; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (\text{A.17})$$

Підставимо співвідношення (A.17) в формулу (A.14):

$$\frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{I}_i^*} = 1 \Rightarrow \lambda = 2 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{I}_i^*}. \quad (\text{A.18})$$

З умовою (A.18) співвідношення (A.17) набувають вигляду:

$$\bar{\beta}_i = \frac{1}{\bar{I}_i^* \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{I}_i^*}}; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (\text{A.19})$$

В формулу (A.19) підставимо співвідношення (A.10) і (A.11):

$$\beta_i = \frac{x_{i \max}}{\bar{I}_i^* \sum_{i=1}^n \frac{x_{i \max}^2}{\bar{I}_i^*}}; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (\text{A.20})$$

Таким чином, для відшукування вагових коефіцієнтів адитивного функціоналу (А.7) необхідно послідовно вирішити n задач параметричного синтезу динамічної системи (А.1) для кожного з часткових функціоналів (А.8) і відшукати їх мінімальні значення I_i^* ; ($i = \overline{1, n}$).

Алгоритм вирішення задачі параметричного синтезу стабілізатора рухомого ЕБ. Алгоритм представляє собою сукупність чотирьох послідовних обчислювальних блоків (рис. А.1).

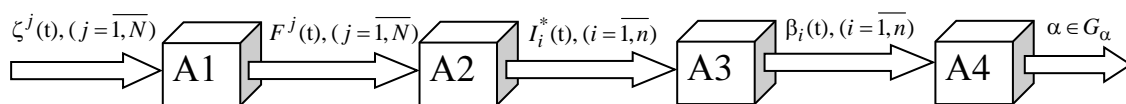


Рисунок А.1 – Структурно-логічна схема алгоритму рішення задачі параметричного синтезу

Блок А1 є генератором випадкової вектор-функції $F^j(t)$, ($j = \overline{1, N}$). До входу блоку А1 подається векторний m -мірний «білий шум» $\zeta^j(t)$. Генератор функції $F^j(t)$, ($j = \overline{1, N}$) представляє собою сукупність m формуючих динамічних ланок, кожна з яких перетворює «білий шум» $\zeta_i^j(t)$, ($j = \overline{1, N}; i = \overline{1, m}$) в j -ту реалізацію відповідної компоненти вектор-функції $F^j(t)$, ($j = \overline{1, N}$), яку позначимо $F_i^j(t)$, ($j = \overline{1, N}; i = \overline{1, m}$).

З виходу блоку А1 реалізації $j = \overline{1, N}$ зовнішнього збурення $F(t)$ подаються до входу блоку А2, що реалізує математичну модель замкненої системи стабілізації (А.1), а також процедуру Optimization Toolbox програмного пакету MathLAB по відношенню до часткових функціоналів (А.8). В результаті на виході А2 маємо мінімальні значення часткових функціоналів I_i^* , ($i = \overline{1, n}$).

З виходу блоку А2 до входу А3 поступають величини I_i^* , ($i = \overline{1, n}$). Блок А3 реалізує формули (А.20) для відшукування вагових коефіцієнтів β_i , ($i = \overline{1, n}$) адитивного функціоналу (А.7) і формує адитивний функціонал (А.7). Блок А4, як і А2, реалізує математичну модель (А.1), а також вказані вище процедури мінімізації по відношенню до адитивного функціоналу (А.7). В результаті на виході блоку А4 маємо значення варійованих параметрів стабілізатора рухомого об'єкту $\alpha \in G_\alpha$, що забезпечують мінімум адитивному функціоналу (А.7). В якості множини допустимих значень варійованих параметрів G_α рекомендується обирати область стійкості замкненої системи стабілізації в просторі варійованих параметрів алгоритму стабілізації.

Одиничність рішення задачі параметричного синтезу стабілізатора рухомого об'єкту. Розглянемо систему першого наближення по відношенню до системи (А.1):

$$\dot{X}(t) = A(\alpha)X(t) + CF(t), \quad (\text{А.20})$$

де квадратна матриця $A(\alpha)$ дорівнює:

$$A(\alpha) = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \varphi_1 X(t, \alpha)}{\partial x_1(t)} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_1 X(t, \alpha)}{\partial x_2(t)} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_1 X(t, \alpha)}{\partial x_n(t)} \right)_0 \\ \left(\frac{\partial \varphi_2 X(t, \alpha)}{\partial x_1(t)} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_2 X(t, \alpha)}{\partial x_2(t)} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_2 X(t, \alpha)}{\partial x_n(t)} \right)_0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\frac{\partial \varphi_n X(t, \alpha)}{\partial x_1(t)} \right)_0 & \left(\frac{\partial \varphi_n X(t, \alpha)}{\partial x_2(t)} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial \varphi_n X(t, \alpha)}{\partial x_n(t)} \right)_0 \end{bmatrix},$$

а через $\varphi_i [X(t), \alpha]$, ($i = \overline{1, n}$) позначені компоненти вектор-функції $\Phi [X(t), \alpha]$. Елементи матриці $A(\alpha)$ представляють собою похідні компонент вектор-функції $\Phi [X(t), \alpha]$ в точці $X = 0$. У відповідності з теоремами О. М. Ляпунова

про стійкість за першим наближенням система (A.1) являється стійкою у тому випадку, якщо являється стійкою система першого наближення (A.21).

Значення системи (A.21) складає:

$$I(\alpha) = X(0), K(\alpha)X(0) + \dots + T \cdot S_p [Q_f K(\alpha)] \quad (\text{A.22})$$

де Q_f – матриця інтенсивності зовнішнього збурення $F(t)$;

$S_p \{\bullet\}$ – шпур або слід матриці $\{\bullet\}$;

$K(\alpha)$ – квадратна симетрична сільвестрова V матриця, яка задовольняє матричному алгебраїчному рівнянню:

$$K(\alpha)A(\alpha) + A^T(\alpha)K(\alpha) + Q = 0 \quad (\text{A.23})$$

де T – час аналізу випадкового процесу $X(t)$.

Рішення сформульованої вище задачі параметричного синтезу здійснюється до відшукання мінімуму по $\alpha \in G_\alpha$ співвідношення (A.22). Будь-який з відомих чисельних методів процесу екстремуму функції багатьох змінних, в тому числі і найбільш розповсюджений метод Нелдера-Міда, що реалізується в програмних продуктах Optimization Toolbox інтерактивного середовища MATLAB, дозволяє відшукати найближчий до стартової точки локальний мінімум функції (A.22). Відшукання глобального мінімуму функції (A.22) суттєво ускладнює задачу параметричного синтезу.

В якості множини G_α виберемо область стійкості системи (A.21), характеристичне рівняння якої записується у вигляді:

$$\det[A(\alpha) - E_s] = 0. \quad (\text{A.24})$$

При $\alpha \in G_\alpha$ усі корені характеристичного рівняння (A.24) знаходяться зліва від уявної осі комплексної площини коренів, а гіперповерхня Γ_α , що обмежує множину G_α , являється відображенням уявної осі площини коренів характеристичного рівняння (A.24) на s -мірний простір варійованих параметрів R^s .

В площині коренів характеристичного рівняння (A.24) розглянемо лінію

$$s = \beta + j\omega, \quad (\text{A.25})$$

що паралельна уявній осі площини коренів і відстоїть від уявної осі на величину $\beta < 0$. Відображення цієї лінії на s -мірний простір варійованих параметрів системи R^s визначає гіперповерхню рівного ступеня стійкості і обмежує область $G_\alpha(\beta)$. Якщо $\alpha \in G_\alpha(\beta)$, то ступень стійкості такої системи не менше ніж β . Це означає, що при $\alpha \in G_\alpha(\beta)$ найближчий до уявної осі дійсний корінь, або пара комплексно-сполучених коренів рівняння (A.24) відстоять зліва від уявної осі не менше ніж на відстань $|\beta|$. Обирая $|\beta_1| < |\beta_2| < \dots < |\beta_k|$, отримуємо множини $G_\alpha(\beta_1), G_\alpha(\beta_2), \dots, G_\alpha(\beta_k)$, що обмежені гіперповерхнями $\Gamma_\alpha(\beta_1), \Gamma_\alpha(\beta_2), \dots, \Gamma_\alpha(\beta_k)$ відповідно, які вкладені одна в одну: $G_\alpha(\beta_k) \in G_\alpha(\beta_{k-1}) \in \dots \in G_\alpha(\beta_1)$.

Нехай при $\beta = \beta_k$ множина $G_\alpha(\beta_k)$ і гіперповерхня $\Gamma_\alpha(\beta_k)$ стягуються у точку в s -мірному просторі R^s , яка є точкою максимальної ступені стійкості.

Відомо, що будь-якій стійкій системі:

$$\dot{X}(t) = A(\alpha)X(t) \quad (\text{A.26})$$

відповідає функція Ляпунова:

$$V[X(t), \alpha] = \langle X(t), K(\alpha)X(t) \rangle, \quad (\text{A.27})$$

де матриця $K(\alpha)$ задовольняє лінійному алгебраїчному рівнянню (A.23), яке отримане внаслідок рівняння Ляпунова:

$$\frac{\partial V[X(t), \alpha]}{\partial t} = -\langle X(t), QX(t) \rangle. \quad (\text{A.28})$$

Функція Ляпунова (A.27) представляє собою позитивно-визначену квадратичну форму, яку можна інтерпретувати як норму вектору стану $X(t)$

$\rho[X(t)]$, яка дорівнює нулю при $X(t)=0$, а для усіх $X(t)\neq 0$ являється позитивною величиною. Повна похідна від функції Ляпунова за часом, у відповідності з рівнянням (A.28), є від'ємно-визначеною формою, тобто у будь-який момент часу норма вектору стану $\rho[X(t)]$ зменшується і необмежено наближається до нуля (рис. A.2, крива 1).

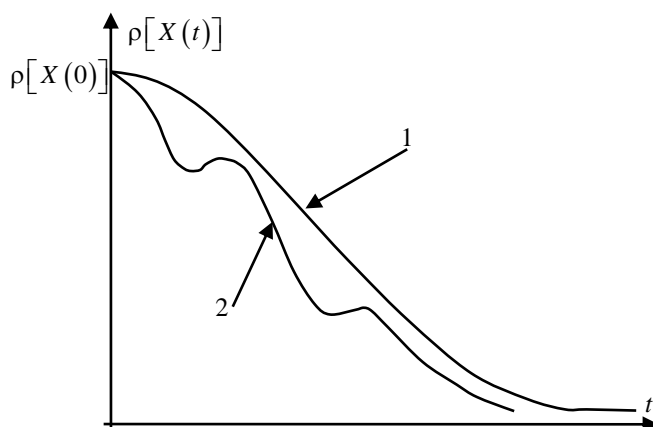


Рисунок A.2 – Норма вектору стану $X(t)$ $\rho[X(t)]$

Якщо б функціонал (A.2) мав декілька локальних мінімумів, то такі б мінімуми позначалися б на траєкторії кривої $\rho[X(t)]$ (рис. A.2, крива 2). Таким чином, функціонал (A.2), обчислений на рішеннях динамічної системи (A.26) має одиничний мінімум, який являється глобальним і визначає рішення задачі параметричного синтезу.

Підсумовуючи, треба сказати, що одним з найважливіших напрямків розвитку сучасної теорії керування являється методика параметричного синтезу систем стабілізації рухомих об'єктів. Розроблений алгоритмічний метод параметричного синтезу систем стабілізації, який заснований на безпосередньому обчисленні функції цілі на рішеннях математичної моделі збуреного руху електробуса з подальшою мінімізацією цієї функції з цілеспрямованим вибором вагових коефіцієнтів, дозволяє майже повністю автоматизувати процес параметричного синтезу системи.

Додаток Б

Оптимізація інфраструктури швидкої зарядки для електробусів

Таблиця Б.1 – Перелік множин, параметрів і змінних імітаційної моделі

Змінні	Опис	Діапазон
b	автобусний маршрут	унікальний ідентифікатор для автобусного маршруту
$FIRSTSTOP_{n,b}$	перша зупинка на маршруті	$\in [i]$
i, j	автобусна зупинка	унікальний ідентифікатор для кожної зупинки
id	автобусна станція (депо)	унікальний ідентифікатор для кожної станції
$LASTSTOP_{n,b}$	зупинка автобуса перед першою зупинкою	$\in [i]$
n	кількість поїздок в обидва кінці	$\in [1, x]$
o	автобусні депо	$\in [i]$
p	всі зупинки, крім депо	$\in [i \setminus o]$
v	тип акумулятора	
Параметри	Опис	Одиниця виміру
C_v^{AKB}	вартість батареї ємністю v	грн.
$C^{буд.ЗС}$	вартість будівництва зарядної станції	грн.
$C^{трансф.}$	вартість трансформаторної станції	грн.
C_v	ємність батареї типу v	кВт·год
$CONSUME_{i,j,b,n}$	енергія, споживана на ділянці i, j по маршруту b в ітерації n	кВт·год
$IDLETIME_{i,n,b}$	час перебування автобуса на зупинці i на ітерації n по маршруту b	с
$LBOUND_b$	рівень безпечної нижньої межі розряду акумулятора	%
LP_b^{high}	зарядки акумулятора високою потужністю	кВт
LP_b^{low}	малопотужна зарядка акумулятора	кВт
$S_{i,n,b}$	всі зупинки на маршруті	шт
$MAXSTOPS_{id}$	максимальна кількість зупинок на станції id	шт
NUM_b	кількість автобусів на лінії b	шт
$OVER_v^{BATTERY}$	відношення максимального розміру батареї до розміру батареї типу v	%
$POSTPROCESSING_b$	час обробки після завершення процесу зарядки	с
$PREPROCESSING_b$	час попередньої обробки до початку процесу зарядки	с
$THRESHOLD_b$	пори́г, що розділяє нелінійну функцію зарядки в різних сегментах	%

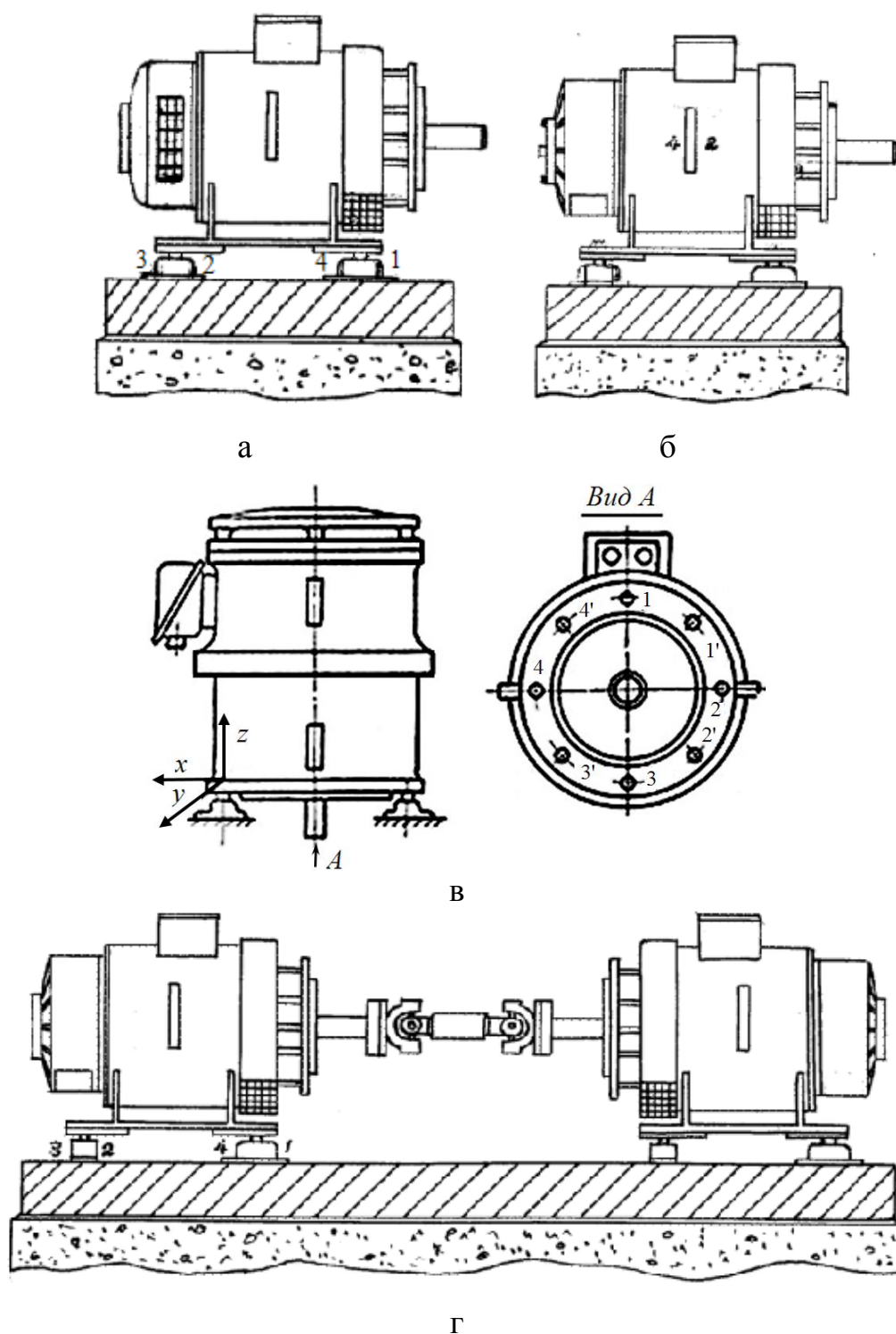
Продовження таблиці Б.1

Змінні	Опис	Одиниці виміру
$bat_{b,v}$	двійковий вибір типу батареї v для автобусного маршруту b	{0,1}
$e_{i,n,b}$	рівень енергії на маршруті b в поїздку n при зупинці i після зарядки	кВт·год
$e_{i,n,b}^{before}$	рівень енергії лінії b в ітерації n при зупинці i після зарядки з високою потужністю зарядки	кВт·год
$idle_{i,n,b}^{high}$	час зарядки в режимі високої потужності	с
$idle_{i,n,b}^{low}$	час зарядки в режимі низької потужності	с
$level_{i,n,b}$	двійкова змінна, що вказує на відповідний сегмент у функції зарядки на основі поточного стану заряду акумулятора	{0,1}
$soc_{i,n,b,v}$	стан заряду акумулятора типу v при зупинці i ітерації n на електробусі b	кВт·год
z_i	зарядна станція побудована на зупинці i	{0,1}
z_{id}^{ident}	трансформаторна станція побудована на станції id	унікальний ідентифікатор для кожної станції

*Параметри позначені великою літерою, а всі змінні – малими літерами.

Додаток В

Експериментальне дослідження вібраційних характеристик асинхронних
електродвигунів



1, 2, 3, 4 – точки кріплення віброізоляторів; 1', 2', 3', 4' – точки вимірювання вібрації; x , y , z – напрями вимірювання вібрації

Рисунок В.1 – Способи установки електродвигуна на віброізолятори і точки вимірювання вібрації: а – кріплення на лапах, режим холостого ходу; б – кріплення фланцем, режим холостого ходу; в – кріплення на лапах; г – кріплення фланцем, режим навантаження

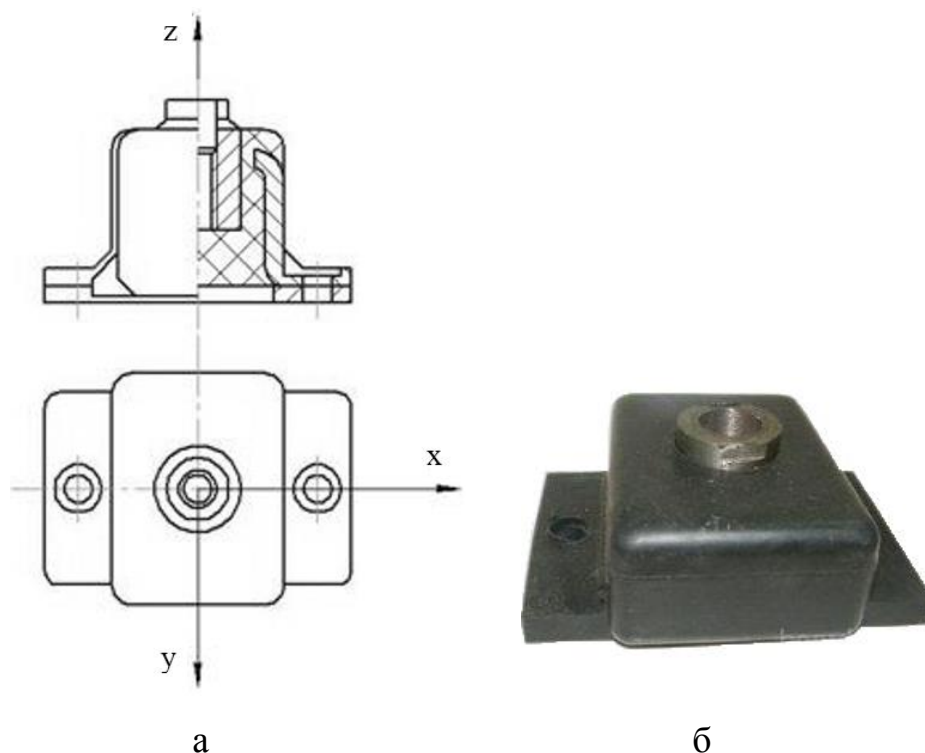
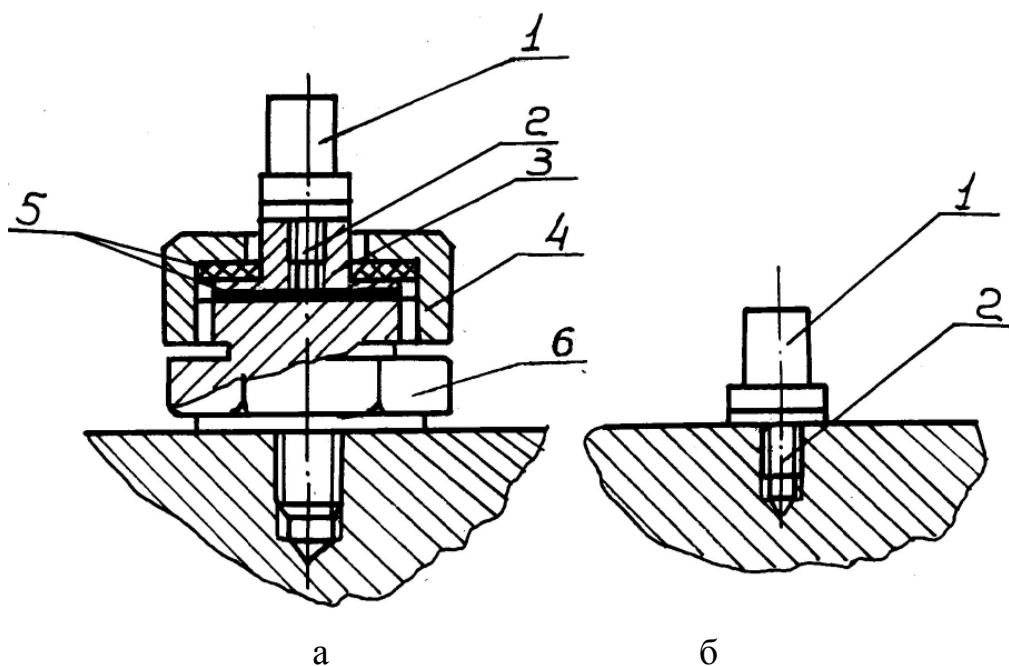


Рисунок В.2 – Віброізолятор типу АКСС-25м: а – схема; б – зовнішній ВИГЛЯД



1 – віброперетворювач; 2 – шпилька різбова; 3 – перехідник; 4 – накидна гайка; 5 – електроізоляційні прокладки; 6 – болт

Рисунок В.3 – Будова і схема кріплення віброперетворювача: а – з додатковою електроізоляцією; б – без електроізоляції

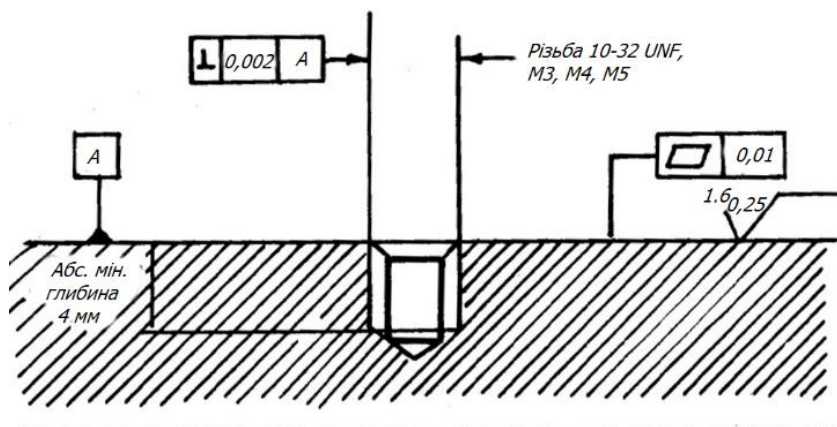


Рисунок В.4 – Вимоги до чистоти обробки поверхонь і монтажної різьби площадок місць вимірювання вібрації

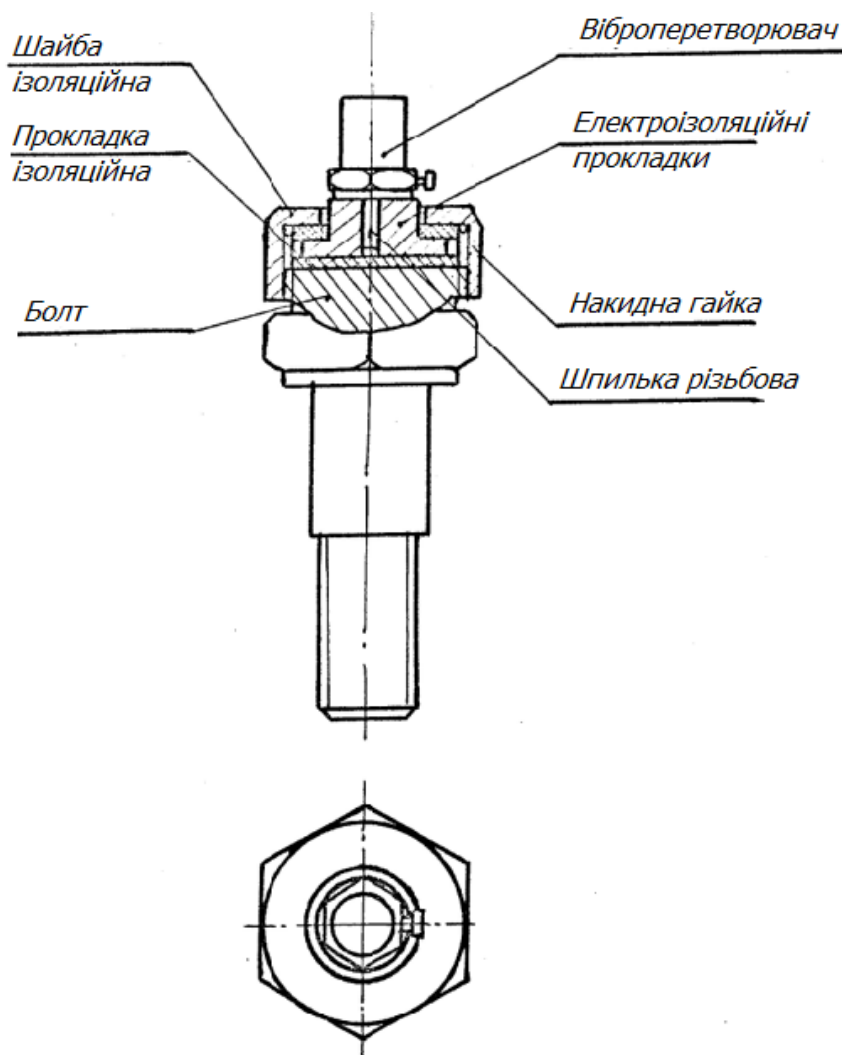


Рисунок В.5 – Креслення схеми кріплення віброперетворювача

Таблиця В.1 – Результати вимірів віброприскорень електродвигунів в спектрі частот від 50 Гц до 10 КГц. Перший етап досліджень

Частота, <i>f</i> , Гц	Двигуни									
	д1	д2	д3	д4	д5	д6	д7	д8	д9	д10
50	54	53	52	54	53	56	52	54	55	51
63	32	31	38	36	33	37	35	33	53	42
80	32	28	39	30	29	34	29	39	54	34
100	54	52	52	55	60	55	58	56	60	53
125	44	38	41	37	47	57	35	40	59	54
160	52	40	45	47	49	53	48	59	63	53
200	44	48	36	47	40	44	44	62	57	50
250	46	49	40	55	40	41	47	65	55	56
315	46	51	46	56	49	46	56	69	65	58
400	52	57	46	58	54	55	55	72	65	58
500	49	54	46	59	54	48	50	72	56	53
630	58	65	52	62	65	59	58	76	69	67
800	59	66	54	66	58	59	64	73	64	59
1000	63	68	56	64	58	57	64	72	66	61
1250	69	68	60	69	70	72	66	68	74	70
1600	72	67	62	69	70	71	62	72	76	68
2000	71	64	68	72	73	70	67	71	74	73
2500	70	59	65	69	71	73	69	71	75	81
3150	65	61	58	67	68	70	68	72	80	75
4000	66	59	63	66	70	75	72	72	78	77
5000	66	58	63	68	67	71	68	75	81	75
6300	56	59	54	62	61	65	65	68	73	67
8000	65	65	55	63	65	66	66	69	72	67
10000	66	68	59	66	67	70	67	76	71	67

Таблиця В.2 – Первинна обробка результатів спектрограм вібраційних характеристик електродвигунів. Перший етап досліджень

Частота, f , Гц	Основні статистичні характеристики віброприскорення ЕД, дБ				
	min	max	\bar{W}	σ	v_i
50	51	55	53,4	1,55	0,029
63	27	52	37	7,65	0,207
80	27	51	34,8	8,50	0,244
100	52	60	55,5	3,07	0,055
125	35	59	45,2	9,01	0,199
160	40	63	50,9	7,46	0,147
200	36	62	47,2	8,54	0,181
250	40	65	49,4	8,87	0,179
315	46	69	54,2	8,56	0,158
400	46	72	57,2	8,15	0,142
500	46	72	54,1	8,53	0,158
630	52	76	63,1	7,67	0,122
800	54	73	62,2	6,13	0,099
1000	56	72	62,9	5,48	0,087
1250	60	74	68,6	4,37	0,064
1600	62	76	68,9	4,77	0,069
2000	64	74	70,3	3,43	0,049
2500	59	81	70,3	6,75	0,096
3150	58	80	68,4	7,15	0,104
4000	59	78	69,8	6,65	0,095
5000	58	81	69,2	7,40	0,107
6300	54	73	63	6,33	0,100
8000	55	72	65,3	5,20	0,080
10000	59	76	67,7	5,10	0,075

Таблиця В.3 – Результати вимірів віброприскорень електродвигунів в спектрі частот від 50 Гц до 10 КГц. Другий етап досліджень

Частота, f , Гц	Двигуни									
	д1	д2	д3	д4	д5	д6	д7	д8	д9	д10
50	50	49	48	51	49	52	48	51	52	47
63	29	26	36	33	29	33	32	29	50	38
80	28	25	35	26	26	30	26	35	49	30
100	46	45	44	45	52	48	47	46	54	46
125	35	31	32	30	41	38	30	32	54	46
160	45	33	40	41	41	45	41	51	57	46
200	36	41	30	44	32	34	35	58	50	40
250	37	40	33	45	33	32	36	59	48	46
315	38	43	35	49	41	38	45	62	56	51
400	43	49	39	52	47	46	45	63	55	50
500	40	45	38	51	46	40	43	64	48	45
630	49	58	44	57	51	52	51	67	61	57

Частота, f , Гц	Двигуни									
	д1	д2	д3	д4	д5	д6	д7	д8	д9	д10
800	50	58	46	58	50	51	56	65	56	51
1000	53	59	49	57	49	50	56	64	58	53
1250	60	59	52	60	62	65	58	60	67	62
1600	61	57	54	61	63	64	54	64	68	60
2000	63	56	60	63	65	63	60	65	68	67
2500	62	50	57	60	63	65	61	63	67	72
3150	58	54	51	59	61	63	60	63	70	66
4000	60	53	57	59	61	66	63	63	70	68
5000	58	51	55	59	60	63	61	66	72	65
6300	56	59	54	62	61	65	65	68	73	67
8000	64	65	54	63	64	66	66	69	71	68
10000	65	68	58	65	68	69	66	75	70	66

Таблиця В.4 – Первинна обробка результатів спектрограм вібраційних характеристик електродвигунів АНУ 92-2. Другий етап досліджень

Частота, f , Гц	Основні статистичні характеристики віброприскорення ЕД, дБ				
	min	max	\bar{W}	σ	v_i
50	47	52	49,70	1,841	0,037
63	26	50	33,50	7,857	0,235
80	25	49	31,00	8,301	0,268
100	44	54	47,30	3,524	0,074
125	30	54	36,90	8,693	0,236
160	33	57	44,00	7,515	0,171
200	30	58	40,00	9,579	0,239
250	32	59	40,90	9,422	0,230
315	35	62	45,80	9,356	0,204
400	39	63	48,90	7,651	0,156
500	38	64	46,00	8,565	0,186
630	44	67	54,70	7,414	0,136
800	46	65	54,10	6,183	0,114
1000	49	64	54,80	5,268	0,096
1250	52	67	60,50	4,679	0,077
1600	54	68	60,60	4,853	0,080
2000	56	68	63,00	3,976	0,063
2500	50	72	62,00	6,793	0,110
3150	51	70	60,50	6,158	0,102
4000	53	70	62,00	5,649	0,091
5000	51	72	61,00	6,689	0,110
6300	54	73	63,00	6,331	0,100
8000	54	71	65,00	5,363	0,083
10000	58	75	67,00	5,123	0,076

Додаток Г
Акти впровадження



ООО "Альфа Центр Харьков"
 61038, Украина, г. Харьков
 юр. адрес: пр. Гагарина 314, б
 факт. адрес: Салтовское шоссе, 41 а
 тел.: (057) 784 88 88
 факс.: (057) 766 88 88
 www.subaru-kharkov.com

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень докторської дисертаційної роботи Аргун Щасяни Валіковни, що виконувалась в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті.

Офіційний дилер Subaru у м. Харків та Харківської області ТОВ «Альфа Центр Харків», повідомляє, що результати докторської дисертаційної роботи Аргун Щасяни Валіковни пройшли апробацію на об'єктах підприємства:

1. Удосконалено створення систем генерації та збереження електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі, які використовують електричні машини різних типів та мультиплікатори, що дозволяє збільшити ефективність перетворення кінетичної енергії в електричну для експлуатації автомобільного транспорту.

2. Визначено значення допустимих вібраційних прискорень електродвигунів, що дозволило за параметрами зниження вібрації відносно допустимих значень розробити класи вібрації, що дає можливість робити оцінку експлуатаційної придатності електродвигунів, визначити рівень їх технічної якості, визначити ресурс електродвигунів і розробити вимоги до вібраційних характеристик електродвигунів з метою підвищення їх конкурентоспроможності та ресурсу експлуатації.

Впровадження результатів досліджень дисертаційної роботи Аргун Щ. В. дозволить розробити внутрішні стандарти для визначення технічного стану електродвигунів за вібраційними характеристиками, а удосконалені системи генерації та збереження електричної енергії дозволять генерувати додаткову електроенергію для власних потреб.


Директор
 ТОВ «Альфа Центр Харків»

20.03.2018 р.



Кирик С.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ «НМУ
«Електропівденмонтаж»
О. В. Бойчук

« 11 » 02 2019 р.

61035 м. Харків,
вул. Каштанова, 33

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи доцента Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
Аргун Щасяни Валіковни

Дійсним підтверджую використання результатів дисертаційної роботи в ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж», а саме:

– експериментально визначені параметри зниження рівня вібрації, що збуджується магнітними джерелами, які, на відміну від існуючих, базуються на виборі форми паза магнітопроводу ротора;

– визначено значення допустимих вібраційних прискорень електродвигунів, що дозволило розробити модель визначення запасу рівнів вібрації до 16 дБ відносно допустимих значень, що дає можливість робити оцінку експлуатаційної придатності електродвигунів та визначити рівень їх технічної якості;

– здійснено системний підхід до оцінки якості тягових електродвигунів за вібродіагностичними характеристиками.

Начальник

ТОВ «НМУ «Електропівденмонтаж»


О. А. Валковський



АКТ про впровадження

Найменування пропозиції про впровадження. Метод створення системи генерації та збереження електричної енергії на базі триступеневого мультиплікатора.

Ким запропоновано. Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), кафедра автомобільної електроніки, автор – Аргун Ц.В.

Де, коли, з якою метою впроваджено. Розроблений метод впроваджено на ТОВ «ОЛІ ТРАК ПАРТС» для генерування відновлювальної енергії та використовується як додаткове джерело електричної енергії для живлення малопотужних споживачів і зовнішнього освітлення території підприємства з березня 2019 р.

Напрямки, результати, ефективність впровадження. Використання розробленого методу дозволило за допомогою експериментального зразка енергогенеруючої панелі на базі триступеневого мультиплікатора 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.

ХНАДУ на частку ефекту від провадження не претендує.

Висновки, зауваження, пропозиції. Впровадження і використання розробленого методу створення системи генерації та збереження електричної енергії на базі триступеневого мультиплікатора забезпечує більш ефективне використання електроенергії і сприяє її економії, а також дає можливість знизити експлуатаційні витрати та спрямоване на підвищення якості обслуговування підприємства.

Заступник директора



Черепиха О.С.



www.elektrocar.com.ua
Ул. Полтавское шоссе, 212а

А К Т

впровадження результатів наукових досліджень дисертаційної роботи
Аргун Щасяни Валіковни,
що виконувалась в Харківському національному автомобільно-дорожньому
університеті.

Фірма «ФОП Сохін Павло Андрійович» підтверджує, що результати дисертаційної роботи за тематикою підвищення ефективності експлуатації міського автоелектротранспорту за рахунок енерго- та ресурсозберігаючих технологій, пройшли успішну апробацію, а саме:

1. Створення систем генерації та збереження електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі, які використовують електричні машини різних типів та мультиплікатори, що дозволяє збільшити ефективність перетворення кінетичної енергії в електричну для експлуатації автомобільного транспорту.
2. Методи розширення зарядної бази електромобілів та електробусів, які відрізняються використанням малопотужних енергоефективних систем енергозбереження та генерації електричної енергії.

Апробація і впровадження зазначених результатів дисертаційних досліджень дозволяє створювати системи генерації та збереження електричної енергії на транспорті та його інфраструктурі. Згенеровану електроенергію можна у подальшому використовувати для заряду тягових акумуляторних батарей електромобілів.

09.09.2019



Сохін П.А.



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

61002, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, тел. (057) 700-38-66, факс (057) 700-38-65, E-mail: admin@khadi.kharkov.ua

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор

проф. С.Я. Ходирев

« 20 » 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Аргун Щ. В., яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Комісією у складі: декана автомобільного факультету д.т.н., проф. Сараєва О.В., завідувача кафедри автомобільної електроніки д.т.н., проф. Бажинова О.В., професора кафедри автомобільної електроніки д.т.н., проф. Богаєвського О.Б. складено акт в тому, що результати докторської дисертації Аргун Щасяни Валіковни впроваджено у навчальний процес, а саме, у навчальні дисципліни «Теорія електроприводу» та «Електричні машини», за галуззю знань 14 «Електрична інженерія» при підготовці бакалаврів і магістрів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» на кафедрі автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Декан автомобільного факультету
д.т.н., професор

 О. В. Сараєв

Завідувач кафедри автомобільної електроніки,
д.т.н., професор

 О. В. Бажинов

Професор кафедри автомобільної електроніки,
д.т.н., професор

 О. П. Смирнов

Додаток Д

Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію
результатів дисертації

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О. В., та ін. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. Вісник ХНАДУ. 2016. № 72. С. 29–34.
2. Аргун Щ. В. Ретроспектива развития объединенной энергетической системы Украины. Вісник ХНАДУ. 2014. № 67. С. 134–137.
3. Аргун Щ. 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 Щ. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. Автомобільний транспорт. 2018. № 43. С. 36–46.
6. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Дзюбенко О. А. Вибір схеми технічного рішення енергогенеруючої сходинок. Вісник ХНАДУ. 2018. № 81. С. 29–38.

11. Гнатов А. В., Аргун Щ. 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. Энергозберігаючі 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. Энергогенеруюча 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 жит-*

тевого 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 X 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, 17-18 березня 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. Wlajlawek, 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 : В60L11/00, В60L9/00. Гнатов 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. Гнатов А. В., Аргун Щ. В.; заявл. 02.06.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

Відомості про апробацію 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, 20-21 жовтня 2017 р., очна форма участі); II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність та енергетична безпека електроенергетичних систем» (Харків, ХПІ, 3-6 грудня 2018 р., очна форма участі); V-ій Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології» (Харків, ХНАДУ, 20-21 листопада 2017 р., заочна форма участі); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки» (Харків, ХАІ, 20-21 квітня 2016 р., очна форма участі); X-ій міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (Вінниця, 23-25 жовтня ВНТУ, 2017 р., очна форма участі); II-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Херсон, ХДМА, 23-25 травня 2017 р., очна форма участі); VI-ій Міжнародній науково-технічній інтернет конференції «Автомобіль і електро-

ніка. Сучасні технології» (Харків, ХНАДУ, 19-20 листопада 2018 р., заочна форма участі); III-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 22-23 лютого 2018 р., очна форма участі); 7-ій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, ХДМА, 22-23 вересня 2016 р., очна форма участі); II-ій всеукраїнській науково-практичній конференції «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні» (Львів, НУ «Львівська політехніка, 17-18 березня 2016 р., очна форма участі); Міжнародній науково-технічній конференції «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство» (Херсон, ХДМА, 21-22 вересня 2017 р., очна форма участі); International scientific and practical conference «Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine» (Wlajclawek, Republic of Poland: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 21 грудня 2018 р., заочна форма участі); IEEE 38th International Conference on «Electronics and Nanotechnology» (Київ, НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", 24 квітня 2018 р., очна форма участі); IEEE First Ukraine Conference on «Electrical and Computer Engineering» (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 29 трав.–2 черв 2017 р., очна форма участі); IEEE International Conference on «Energy and Sustainability in Small Developing Economies» (Funchal, Universidade da Madeira, 12 липня 2018 р., заочна форма участі); 22nd International Scientific Conference «Transport Means 2018» (Kaunas, Kaunas University of Technology, 5 жовтня 2018 р., заочна форма участі); 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on «Power and Electrical Engineering» (Riga, Riga Technical University, 12 листопада 2018 р., заочна форма участі).