

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ІНФОРМАЦІЙНОЇ
ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ
ДЛЯ КІНЦЕВОЇ ЗУПИНКИ МАРШРУТУ ЕЛЕКТРОБУСА**

НА ПІДСТАВІ ДІАГРАМ РУХУ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувачка:
Юлія ПАНЧЕНКО
гр. ЕТ 2022 -1

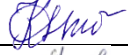
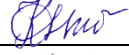
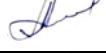
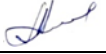


Керівник:
Надія КУЛЬБАШНА
доцент, к. т. н.

2026 р.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів):

1. Титульний лист. 2. Мета та завдання роботи. 3. Аналіз способів зарядження електробусів. 5. Способи зарядження на кінцевих станціях. 6. Переваги і недоліки зарядження на кінцевих станціях. 7. Проведення вимірювань на маршруті. 8. Діаграми руху по перегонам. 9. Методика встановлення параметрів акумуляторної батареї для визначення потужності зарядної станції. 10. Методика визначення витрат енергії і потужності зарядної станції. 11. Вибір зарядної станції. 12. Висновки.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Головна частина	Надія КУЛЬБАШНА, доц.		
Охорона праці	Микола МОРОЗ, доц.		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКЮ, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 4.05.26

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вимірювання швидкості руху автобуса по маршруту. Обробка даних та побудова діаграм	20.05.26	
2.	Встановлення опорів руху	27.05.26	
3	Розрахунок енергії на рух	01.06.26	
4.	Розрахунок параметрів акумуляторної батареї електробуса і встановлення потужності зарядної станції	07.06.26	
5	Розробка заходів з охорони праці	15.06.26	
6.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	17. 06.26	
7.	Підготовка доповіді та презентації	18. 06.26	

Здобувач


(підпис)

Юлія ПАНЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Надія КУЛЬБАШНА

(ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

У першому розділі розглянуто особливості експлуатації електробусів, актуальність їх впровадження та проаналізовані способи їх зарядження. Також викладена методика встановлення параметрів зарядної станції на кінцевому пункті.

У другому розділі, як технічне завдання, визначений маршрут автобуса для дослідження і приведені результати дослідження швидкості руху на маршрутах і часу руху по перегонам за даними навігації, на підставі чого побудовані діаграми руху.

У третьому розділі були проведені розрахунки середньоходових швидкостей за діаграмами руху електробуса по перегонам маршруту, розрахунок значень опорів руху в режимах розгону і гальмування, розрахунок витрат енергії за рейс, розрахунок кількості енергії, що економиться завдяки рекуперації протягом рейсу. Та було встановлено параметри тягової акумуляторної батареї електробуса. Розраховано потужності і вибір типу зарядної станції кінцевого пункту.

У розділі «Охорона праці» розглянуті питання охорони праці технічного персоналу, що обслуговує зарядні станції для заряджання електробусів.

Бакалаврська кваліфікаційна робота містить 59 сторінок, 15 рисунків, 12 формул, 35 літературних джерел, 12 слайдів презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОБУСІВ.....	8
1.1 Актуальність впровадження електробусів для міських перевезень.....	8
1.2 Аналіз способів зарядження електробусів.....	10
1.3 Переваги і недоліки зарядження електробусів на кінцевих зупинках.....	19
2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКУ ПОТУЖНОСТІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ.....	28
2.1 Методика встановлення параметрів зарядної станції на кінцевому пункті...	28
2.2 Характеристика маршруту, для якого виконуються розрахунки.....	32
3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ.....	35
3.1 Розрахунок середньоходових швидкостей за діаграмами руху електробуса по перегонам маршруту.....	35
3.2 Розрахунок значень опорів руху в режимах розгону і гальмування.....	36
3.3 Розрахунок витрат енергії за рейс.....	37
3.4 Розрахунок кількості енергії, що економиться завдяки рекуперації протягом рейсу.....	40
3.5 Встановлення параметрів тягової акумуляторної батареї електробуса.....	41
3.6. Розрахунок потужності і вибір типу зарядної станції кінцевого пункту.....	43
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	44
4.1 Вступ.....	44
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	45
4.3 Організаційно-технічні заходи з забезпечення безпеки.....	47
4.4 Висновки за розділом 4.....	50
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Розвиток електротранспорту громадського користування є одним із ключових напрямків модернізації міської інфраструктури в Україні та у світі. Зростання урбанізації, підвищені вимоги до екологічності транспортних засобів та потреба зменшити залежність від викопного палива сприяють активному переходу міст до електричних транспортних засобів. З-поміж них особливе місце посідають електробуси — транспортування, що об'єднує переваги традиційних автобусів із екологічністю й енергоефективністю електроприводу.

Актуальність цієї теми зумовлена тим, що ефективність експлуатації електробусів залежить від правильно організованої інфраструктури заряджання. Вибір типу та параметрів зарядної станції є ключовим для забезпечення безперебійної роботи маршруту, ефективного використання рухомого складу та економічної виправданості системи. Це особливо важливо в умовах реформування комунального транспорту України, яке відбувається у контексті європейської інтеграції та зеленого енергетичного переходу [1, 3].

Мета цієї роботи — визначити потужність зарядної станції для електробуса, що обслуговує маршрут № 81 у Харкові (кінцеві станції: «ст. м. Академіка Барабашова — 626 мікрорайон»), а також встановити технічні характеристики зарядної інфраструктури на кінцевій зупинці маршруту.

Щоб досягти поставленої цілі, виконуються такі завдання:

- аналіз особливостей експлуатації електробусів та методів їх зарядки, визначення переваг і недоліків заряджання на кінцевих зупинках;
- розрахунок середньої швидкості на маршруті за діаграмами руху; обчислення сил опору при розгоні й гальмуванні;
- підрахунок витрат енергії за рейс і кількості енергії, що зберігається при рекуперації;
- встановлення параметрів тягової акумуляторної батареї; розрахунок необхідної потужності та вибір типу зарядної станції на кінцевій станції.

Об'єктом дослідження є система електропостачання електробусного маршруту міського пасажирського транспорту. Предметом дослідження є методика розрахунку параметрів зарядної станції для електробуса на кінцевому пункті маршруту.

Практична цінність цієї роботи полягає у застосуванні отриманих результатів для обґрунтування технічних рішень при проектуванні зарядної інфраструктури для електробусів у містах України.

1 ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОБУСІВ

1.1 Актуальність впровадження електробусів для міських перевезень

Електричні автобуси — одна з головних галузей розвитку сучасної міської транспортної системи. Через посилення урбанізації та посилення екологічних проблем пошук альтернатив традиційним видам транспорту, що використовують викопне паливо, стає все більш важливим для міських центрів у всьому світі. У багатьох країнах електричні автобуси вважаються найкращим рішенням для модернізації громадського транспорту, оскільки вони не лише екологічні, але й економічні, а також створюють комфортні умови для пасажирів. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), у 2023 році глобальна кількість електробусів перевищить 600 000, з яких більшість курсує в містах Китаю, Європи та Латинської Америки [9]. Ця тенденція підтверджує зростаючу довіру муніципальних органів влади та транспортних компаній до цієї технології.

Отже, Головна перевага електробусів полягає у їхній екологічності. Відрізняючись від автобусів з двигунами внутрішнього згорання, під час руху не виділяють шкідливих речовин в атмосферу. Традиційні дизельні автобуси є однією з головних причин забруднення повітря в містах, випускаючи оксиди азоту (NO_x), дрібні частинки ($\text{PM}_{2,5}$ та PM_{10}) та CO_2 . У густонаселених районах концентрації цих речовин зазвичай перевищують норми, встановлені ВООЗ [10]. За оцінками Європейського агентства з охорони навколишнього середовища, міський транспорт сприяє приблизно 25 % викидів CO_2 у містах ЄС, і перехід на електропривод може суттєво скоротити цей рівень [10]. Широке застосування електробусів уможливить зменшити ці викиди та покращити якість повітря в містах. Це позитивно вплине на здоров'я мешканців і допоможе містам досягти кліматичних цілей, визначених Паризькою угодою 2015 року [4].

Переваги електробусів також полягають у їхньому меншому шумі. Рівень шуму електродвигунів коливається від 65 до 70 дБ, що значно менше за дизельні двигуни, які видають від 80 до 85 дБ. Це робить електробуси особливо

корисними для нічного використання, коли шум є критичним для комфорту мешканців, а також у тихих житлових районах міст. Для пасажирів це забезпечує більш комфортну поїздку: плавне прискорення без ривків і мінімальні вібрації, що зменшують втому, особливо при поїздках на довгі відстані. Дослідження стосовно шумового впливу довели, що зниження шуму на дорозі позитивно впливає на психологічний стан мешканців поблизу магістралей, знижуючи рівень стресу і покращуючи якість сну.

З технічної точки зору, електродвигуни є набагато ефективнішими за двигуни внутрішнього згорання. Зокрема, класичний дизельний двигун перетворює лише близько 30-40% енергії палива у кінетичну, тоді як електродвигун використовує понад 85-90% енергії акумулятора [11]. Це означає, що при однаковому споживанні енергії електричний автобус може проїхати значно довший шлях, ніж дизельний. Ще однією перевагою є система рекуперативного гальмування, яка дає змогу перетворювати кінетичну енергію, що виникає під час гальмування, в електричну і зберігати її в акумуляторі для повторного використання. За оцінками, ця технологія може відновлювати від 10 % до 30 % витраченої енергії, залежно від навантаження і рельєфу, що значно підвищує енергоефективність транспортного засобу [5].

Ще одним важливим аспектом використання електробусів є їхня економічна ефективність. Хоча—початкові інвестиції вищі порівняно з дизельними автобусами, електробуси дає змогу суттєво зменшити витрати на паливо та обслуговування протягом усього строку служби. Оскільки електродвигуни мають мало рухомих частин, ймовірність поломок менша, що також зменшує витрати на ремонт. За оцінками транспортних компаній із різних європейських міст, загальні витрати на утримання електробусів за 12 років є рівними або меншими за витрати на дизельний автобус, особливо з урахуванням швидкого зростання цін на паливо.

Порівнюючи електробуси з троллейбусами, слід окремо врахувати переваги кожного з них. Хоча обидва види транспорту працюють на електроживленні, електробуси не залежать від контактної мережі, що забезпечує їм значну

гнучкість у змінах маршрутів. Це дає змогу швидко адаптовувати або розширювати маршрути без великих вкладень у нову інфраструктуру. Відсутність контактної мережі також підвищує безпеку на дорозі. Часті аварійні ситуації з тролейбусами виникають через розрив контактної мережі, що раптово зупиняє транспорт посеред дороги і створює небезпеку для учасників руху. Оскільки електробуси такого недоліку не мають, вони є більш надійними та безпечними в умовах високого щільного руху в місті.

Тому електробуси є комплексним рішенням, яке враховує екологічні, економічні і соціальні аспекти сучасних міст. Вони сприяють покращенню якості повітря, зменшенню шуму, підвищенню комфорту пасажирів і зниженню витрат на експлуатацію для транспортних компаній. З цієї причини електробуси займають важливу роль у стратегіях розвитку міського транспорту в багатьох розвинених країнах.

1.2 Аналіз способів зарядження електробусів

Одним із ключових технічних аспектів експлуатації електробусів є організація їхнього заряджання. На відміну від традиційних автобусів, яким досить просто заправити паливом, електробуси вимагають ретельно спланованої інфраструктури для забезпечення енергією. Вибір способу заряджання безпосередньо визначає конструкцію транспортного засобу, ємність акумулятора, конфігурацію ліній і загальну економічну ефективність системи. У світі існує кілька основних підходів до заряджання електробусів, які відрізняються залежно від місця, часу, технічних засобів та тривалості заряджання. Відповідно до класифікації, прийнятої у багатьох технічних дослідженнях, головними методами є нічна зарядка на депо, зарядка на кінцевій зупинці, зарядка на проміжних зупинках і заряджання за допомогою індукційної передачі енергії.

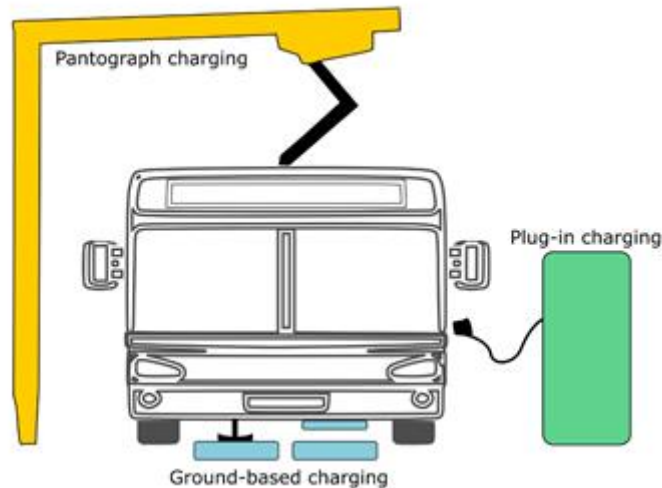


Рисунок 1.1 – Демонстрація способів зарядки електробусів

Кожен із наведених вище методів має свої технічні особливості, переваги та обмеження, що визначають його доцільність у конкретних умовах міської транспортної системи. Нижче детальніше розгляну кожний із них.

Нічне заряджання в депо є найстарішим та найтрадиційнішим методом заряджання електробусів. Його концепція дуже проста: наприкінці робочого дня електробуси повертаються до депо, підключаються до зарядної станції й заряджаються протягом ночі (протягом 6–8 годин). Вранці вони виїжджають на маршрут із повністю зарядженими акумуляторними тяговими батареями і можуть ефективно працювати весь день без додаткової підзарядки.

Щоб електробуси, заряджені на депо, могли проїхати весь щоденний маршрут без підзарядки, їх обладнують акумуляторами великої ємності, зазвичай щонайменше 250–400 кВт·год. Для порівняння: акумулятори електробусів, що заряджаються під час руху, мають ємність лише 35–80 кВт·год, що яскраво віддзеркалює значну різницю в способах забезпечення енергією.



Рисунок 1.2 — Класифікація способів зарядження електробусів

Кожен із зазначених методів має свої технічні особливості, плюси й мінуси, що впливають на їхню придатність у різних умовах міської транспортної системи. Нижче детально проаналізовано ці аспекти.

Головною економічною перевагою цієї системи є можливість використовувати нічні тарифи на електроенергію. У багатьох країнах нічні тарифи суттєво дешевші за денні. Наприклад, в Україні нічний тариф може бути на 30–50% нижчим, ніж у години пікового навантаження, що зменшує операційні витрати транспортних операторів у довгостроковій перспективі [6]. Крім того, нічна зарядка рівномірно розподіляє навантаження на електромережу та запобігає денним пікам споживання, що важливо для стабільності міської електромережі.

Ще однією перевагою є простота зарядної інфраструктури на всьому маршруті. Не потрібно встановлювати додаткові зарядні станції на зупинках або в терміналах. Зарядження здійснюється через стандартні роз'єми (CCS Combo, CHAdeMO або спеціальні промислові), що робить технологію доступною навіть для технічного персоналу.

Незважаючи на ці переваги, процес зарядження в депо має кілька важливих обмежень з технічної та економічної точок зору. Акумулятори великої ємності значно збільшують вагу транспортного засобу. Акумулятори ємністю 300–400 кВт·год можуть важити 2-3 тонни, що зменшує вантажопідйомність автобуса та

кількість пасажирів. Крім того, простір, необхідний для встановлення акумуляторного блоку, займає частину місця, призначеного для пасажирів або технічного обладнання.

Основною проблемою є необхідність встановлення високопродуктивних зарядних станцій у гаражі для кожного використовуваного транспортного засобу. При автопарку з 50-100 автобусів це потребує значних вкладень у електричну інфраструктуру, включаючи підстанцію, кабельну мережу і систему керування зарядкою.

Необхідно особливо стежити за проблемою виходу з ладу акумуляторів. Найпоширенішими видами для електробусів є літій-іонні (Li-Ion) та літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори. Хоча технології постійно вдосконалюються, їхній термін служби в екстремальних умовах складає приблизно 3-5 років, після чого знижується їхня ємність і їх доводиться замінювати. Вартість заміни акумуляторного блоку може становити 40-50% від початкової ціни електробуса, що створює значне фінансове навантаження для транспортних компаній [5].

Вплив температури навколишнього середовища на стан акумулятора є важливим. Літій-іонні акумулятори дуже чутливі до екстремальних температур. При низьких температурах (нижче -10 °C) їхня ємність може зменшуватися тимчасово на 20-40%, що створює значні труднощі в кліматичних умовах України, особливо зимою.

Найбільш підходящим способом для зарядження на кінцевому пункті є варіант електробусу через пантограф.

Найвідомішими прикладами комерційного застосування електробусів є системи Capabus і TOSA (Trolleybus Optimisation Système Alimentation), реалізовані компанією ABB у Женеві, Швейцарія [8]. У цій системі троллейбус за допомогою автоматичного пантографа, що знімається з даху, заряджається на терміналі за 15-20 секунд, після чого рухається до наступної зарядної станції (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Система швидкого заряджання TOSA, встановлена на одній із зупинок у Женеві

Метод заряджання на зупинках з короткими зупинками під час руху є одним із найдинамічніших підходів у сфері електричного громадського транспорту. Його суть полягає в тому, щоб замість тривалого заряджання в депо, електричні автобуси заряджалися поступово протягом робочого дня на терміналах або на спеціальних проміжних зупинках. Такий підхід дозволяє використовувати на електроавтобусах акумулятори меншої ємності (зазвичай 35–120 кВт·год), що допомагає знизити вагу транспортного засобу, збільшити пасажиромісткість та зменшити витрати. Це принципово відрізняється від заряджання у депо, тому періодична зарядка стає все більш поширеною у сучасних транспортних системах.

Для заряджання під час короткочасних зупинок найчастіше використовують пантографну систему. Це пристрій для збору струму, розташований на даху тролейбуса, який автоматично піднімається, щоб з'єднатися з контактною мережею, встановленою на зупинці. Процес підключення та відключення виконується автоматично за кілька секунд без участі водія чи технічного персоналу.

Заряджання за допомогою пантографа має два основні типи конструкцій: пантограф, встановлений на транспортному засобі, та зворотний пантограф, розміщений на інфраструктурі. Пантограф, розташований на транспортному засобі, — це рухома частина, що знаходиться на даху автобуса і піднімається вгору для контакту з нерухомим контактним проводом на зупинці. Така система застосовується, зокрема, у компаніях Heliox і Siemens. Зворотний пантограф, встановлений на інфраструктурі, має рухома частину, що опускається зверху до контактної платформи на даху автобуса. Саме ця система використовується в системах TOSA від ABB та SLS від Schunk [9].

Потужність проміжних зарядних станцій зазвичай коливається від 150 до 600 кВт, що забезпечує подачу значної кількості енергії під час коротких зупинок автобуса (зазвичай 3-10 хвилин на терміналі та 20-40 секунд на проміжній зупинці). У таблиці 1.1 нижче представлено порівняння основних методів зарядки електробусів за ключовими технічними характеристиками.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика способів зарядження електробусів

Параметр	Нічне в депо	Кінцева станція	Проміжна зупинка	Суперконденсатор
Ємність батареї	250–400 кВт·год	80-120 кВт·год	35-80 кВт·год	5-15 кВт·год
Потужність зарядки	40-150 кВт	150-450 кВт	300-600 кВт	500-1000 кВт
Час зарядження	6-8 годин	5-15 хвилин	20-60 секунд	8-20 секунд
Автономність	Весь день	20-40 км	3-8 км	3-5 км
Інфраструктура на маршруті	Не потрібна	Кінцеві зупинки	Кожна зупинка	Кожна зупинка
Вплив температури	Високий	Середній	Середній	Мінімальний

Термін служби батареї	3-5 років	5-8 років	5-8 років	15-20 років
-----------------------	-----------	-----------	-----------	-------------

Найсучаснішими технологіями є бездротове індукційне зарядження.

Безконтактна індукційна зарядка — це найновіший технічний спосіб заряджання електробусів, і наразі вона активно розробляється та впроваджується поетапно. Вона відрізняється тим, що між транспортом та зарядною інфраструктурою не потрібно фізичного контакту. Енергія передається через електромагнітне поле, яке створюється між котушками, розміщеними в дорожньому покритті та підлозі автобуса.

Принцип роботи базується на явищі електромагнітної індукції. Первинна котушка, розташована на поверхні дороги біля зупинки або маршруту, створює змінне магнітне поле, яке генерує струм у вторинній котушці, що розміщена під транспортом. Така електроенергія безпосередньо передається до акумулятора або електродвигуна. Зазвичай відстань між котушками становить 10–20 см, що дозволяє заряджати автобус без точного вирівнювання над зарядною панеллю.



Рисунок 1.4 — Безконтактна індукційна зарядка електробуса на зупинці

Одним із найбільш відомих проєктів у цій галузі є система WAVE (Wireless Advanced Vehicle Electrification), впроваджена в американському місті Солт-Лейк-Сіті. Вона дає електробусу можливість отримувати індукційне зарядження потужністю до 250 кВт на кінцевій зупинці. Серед подібних систем — PRIMOVE від Bombardier, Qualcomm Halo, а також система динамічної індукційної зарядки OLEV (Online Electric Vehicle), розроблена Корейським інститутом науки і

технологій (KAIST), які вже пройшли випробування [11, 12]. Ці системи забезпечують безперервне заряджання автобуса під час його проходження через зарядну зону, яка вбудована в дорожнє покриття.

Відсутність механічного контакту є важливою перевагою індукційної зарядки для підвищення її надійності та безпеки. Це позбавляє від зносу контактних частин, проблем з корозією роз'ємів, ризиків ураження електричним струмом для екіпажу та пасажирів, а також пошкоджень обладнання через акт вандалізму. В результаті, довгостроково це допоможе значно знизити витрати на обслуговування зарядної інфраструктури.

Також важливі переваги розглядаються з точки зору ландшафту та містобудування. Оскільки вся зарядна інфраструктура прихована під дорожнім покриттям або під підлогою автобуса, вона не порушує естетичного вигляду міського середовища та усуває потребу у великих зарядних станціях або пантографних конструкціях над зупинками. У історичних центрах або туристичних районах цей аспект може стати ключовим фактором для впровадження цієї технології.

Крім того, бездротова зарядка не потребує участі водія і виконується автоматично. Автобусу достатньо лише зупинитися в *designated* місці. Система автоматично визначає місце розташування транспортного засобу і починає передачу енергії.

Найбільший технічний недолік індуктивної зарядки — її нижча ефективність порівняно з контактним методом. Сучасні безконтактні системи передачі енергії мають ефективність від 85 до 92%, тоді як у контактних системах цей показник становить від 93 до 97% [11, 12]. Хоча ця різниця здається незначною, враховуючи великі обсяги енергії, що споживаються розгалуженою транспортною мережею, такі втрати мають важливе економічне значення.

Висока вартість інфраструктури є одним із головних факторів, що стримують впровадження цієї технології. Вбудовування зарядних котушок у дорожнє покриття потребує масштабних земляних робіт і дорогої спеціальної техніки, що значно збільшує початкові інвестиційні витрати порівняно з

пантографами або дрововими системами. Також ремонт або заміна вбудованого обладнання є технічно складнішим процесом у порівнянні з обслуговуванням наземних зарядних станцій.

Зараз бездротова зарядка здебільшого знаходиться на стадії пілотних проєктів або обмеженого комерційного використання, але з урахуванням розвитку технологій очікується, що за найближчі 10 років вона стане більш поширеною.

Проаналізувавши всі головні методи заряджання електробусів, можемо зробити висновок, що жоден з них не є універсальним рішенням для всіх умов експлуатації. Вибір найбільш відповідного способу залежить від різних факторів, таких як пробіг, частота рейсів, стан електроінфраструктури, кліматичні умови, фінансові можливості транспортної компанії та міські обмеження. У таблиці 1.2 наведено порівняльну оцінку всіх розглянутих способів за економічними та експлуатаційними критеріями.

Таблиця 1.2 – Порівняльна оцінка способів зарядження за експлуатаційними критеріями

Критерій	Нічне в депо	Кінцева станція	Проміжна зупинка	Суперконденсатор	Бездротове
Початкові інвестиції	Середні	Середні	Високі	Високі	Дуже високі
Операційні витрати	Низькі	Середні	Середні	Низькі	Низькі
Гнучкість маршруту	Висока	Середня	Низька	Низька	Середня
Придатність для довгих маршрутів	Висока	Висока	Низька	Дуже низька	Середня
Надійність в умовах холодного клімату	Низька	Середня	Середня	Висока	Середня
Рівень автоматизації	Низький	Середній	Високий	Високий	Дуже високий

Зрілість технології	Висока	Висока	Середня	Середня	Низька
---------------------	--------	--------	---------	---------	--------

Згідно з міжнародним досвідом, для більшості міських транспортних систем найефективнішим є поєднання нічної зарядки в депо для довгих маршрутів і зарядки на кінцевих зупинках для середніх. Багато європейських міст, таких як Амстердам, Варшава, Відень і Гельсінкі, використовують цей комплексний підхід, оснащуючи електробуси системами зарядки, пристосованими до кожного виду маршруту.

У випадку України, через велику застарілість міських електромереж, суворі зимові температури та обмежені інвестиції з боку місцевої влади, найдоцільніше на початковому етапі — зосередитися на заряджанні в депо. Після накопичення досвіду експлуатації та залучення фінансування з програм ЄС, спрямованих на модернізацію міської інфраструктури, слід поступово розширювати інфраструктуру до кінцевих зупинок.

1.3 Переваги і недоліки зарядження електробусів на кінцевих зупинках

Зарядження електробусів на кінцевих зупинках є одним із найпоширеніших підходів у сучасних системах міського електротранспорту. Цей метод передбачає, що електробуси заряджаються під час природних технологічних пауз між рейсами, тобто коли транспортний засіб вже стоїть на кінцевій станції перед відправленням у зворотний напрямок. Це дає змогу без зусиль інтегрувати процес зарядки у розклад руху без необхідності виведення автобусів з експлуатації або створення додаткових перерв.

Цей підхід отримав широке поширення в Європі за останнє десятиліття. Серед міст, які успішно впровадили заряджання на кінцевих зупинках, можна виділити Амстердам (Нідерланди), де з 2018 року компанія GVB експлуатує парк електробусів «Ebusco» з заряджанням на кінцевих зупинках, а також Гельсінкі (Фінляндія), Познань, Варшаву (Польща) та Стокгольм (Швеція). Досвід цих міст *convincingly* доводить, що за умови правильного планування

інфраструктури та розкладу руху заряджання на кінцевих зупинках є технічно зрілим і економічно обґрунтованим рішенням для міського транспорту [12].

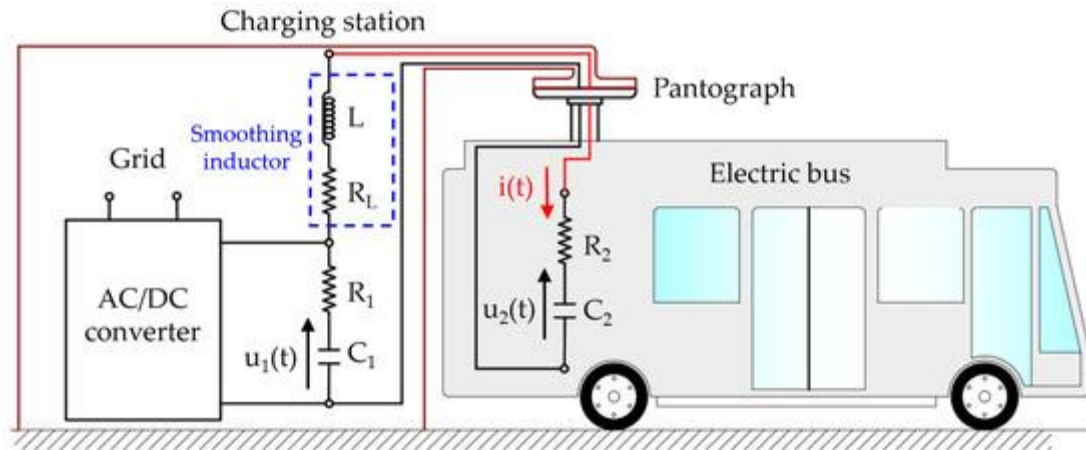


Рисунок 1.5 — Схема організації зарядження електробусів на кінцевій зупинці

Заряджання на кінцевих зупинках зазвичай відбувається за допомогою пантографних систем, наведення у попередньому розділі, або через стаціонарні кабельні з'єднання типу CCS Combo 2 — стандарт для швидкого зарядження в Європі. Потужність зарядних станцій зазвичай коливається від 150 до 450 кВт, що дозволяє за 5-20 хвилин стоянки передати достатню кількість енергії для наступного рейсу.

Однією з основних переваг заряджання на кінцевій зупинці є можливість використовувати акумулятори меншої ємності в порівнянні з заряджанням у депо. Оскільки електробус після кожного рейсу підзаряджається, запас енергії в батареї достатній для одного рейсу в одному напрямку, а не для всього робочого дня. Це дозволяє зменшити ємність акумулятора з 250-400 кВт·г, що характерно для нічного зарядження, до 80-120 кВт·г, що є принциповою конструктивною різницею.

Зменшення ємності акумулятора викликає низку позитивних ефектів. По-перше, зменшується маса транспортного засобу: акумулятор на 300 кВт·год важить до 2,5-3 тонни, тоді як батарея на 100 кВт·год — приблизно 700-900 кг. Це різниця у 1,5-2 тонни безпосередньо підвищує корисне навантаження і пасажиромісткість автобуса. По-друге, легший транспортний засіб краще використовує енергію — менша маса сприяє зниженню споживання енергії на

кілометр, що знижує експлуатаційні витрати. По-третє, менші розміри акумуляторного блоку звільняють простір у салоні, що можна використати для збільшення кількості сидінь або для кращої організації внутрішнього простору.

Згідно з дослідженнями Jefferies та Göhlich (2020) [15], перехід від заряджання в депо до заряджання на кінцевих зупинках для типового міського маршруту довжиною 12-15 км дозволяє зменшити масу електробуса на 15-20%. Це, у поєднанні з частішими підзарядками, забезпечує економію енергії у розмірі 8-12% порівняно з нічним зарядженням.

Ще одна ключова перевага — здатність електробусів працювати весь робочий день без тривалих перерв на зарядку. На відміну від сценаріїв, де транспортний засіб має повернутися до депо після виснаження батареї, електробус із зарядкою на кінцевій зупинці залишається на маршруті цілий день, виконуючи рейс за рейсом із підзарядкою на кінцевій зупинці.

Це також означає, що розмір парку транспортних засобів може бути меншим — не потрібно утримувати резервні автобуси на випадок заміни тих, що заряджаються. За даними UITP [16], ефективна система зарядки на кінцевих зупинках може підвищити підстанову використання рухомого складу на 10-15% у порівнянні з зарядкою в депо, що є важливим економічним аргументом для транспортних компаній.

Менша ємність акумулятора безпосередньо зменшує початкову вартість електробуса. Акумуляторний блок — один із найкоштовніших компонентів електромобіля, його ціна може сягати 30-45% від загальної вартості автобуса. Отже, скорочення ємності батареї вдвічі або втричі значно знижує закупівельну ціну такого рухомого складу, що особливо важливо для підприємств громадського транспорту з обмеженим бюджетом.

Незважаючи на очевидні переваги, заряджання на кінцевій зупинці має кілька істотних недоліків. Найзначущішим з них є потреба у встановленні потужних зарядних станцій безпосередньо на кінцевих зупинках маршруту. На відміну від заряджання у депо, де вся зарядна інфраструктура зосереджена в одному місці — депо, - заряджання на кінцевій зупинці вимагає розподіленої

інфраструктури в різних частинах міста, часто далеко від існуючих потужних електромереж.

Зарядні станції потужністю 150-450 кВт створюють значне навантаження на міську електромережу. Для їх підключення зазвичай потрібно будівництво або модернізація трансформаторних підстанцій, прокладання нових кабелів і отримання технічних умов від енергопостачальника. Це пов'язано з великими капітальними витратами та тривалими процедурами погодження і реалізації. За даними European Commission (2021) [17], вартість підключення однієї зарядної станції потужністю 300 кВт до міської мережі залежить від відстані до найближчої підстанції і може становити від 50 000 до 300 000 євро, що є значною частиною загального бюджету електрифікації маршруту.

Як альтернативне рішення для кінцевих зупинок, які розташовані далеко від основної електромережі, пропонується живлення зарядних станцій від відновлюваних джерел енергії — сонячних панелей у поєднанні з системами зберігання енергії. Це дає змогу частково або повністю зробити зарядну станцію автономною, зменшити навантаження на електромережу і знизити операційні витрати на електроенергію. Пілотні проекти такого типу вже реалізовані, зокрема, в Іспанії та Нідерландах, де сонячні панелі, встановлені над навісами на автобусних зупинках, частково забезпечують енергією зарядну інфраструктуру.



Рисунок 1.6 — Приклад зарядної станції з сонячними панелями на кінцевій зупинці електробуса

Іншим значним недоліком є можливе збільшення часу очікування на кінцевій станції через необхідність зарядки. Хоча зарядка відбувається під час природної технологічної паузи між рейсами, ця пауза має бути достатньою для передачі потрібної кількості енергії. З потужністю зарядної станції 150-300 кВт і необхідністю передати 30-60 кВт·год, час зарядки триватиме від 6 до 20 хвилин.

Якщо розклад руху передбачає коротші інтервали між рейсами, транспортний засіб може не мати достатньо енергії для наступного рейсу, що може призвести до розрядження акумулятора на маршруті. Навпаки, штучне збільшення часу стоянки для повного заряджання може знизити частоту руху та погіршити якість транспортного обслуговування для пасажирів і операторів, що є неприпустимим.

Рішення цієї проблеми вимагає ретельного математичного моделювання графіка руху з урахуванням параметрів зарядки, що є складним завданням для транспортного планування. Дослідження Kunith et al. (2017) [18] показують, що оптимізація графіка з урахуванням зарядки допомагає знайти баланс між частотою руху та енергозабезпеченням маршруту, але для цього необхідне використання спеціалізованого програмного забезпечення та значних аналітичних ресурсів.

Зарядження на кінцевих зупинках ускладнюється в умовах інтенсивного руху, коли на одній станції одночасно стоять кілька електробусів. У такій ситуації потрібно мати чіткий графік заряджання, щоб визначити порядок підключення транспортних засобів до зарядних станцій і ефективно розподілити навантаження між ними.

Одним із актуальних питань організації роботи електробусного маршруту є визначення раціонального способу заряджання рухомого складу на кінцевій зупинці. У практиці експлуатації електробусів виділяють кілька основних підходів: заряджання протягом одного рейсу, за оборотний рейс, упродовж кількох рейсів, а також під час обідніх перерв водіїв. Вибір конкретного способу визначається параметрами маршруту, тривалістю простою на кінцевій зупинці,

потужністю зарядної станції та технічними характеристиками акумуляторної батареї електробуса.

Зарядження за один рейс передбачає, що електробус отримує необхідну кількість енергії за час стоянки на одній із кінцевих зупинок маршруту. Такий підхід вимагає встановлення зарядних станцій достатньо великої потужності, проте дозволяє зберегти незмінний графік руху без будь-яких додаткових простоїв. При заряджанні за оборотний рейс підзарядка відбувається на обох кінцевих зупинках, що дає змогу розподілити енергоспоживання між двома точками та використовувати зарядні пристрої меншої потужності. Зарядження упродовж кількох рейсів застосовується у випадках, коли тривалість стоянки на кожній зупинці є обмеженою — акумулятор поповнюється поступово, і загальний заряд відновлюється до необхідного рівня лише після кількох оборотів. Окремим варіантом є зарядження під час обідніх перерв водіїв: у цей час електробус тривалий час залишається без руху, що дозволяє провести більш повне зарядження навіть за умови використання зарядних станцій середньої потужності.

Вибір оптимального способу зарядження безпосередньо пов'язаний з питанням кількості рухомого складу на маршруті. За умови достатньої потужності зарядної інфраструктури та правильно організованих інтервалів стоянки на кінцевій зупинці можливе скорочення кількості електробусів у порівнянні з традиційними маршрутами — адже електробус не потребує тривалого відстою в депо для дозаправки. Водночас, якщо зарядна потужність є недостатньою або час простою на зупинці занадто малий, виникає необхідність залучення додаткових одиниць рухомого складу для підтримання заданого інтервалу руху. Таким чином, параметри зарядної станції та режим зарядження є визначальними чинниками при формуванні оптимального парку електробусів маршруту.

Без належного планування може виникнути ситуація, коли кілька автобусів одночасно приєднуються до мережі, створюючи пікове навантаження, що перевищує можливості підстанції. Це може викликати спрацювання захисту,

перебої у зарядці й зрив розкладу руху. Щоб уникнути таких проблем, використовують системи керування зарядкою «Charging Management Systems, CMS», які автоматично координують підключення транспортних засобів, розподіляють навантаження та оптимізують споживання електроенергії з урахуванням тарифних зон і стану мережі.

Кількість зарядних станцій, необхідних на одній кінцевій зупинці, залежить від частоти маршруту, часу зарядки та інтервалу між рейсами. Для завантажених маршрутів із інтервалом 5–7 хвилин може знадобитися від 3 до 6 зарядних місць, що суттєво підвищує капітальні витрати на інфраструктуру.

Окрема проблема полягає в організації електропостачання кінцевих зупинок, розташованих на периферії міста або у районах з слабкою електромережею. Там будівництво тягових підстанцій і прокладання кабельних ліній необхідної потужності може бути технічно складним і економічно нерентабельним. Підключення високопотужної зарядної станції до застарілої розподільчої мережі без її модернізації може викликати нестабільність напруги і негативно вплинути на стабільність електропостачання сусідніх споживачів.

В українських реаліях ця проблема стає особливо актуальною: значна частина міської електромережі побудована ще за радянських часів і неспроможна витримати підключення потужних сучасних споживачів. За даними Укренерго [19], знос розподільних мереж у кількох регіонах України перевищує 60-70%, що створює додаткові технічні ризики при введенні зарядної інфраструктури для електробусів без попередньої модернізації мережі.

Значну роль в експлуатації зарядної інфраструктури на кінцевих зупинках відіграє її надійність та швидке усунення несправностей. Сучасні зарядні станції обладнані системами самодіагностики, що в реальному часі слідкують за параметрами роботи обладнання та автоматично оповіщають про відхилення від норми. Однак у випадку серйозних технічних несправностей автоматична діагностика лише виявляє проблему - для її повного усунення потрібне фізичне втручання технічного персоналу, який в змозі дістатися до вибулої з роботи зарядної станції тільки через певний час.

Час реагування ремонтної бригади залежить від організації сервісного обслуговування і може становити від кількох десятків хвилин до кількох годин. Протягом цього періоду зарядна станція не працює, що безпосередньо впливає на рух електробусів по маршруту. На відміну від зарядки в депо, де вихід з ладу однієї з кількох зарядних станцій є некритичним, несправність однієї станції на кінцевій зупинці може цілком паралізувати роботу маршруту.

Щоб зменшити цей ризик, рекомендується встановлювати дублюючі зарядні станції на кожній кінцевій зупинці та укладати договори на сервісне обслуговування з гарантійним часом реагування до 2-4 годин. Також доцільно розробити резервні схеми руху на випадок довготривалого виходу із ладу зарядних станцій - наприклад, тимчасове залучення дизельних або гібридних автобусів.

Для повної оцінки обґрунтованості впровадження заряджання на кінцевих пунктах слід врахувати не тільки технічні, а й економічні чинники цього підходу у порівнянні з альтернативними рішеннями.

Таблиця 1.3 — Порівняння економічних показників заряджання на кінцевих пунктах та заряджання в депо

Показник	Зарядження на зупиночних пунктах	Зарядження в депо
Вартість електробуса	Нижча (менший акумулятор)	Вища (великий акумулятор)
Вартість інфраструктури	Розосереджена, висока	Централізована, середня
Витрати на електроенергію	Денний тариф	Нічний тариф (нижчий)
Коефіцієнт використання рухомого складу	Вищий	Нижчий
Витрати на обслуговування акумулятора	Нижчі	Вищі
Резервний парк автобусів	Менший	Більший
Ризик зупинки маршруту	Вищий	Нижчий

Як видно з таблиці 1.3, структура витрат на зарядку на терміналі і в гаражі суттєво різняться. Зарядка на кінцевій станції має переваги щодо вартості транспортного засобу та експлуатаційних витрат, але є менш ефективною порівняно з зарядкою в депо за вартістю електроенергії і надійністю. Тому вибір способу зарядки вимагає окремого техніко-економічного аналізу, враховуючи пробіг кожного маршруту, частоту руху та наявну інфраструктуру.

Зарядка електробусів на кінцевому пункті є зрілим технічним рішенням, яке широко застосовується і має кілька важливих переваг у порівнянні з нічною зарядкою у депо. Використання акумуляторів з меншою ємністю не тільки зменшує вагу та вартість транспортних засобів, а також підвищує їх енергоефективність і потужність

Зарядання на кінцевій зупинці вимагає більш високих стандартів щодо зарядної інфраструктури, управління часом і надійності обладнання. Встановлення зарядних станцій високої потужності в різних частинах міста, особливо в периферійних районах із слабкою електромережею, є суттєвим організаційним і фінансовим викликом. Щоб запобігти перериванням у роботі через збої обладнання, необхідно розробити план дій у надзвичайних ситуаціях і запровадити систему швидкого технічного обслуговування. З огляду на це, зарядка на терміналах є найбільш підходящим варіантом для маршрутів середньої дальності, де інтервали руху є достатньо довгими, а поблизу терміналів є добре розвинена електромережа. У контексті України перспективним виглядає поєднання цього підходу з постачанням енергії з відновлюваних джерел та поступовою модернізацією міських електромереж у рамках програм відновлення інфраструктури, що підтримуються ЄС.

2 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ДО РОЗРАХУНКУ ПОТУЖНОСТІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ

2.1 Методика встановлення параметрів зарядної станції на кінцевому пункті

Методика встановлення параметрів зарядної станції, що запропонована в цій бакалаврській роботі починається з встановлення середньо ходових швидкостей по перегонам. Для цього під час проведення переддипломної практики проводилися обстеження швидкості і часу руху на маршруті електроббуса із застосуванням додатків «GPS Logger» та «Геотрекер» з GPS трекером що дало змогу отримати діаграми руху автобуса. Тобто застосовувалися динамічні і гальмівні можливості звичайного автобуса подібної місткості. Результати приведених вимірювань демонструються рисунком 2.1.

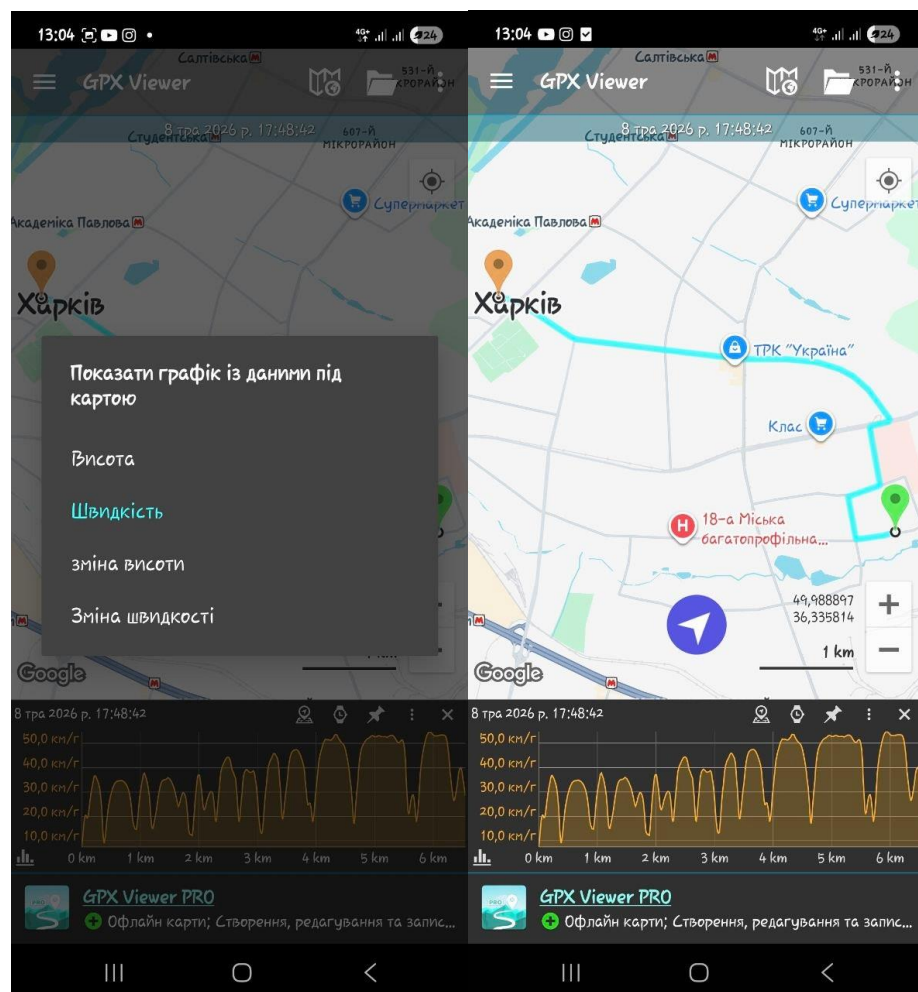


Рисунок 2.1 – Результати вимірювань коливань швидкості

Наступним кроком є визначення сили опору руху по перегонах маршруту.

Необхідна енергія електробуса витрачається на підвищення кінетичної енергії і подолання сил опору руху. Накопичена кінетична енергія після відмикання двигунів витрачається на подолання опору руху на вибігу і перетворюється у тепло в гальмівних пристроях під час гальмування. Отже, розрахувавши роботу під час гальмування електробусу і для подолання сил опору руху, можна визначити витрати енергії.

Переходячи до відповідних розрахунків, необхідно, перш за все, врахувати, що сила опору руху є функцією квадрата швидкості руху, тому сила опору руху, що змінюється у процесі руху, замінюється середнім значенням. Сила опору руху визначають як добуток ваги електробуса G і питомого опору руху w .

Питомий опір руху w для двохосьових електробусів визначають за формулою:

$$\omega = (12 + 0,0003 \cdot V^2) \pm i, \quad (2.1)$$

де V – швидкість руху, м/с;

i – ухил дороги, проміле.

Для обліку профілю треба розуміти, що підйом підвищує опір руху, тоді величина i має знак «+», а у випадку спуску «-».

Середнє значення питомого опору руху визначають при швидкості $1,1 \cdot V_{cx}$, тобто у разі швидкості, більшої на 10 %, ніж середньоходова швидкість:

$$\omega_{сер} = 12 + 0,0003(1,1 \cdot V_{cx})^2 \pm i. \quad (2.2)$$

Середній питомий опір руху під час гальмування визначають для швидкості $0,7 \cdot V_{cx}$:

$$\omega_{гал} = 12 + 0,0003(0,7 \cdot V_{cx})^2 \pm i. \quad (2.3)$$

Середній питомий опір, який долається в період розгону електробуса, розраховують для швидкості, меншою на 30 %, ніж швидкість закінчення розгону:

$$\omega_{\Pi} = 12 + 0,0003(0,7 \cdot V_{\Pi})^2 \pm i. \quad (2.4)$$

Швидкість пуску V_n визначають за діаграмами руху, а саме відмічають точку початку гальмування на діаграмі руху, визначають швидкість гальмування і довжину шляху гальмування для кожного перегону.

Наступним етапом запропонованої методики є розрахунок витрат енергії на рух під час рейсу. Спочатку встановлюють значення ваги, для чого необхідно знати його загальну масу, яка складається з маси тари m_T і маси пасажирів m_{Π} . Отже вагу електробусу визначаємо за формулою:

$$G = (m_T + m_{\Pi})g, \quad (2.5)$$

де g – прискорення вільного падіння, m/c^2 .

Вагу маси пасажирів розраховуємо, виходячи з кількості пасажирів і маси одного пасажиря (70 кг): $m_n = 0,07 \cdot N_{nac}$.

З урахуванням того, що кінетична енергія транспортного засобу складається з кінетичної енергії поступального руху усієї маси і енергії обертових частин (коліс, осей, елементів приводу), потрібно у розрахунку враховувати інерцію обертових частин. Коефіцієнт інерції обертових частин $(1 + \gamma)$ приймають для електробусу 1,10...1,15. Отже необхідна для розрахунку кінетичної енергії маса з урахуванням $(1 + \gamma) = 1,12$ буде визначатися з виразу

$$1000 m \cdot 9,8 / 1,12 = G;$$

$$m = 114 \cdot G.$$

Тепер, маючи усі необхідні дані, можемо розрахувати енергію, що йде на змінювання кінетичної енергії і подолання опору руху за формулою:

$$W_{рух} = G \cdot \omega_{сер} \cdot L_{пер} + 114 \cdot G \frac{V_{сх}^2}{2} + G \cdot \omega_{гал} \cdot l_{гал} \quad (2.6)$$

де $L_{пер}$ – довжина перегону, м;

$l_{гал}$ – довжина ділянки гальмування, км (береться довжина гальмівного шляху в режимі гальмування).

Для зручності розрахунку розкладемо формулу (2.6) на складники:

Розрахунок енергії, що йде на подолання опору руху, виконуємо за формулою:

$$W_{\text{опор рух}} = G \cdot \omega_{\text{сер}} \cdot L_{\text{нер}} ; \quad (2.7)$$

Розрахунок енергії, що йде на змінювання кінетичної енергії, виконуємо за формулою:

$$W_{\text{кін енер}} = 114 \cdot G \frac{V_{\text{сх}}^2}{2} ; \quad (2.8)$$

Розрахунок енергії, що витрачається на гальмування, коли двигун працює в генераторному режимі, виконуємо за формулою:

$$W_{\text{гал}} = G \cdot \omega_{\text{гал}} \cdot l_{\text{гал}}. \quad (2.9)$$

За наступним етапом проводимо розрахунок енергії рекуперації протягом рейсу. Слід відзначити, що всі електробуси обладнанні системою рекуперації гальмівної енергії. При гальмуванні звичайного транспортного засобу гальмівна система перетворює його кінетичну енергію в теплову та розсіює цю енергію у атмосферу (через гальмівні механізми коліс). Виходячи з відомих законів фізики зміна величини швидкості транспортного засобу від початку гальмування V_{22} до закінчення V_{21} призводить до зміни кінетичної енергії всього транспортного засобу:

$$\Delta W_{\text{рек}} = (0,6 \dots 0,8) \cdot \frac{m}{2} (V_{\text{Г}2}^2 - V_{\text{Г}1}^2), \quad (2.10)$$

де m – маса транспортного засобу, кг.

У реальних умовах міського руху рекуперація електробуса в змозі повернути в акумуляторну батарею від 20 % до 40 % енергії, яка була витрачена під час руху транспортного засобу.

Через значну масу електробусів, яка становить 12 до 18 тон у спорядженому стані та постійний режим «розгін-гальмування» у міському русі, система рекуперації здатна компенсувати майже третину загального

енергоспоживання під час руху перегonom. Такі виробники, як Ebusco, фіксують реальні добові показники повернення енергії за рахунок рекуперації на рівні до 35–38 %.

Під час рекуперативного гальмування електродвигун транспортного засобу переключється в режим генератора, а електрична енергія, що їм виробляється під час гальмування, використовується для заряджання акумуляторної батареї. Враховуючи витрати на механічне тертя у різних складових двигуна та трансмісії електробуса, а також дорожні умови, близько 80 % кінетичної енергії при такому гальмуванні перетворюється у електричну енергію.

Як показує практика, рекуперація ефективна до 10 км/год, тобто починає діяти від швидкості початку гальмування. Тобто для розрахунків з діаграм руху обираємо змінювання швидкості в режимах гальмування.

2.2 Характеристика маршруту, для якого виконуються розрахунки

Для розрахунку був обраний маршрут автобусу 81, кінцеві станції котрого ст. м. Академіка Барабашова (на рис.2.2 позначена «А») та 626 мікрорайон (на рис.1 позначена «В»). Маршрут обслуговує комунальне підприємство «Салтівське трамвайне депо». Довжина маршруту складає приблизно 6,71 км. Перегони розташовані між такими зупиночними пунктами: ст. м. Академіка Барабашова, пр. Ювілейний, вул. Гвардійців-Широнінців, 6-та поліклініка, пр. Тракторобудівників, вул. Познанська, Салтівський РЕМ, 602-й мікрорайон, Медкомплекс, вул. Амосова, вул. Сонячна, вул. Єдності, 626-й мікрорайон. Середні інтервали в будні дні становлять 50 хвилин, та від 47 до 109 хвилин у вихідні дні.

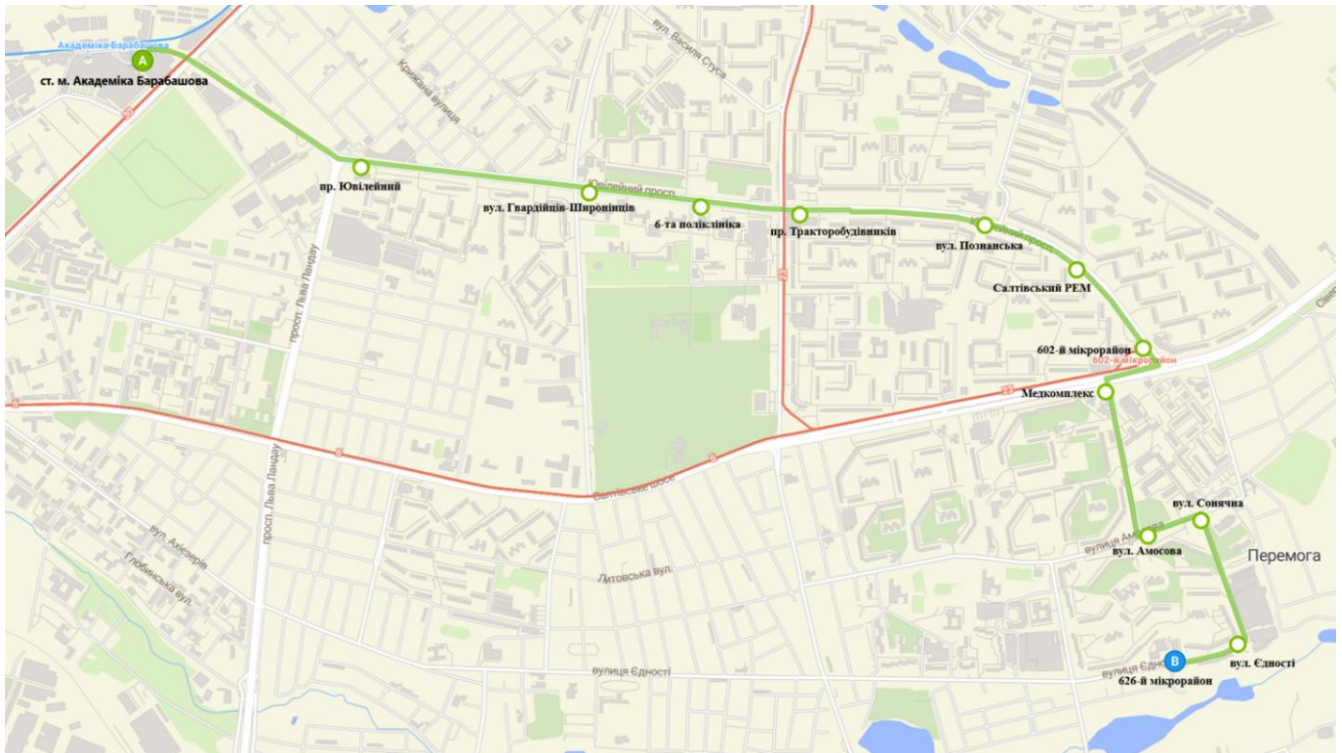


Рисунок 2.2 – Схема маршруту автобуса № 81

На підставі вимірювань (рис. 2.1) були побудовані діаграми руху по перегону (рис. 2.3), які надалі використовувалися для розрахунку середньоходових швидкостей. Для цього використовувалися довжини перегонів та встановлювався час руху ними за рисунком 2.2.

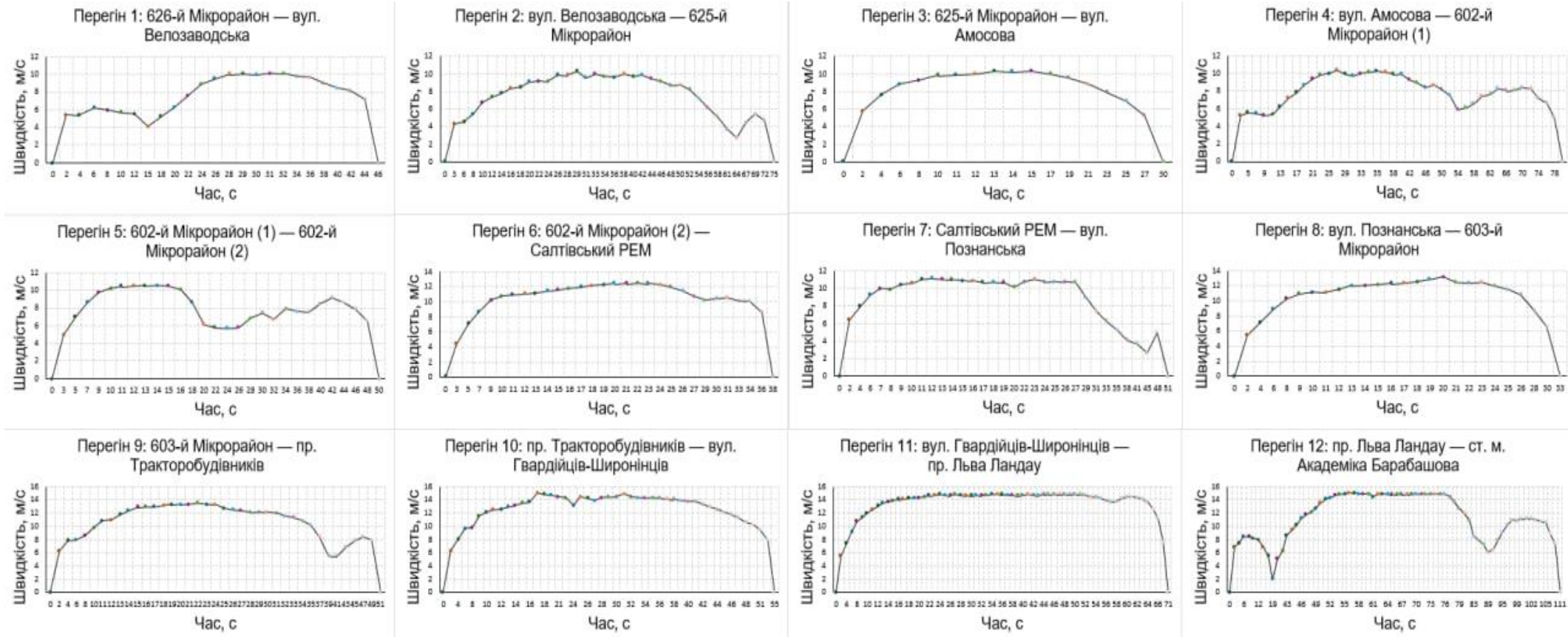


Рисунок 2.3 – Діаграми руху по перегонам маршруту автобуса № 81

3 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЗАРЯДНОЇ СТАНЦІЇ

3.1 Розрахунок середньоходових швидкостей за діаграмами руху електробуса по перегонам маршруту

Згідно отриманих даних (рис. 2.3) розраховуємо середньо ходові швидкості на перегоні і час руху по перегонута складає загальну таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики перегонів рейсу автобуса

№ пере- гону	Назва перегону	Довжи на перего ну, м	Час руху по перегону , с	Швидкість, м/с	Швидкіст ь, км/год
1	«626-й Мікрорайон — вул. Велозаводська»	371,5	46	8,1	29,1
2	«вул. Велозаводська — 625-й Мікрорайон»	566,5	75	7,6	27,2
3	«625-й Мікрорайон — вул. Амосова»	257,8	30	8,6	30,9
4	«вул. Амосова — 602-й Мікрорайон (1)»	664,7	81	8,2	29,5
5	«602-й Мікрорайон (1) — 602-й Мікрорайон (2)»	422,8	50	8,5	30,4
6	«602-й Мікрорайон (2) — Салтівський РЕМ»	392,9	38	10,3	37,2
7	«Салтівський РЕМ — вул. Познанська»	408,8	51	8,0	28,9
8	«вул. Познанська — 603-й Мікрорайон»	337,1	33	10,2	36,8
9	«603-й Мікрорайон — пр. Тракторобудівників»	517,1	51	10,1	36,5
10	«пр. Тракторобудівників — вул. Гвардійців-Широнінців»	698,0	55	12,7	45,7
11	«вул. Гвардійців-Широнінців — пр. Льва Ландау»	934,5	71	13,2	47,4
12	«пр. Льва Ландау — ст. м. Академіка Барабашова»	971,1	111	8,7	31,5
			692 с = 11,5 хв		

3.2 Розрахунок значень опорів руху в режимах розгону і гальмування

Застосовуючи формули (1.1) – (1.4) визначаємо сили опору руху по перегонах маршруту (табл. 3.2).

Приклади розрахунків для першого перегону такі:

$$\omega = (12 + 0,0003 \cdot 8,1^2) + 18,6 = 30,6;$$

$$\omega_{\text{сер}} = 12 + 0,0003(1,1 \cdot 8,1)^2 + 18,6 = 30,84;$$

$$\omega_{\text{гал}} = 12 + 0,0003(0,7 \cdot 8,1)^2 + 18,6 = 30,70;$$

$$\omega_{\text{п}} = 12 + 0,0003(0,7 \cdot 11,2)^2 + 18,6 = 30,61.$$

Інші розрахунки зводимо до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок сил опору руху електробуса по перегонам

№	Назва перегону	$1,1 \cdot V_{cx}$, м/с	$\omega_{\text{сер}}$	$0,7 \cdot V_{cx}$ м/с	$\omega_{\text{гал}}$	$0,7 \cdot V_n$, м/с	$\omega_{\text{п}}$
1	«626-й Мікрорайон — вул. Велозаводська» 30,6	8,88	30,84	5,65	30,70	7,84	30,72
2	«вул. Велозаводська — 625-й Мікрорайон» 80,5	8,31	80,71	5,29	80,58	7,8	80,61
3	«625-й Мікрорайон — вул. Амосова» 1,5	9,45	1,77	6,02	1,61	7,84	1,64
4	«вул. Амосова — 602-й Мікрорайон (1)» 29	9,03	29,24	5,74	29,10	7,8	29,13
5	«602-й Мікрорайон (1) — 602-й Мікрорайон (2)» 5,4	9,30	5,66	5,92	5,51	8,8	5,54
6	«602-й Мікрорайон (2) — Салтівський РЕМ» -11	11,37	-10,81	7,24	-11,04	8,8	-11,00
7	«Салтівський РЕМ — вул. Познанська» 17	8,82	17,13	5,61	16,99	8,8	17,02

8	«вул. Познанська — 603-й Мікрорайон» - 10	11,24	-10,42	7,15	-10,65	9,5	-10,60
9	«603-й Мікрорайон — пр. Тракторобудівників»	11,15	5,07	7,10	4,85	9,5	4,90
10	«пр. Тракторобудівників — вул. Гвардійців-Широнінців»	13,96	-1,02	8,88	-1,36	10,92	-1,29
11	«вул. Гвардійців-Широнінців — пр. Льва Ландау»	14,48	-10,07	9,21	-10,45	10,92	-10,37
12	«пр. Льва Ландау — ст. м. Академіка Барабашова»	9,62	-2,12	6,12	-2,29	10,92	-2,25

3.3 Розрахунок витрат енергії за рейс

Для розрахунків використаний електробус «Volvo 7900 Electric» з технічними характеристиками, що представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики електробусу Volvo 7900 Electric

Маса без пасажирів	12,7 т
Повна маса	19,0 т
Максимальна швидкість	70 км/год
Місце для сидіння	35
Повна місткість (8 чоловік/м ²)	95
Двигун	Volvo Electric Motor
Потужність	200 кВт

Серійний електробус Volvo 7900 Electric використовує літій-іонну акумуляторну батарею ємністю 150 кВт·год. В експлуатації застосовується

система швидкого заряджання за допомогою пантографа стандарту OppCharge, що забезпечує поповнення заряду акумуляторної батареї на кінцевих зупинках маршруту. Електробус оснащений тяговим електродвигуном потужністю 200 кВт та системою рекуперації енергії під час гальмування. Повна маса транспортного засобу становить 19,0 т, а повна пасажиромісткість — 95 осіб. Максимальна швидкість руху електробуса досягає 70 км/год. Заряджання від пантографа здійснюється потужністю до 300–450 кВт, що дозволяє виконувати швидке поповнення запасу енергії під час експлуатації на маршруті.

Вагу маси пасажирів розраховують виходячи з кількості пасажирів і маси одного пасажира (70 кг) : $m_n = 0,070 \cdot N_{нас}$.

$$m_n = 0,070 \cdot 80 = 5,6 \text{ т};$$

Вагу електробуса з пасажирями приймаємо

$$G = (12,7 + 5,6) \cdot 9,81 = 179,5 \text{ кН}.$$

Виконуємо контрольний розрахунок за формулами (1.7) – (1.9), всі інші зводимо до таблиці 3.4.

$$W_{опор\ рух} = G \cdot \omega_{сер} \cdot L_{пер} = 179,5 \times 30,84 \times 371,5 = 2047206,4;$$

$$W_{кін\ енер} = 114 \cdot G \frac{V_{сх}^2}{2} = 114 \cdot 179,5 \frac{8,1^2}{2} = 671\,289;$$

$$W_{гал} = G \cdot \omega_{гал} \cdot l_{гал} = 179,5 \times 31,65 \times 37,2 = 204996,18$$

Розраховуємо загальну використану потужність за формулою, урахувавши дані таблиці 3.4:

$$P_{рух} = W_{рух} / 3600 = 24\,246\,462,4 / 3600 = 6,7355 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

3.4 Розрахунок кількості енергії, що економиться завдяки рекуперації протягом рейсу

За формулою (1.10) робимо розрахунки, для цього з діаграми руху кожного перегону знімаємо значення швидкості початку гальмування і кінцевої, коли закінчується електричне гальмування (10 км/год). Всі розрахунки проводимо за таблицею 3.5.

$$\Delta W_{рек} = 0,6 \times 12700 / 2 (8,16^2 - 2,5^2) = 230293,3.$$

Таблиця 3.5 – Розрахунок енергії рекуперації електробуса по перегонам

№	Назва перегону	V_{22} , м/с	V_{21} , м/с	$\Delta W_{рек}$, Дж	$P=W_{рук} / 3600$, Вт год
1	«626-й Мікрорайон — вул. Велозаводська»	8,16	2,5	230293,3	63,97
2	«вул. Велозаводська — 625-й Мікрорайон»	9,13	2,5	294395,9	81,77
3	«625-й Мікрорайон — вул. Амосова»	7,88	2,5	213301,2	59,25
4	«вул. Амосова — 602-й Мікрорайон (1)»	8,30	2,5	239009,8	66,39
5	«602-й Мікрорайон (1) — 602-й Мікрорайон (2)»	9,166	2,5	296333,3	82,31
6	«602-й Мікрорайон (2) — Салтівський РЕМ»	10,05	2,5	361432,5	100,39
7	«Салтівський РЕМ — вул. Познанська»	10,63	2,5	407425,9	113,17
8	«вул. Познанська — 603-й Мікрорайон»	11,5	2,5	484940,0	134,7
9	«603-й Мікрорайон — пр. Тракторобудівників»	8	2,5	220027,5	61,11
10	«пр. Тракторобудівників — вул. Гвардійців-Широнінців»	10,361	2,5	385200,9	107,0
11	«вул. Гвардійців-Широнінців — пр. Льва Ландау»	13,75	2,5	696515,6	193,47
12	«пр. Льва Ландау — ст. м. Академіка Барабашова»	14,80	5,6	715687,4	198,80
		11,194	2,5	453639,8	126,01
	Разом			4998203,8	1388,38

Віднімаємо отриману енергію рекуперації від загальної використаної енергії, спожитою акумуляторною батареєю.

$$P_{\text{рух з рек}} = 24\,246\,462,4 - 4\,998\,203,8 = 19\,248\,258,6 \text{ Дж.}$$

3.5 Встановлення параметрів тягової акумуляторної батареї електробуса

Далі за алгоритмом переходимо до розрахунку параметрів акумуляторної батареї, виходячи з розрахункової кількості витраченої енергії за рейс і параметрів зарядження на кінцевому пункті протягом 10 хв.

Для розрахунку акумуляторної батареї, її номінальну напругу обираємо за мінімальною напругою бортової мережі 400 В. Враховуємо, що у разі її перевищення буде спрацьовувати понижуючий перетворювач, керуючись усередненими параметрами літєвих акумуляторів, а напругу акумуляторної батареї обираємо із наступного співвідношення:

$$U = \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{повн.зар}}} \cdot U_{\text{зар}} = \frac{3,7}{4,2} \cdot 400 = 340 \text{ В.} \quad (3.1)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга обраного акумулятора;

$U_{\text{повн зар}}$ – повна напруга зарядження акумулятора.

Напруга зарядженої акумуляторної батареї приблизно на 20 % є більшою.

Розрахуємо базові параметри АКБ. Беремо потужність, яку повинен видати акумулятор на протязі всього рейсу.

Максимальне значення струму в такому випадку буде розраховуватись за наступним виразом:

$$I_{\text{сер}} = \frac{P}{U}; \quad (3.2)$$

$$I_{\text{сер}} = 27\,896 / 340 = 82,1 \text{ А}$$

Обираємо з каталогу акумулятор типу Efest 21700 3700 мА год з такими характеристиками:

- тип акумуляторного елемента: Li-ion;
- номінальна ємність: 3700 мА·год ;

- номінальна живляча напруга: 3,7 В;
- напруга повного заряду: 4,2 В;
- напруга повного розряду: 2,5 В;
- максимальна постійна струмовіддача: 35А;
- номінальний опір: 20mОм;
- рекомендований струм заряду: 2А;
- максимальний струм заряду: 4А;
- режим використання при температурі: -20~75С⁰;
- габаритні розміри: 21 x 70 мм;
- вага елемента: 73,12 гр.

Розрахуємо кількість послідовно з'єднаних акумуляторів, які необхідні для забезпечення необхідної напруги:

$$n_U = \frac{U}{U_{\text{ном.акум}}}; \quad (3.3)$$

$$n_U = 340 / 3,7 = 92.$$

де $U_{\text{ном.акум}}$ – номінальна напруга акумулятора, В.

Для досягнення напруги в 340 В необхідно з'єднати 92 акумулятори послідовно.

Враховуючи максимальне значення струму акумулятора $I_{\text{макс.акум}} = 35$ А розрахуємо мінімальну кількість акумуляторів для забезпечення середнього струму за формулою:

$$N_{\text{струм}} = I / I_{\text{акум}}; \quad (3.4)$$

$$N_{\text{струм}} = 82,1 / 35 = 2,34 \text{ шт.}$$

Для струму в 82,1 А необхідно з'єднати 3 гілки із 92 акумуляторів, паралельно. Отже ємність акумуляторної батареї буде визначаються формулою:

$$C_{\text{акум max}} = n1 \cdot I = 3 \cdot 3,7 = 11,1 \text{ А} \cdot \text{год.} \quad (3.5)$$

Кількість елементів (акумуляторів) в акумуляторній батареї:

$$3 \times 92 = 276 \text{ шт.}$$

3.6 Розрахунок потужності і вибір типу зарядної станції кінцевого пункту

Спочатку розрахуємо рекомендований струм заряджання електробуса на кінцевому пункті. В середньому час зарядження візьмемо 10 хвилин (це буде 0,16 години), то струм заряджання визначимо за наступною формулою:

$$I_{зар} = \frac{C_{акум}}{T_{кінц\ пунт}} ; \quad (3.6)$$

$$11,1 / 0,16 = 70 \text{ А.}$$

На кінцевому пункті має створюватися швидке заряджання, яке створюється постійним струмом (допускається значення зарядного струму до 500 А) напругою 400÷500 В з максимальною піковою потужністю до 250 кВт.

Потужність зарядної станції на при кінці досліджуваного рейсу має визначатися на розумінні, що зарядна станція має надати під час зарядження обсяг енергії $W_{рух}$ за час, поки електробус стоїть на кінцевому пункті:

$$P_{зс} = \frac{W_{рух}}{t_{заряд} \cdot \eta} , \quad (3.7)$$

де $P_{зс}$ – мінімально необхідна потужність зарядної станції, кВт;

$t_{заряд}$ – час заряджання на зупинці, год;

η – коефіцієнт корисної дії процесу зарядження, що враховує втрати в зарядному пристрої та акумуляторі ($\eta = 0,85 \dots 0,92$).

$$19\ 248\ 258,6 / 10 \times 60 \times 0,85 = 37,741 \text{ кВт для обраного рейсу.}$$

Невелика потужність зарядної станції для обраного маршруту пояснюється не зовсім коректним вибором маршруту для прикладу розрахунку, так як він не досить протяжний, що ускладнює застосування релевантних даних для остаточного визначення потужності зарядної станції. До того ж маршрут в досліджуваному напрямку має профіль з ділянками на спуску, на яких енергія для руху має від'ємне значення. Це пояснює незначні витрати електроенергії акумуляторною батареєю електробуса.

Виходячи з того, що кінцевою станцією обраного маршруту є станція метро «Барабашово», на якій обертаються крім маршруту № 81 автобуси №№ 7, 12, 38, серед яких є більш потужні, можна передбачити у разі їх переведення на електричні автобуси підвищення потужності зарядної станції на рівні 150-450 кВт згідно з таблицею 1.1.

Тому для зарядної інфраструктури станція метро «Барабашово» обираємо найближчу стандартну промислову зарядну станцію потужністю 150–160 кВт або з запасом — 200 кВт.

Отже, обираємо швидку зарядну станцію ABB EV Charging Infrastructure потужністю 150 кВт (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Зарядна станція ABB EV Charging Infrastructure

Отже, для забезпечення безперебійної роботи електробуса на маршруті № 81 довжиною 6,7 км з інтервалом 20 хвилин та стоянкою 12 хвилин, необхідна зарядна інфраструктура на 150 кВт.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Вступ

Головним об'єктом дослідження охорони праці є технічні спеціалісти, які відповідальні за обслуговування зарядних станцій електробусів. Їхні робочі обов'язки тісно пов'язані з використанням потужного електричного устаткування, що створює низку потенційних загроз для життя та здоров'я самих працівників.

Зарядні станції для електробусів є сучасними елементами міської транспортної системи, безпека яких регламентується загальними вимогами законодавства з охорони праці, правилами електробезпеки та чинними стандартами для систем заряджання електричних транспортних засобів [20, 25, 26]. Активний розвиток електробусів потребує ретельного аналізу небезпек, з якими стикаються фахівці, що займаються експлуатацією, діагностикою та ремонтом зарядних станцій.

Зарядні станції належать до систем дротового заряджання електричних транспортних засобів і можуть працювати з вхідною напругою змінного струму та вихідною напругою постійного струму 400–750 В і вище, що значно підвищує ризик ураження електричним струмом порівняно зі звичайними низьковольтними мережами [21, 25]. Ураження струмом може статися під час технічного обслуговування, заміни окремих елементів або внаслідок пошкодження ізоляції кабелів. Дефекти ізоляції є особливо підступними, оскільки їх не завжди можна виявити візуально. Коротке замикання або перегрів силової електроніки може спричинити займання та термічні опіки для персоналу.

Важливо пам'ятати, що хоча більшість зарядних станцій функціонують автоматично, усунення несправностей вимагає безпосередньої участі працівників. У таких ситуаціях фахівцям доводиться контактувати з високовольтними компонентами системи, що вимагає високої кваліфікації та непохитного дотримання правил безпеки.

Окрему групу ризиків становлять процеси заряджання тягових акумуляторних батарей. Електробуси оснащені літійовими батареями типу LFP або NMC великої ємності [22]. Порушення режиму заряджання або механічне пошкодження батареї може призвести до термічної реакції з подальшим займанням або вибухом [23]. Продукти термічного розпаду електроліту є токсичними та можуть становити додаткову небезпеку для персоналу.

Крім фізичних та хімічних небезпек, на персонал впливають також психофізіологічні фактори. Зарядні станції розташовані на різних об'єктах транспортної інфраструктури, що вимагає від персоналу постійних переміщень. Аварійні ситуації потребують негайного реагування, незалежно від часу доби, часто з перевезенням запасного обладнання. Це створює підвищену фізичну та емоційну напругу для працівників [24].

Сукупність зазначених факторів підкреслює необхідність глибокого аналізу умов праці технічного персоналу зарядних станцій та розробки відповідних заходів з охорони праці. Своєчасне виявлення небезпечних чинників сприятиме зниженню виробничого травматизму та підвищенню ефективності роботи персоналу.

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників

Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників доцільно виконувати з урахуванням чинної Гігієнічної класифікації праці, яка встановлює підхід до оцінювання шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості й напруженості трудового процесу [24]. Далі детально розглянуто фізичні, хімічні та психофізіологічні чинники, характерні для умов праці технічного персоналу зарядних пунктів для електробусів.

Фізичні чинники. Ураження електричним струмом є головною небезпекою для персоналу. Постійний електричний струм напругою 400–750 В викликає стійке скорочення м'язів, що унеможлиблює самостійне звільнення від

струмопровідної частини [21]. Наслідками такого ураження можуть бути електричні опіки, фібриляція серця або навіть летальний результат.

Небезпека такого ураження виникає під час технічного обслуговування, заміни комплектуючих, а також при контакті з пошкодженою ізоляцією кабелів. До додаткових факторів ризику належать висока вологість повітря, недостатнє освітлення робочої зони та використання несправних засобів індивідуального захисту. Ймовірність виникнення електротравми зростає під час виконання аварійних робіт, коли працівники працюють в умовах обмеженого часу.

Пожежа є ще одним значущим фізичним чинником. Замикання в силових ланцюгах супроводжується виділенням значної кількості теплової енергії, що може призвести до займання ізоляції кабелів або конструктивних елементів станції. Перегрів компонентів силової електроніки внаслідок збою системи охолодження також становить потенційне джерело пожежі [26]. Персонал, який опиняється в зоні займання, піддається ризику термічних опіків.

Пошкодження силових кабелів може бути спричинене багаторазовим механічним згинанням під час підключення до електробусів, впливом кліматичних умов та ультрафіолетового випромінювання. Зовнішні пошкодження ізоляції не завжди помітні при візуальному огляді, що ускладнює своєчасне виявлення дефекту та підвищує ризик ураження електричним струмом.

Підвищений рівень електромагнітного випромінювання формується поблизу активного зарядного обладнання. Тривалий вплив електромагнітних полів може призводити до порушень функціонування серцево-судинної та нервової систем [27]. Цей чинник є особливо значущим під час проведення тривалих регламентних робіт поблизу обладнання.

Хімічні чинники. При неконтрольованому нагріванні літієвої тягової батареї відбувається інтенсивне виділення газів зі значним зростанням тиску всередині корпусу, що може призвести до вибуху або механічного руйнування [23]. Під час горіння виділяються токсичні речовини: фтористий водень, монооксид вуглецю та органічні сполуки.

Фтористий водень є надзвичайно небезпечним, оскільки при контакті зі шкірою викликає глибокі хімічні опіки [28]. Вдихання зазначених речовин, навіть у відносно невеликих концентраціях, призводить до гострого отруєння та хімічного опіку дихальних шляхів.

Забруднення повітря робочої зони продуктами зносу шин є постійним чинником для персоналу, який працює в зонах заїзду та маневрування електробусів. Під час гальмування та руху транспортного засобу утворюється дрібнодисперсний пил, що містить частинки гуми та інші домішки [29]. Тривале вдихання такого пилу може призводити до хронічних захворювань дихальних шляхів.

Психофізіологічні чинники. Нервово-емоційне напруження є невід'ємною складовою професійної діяльності персоналу зарядних станцій. Робота з електрообладнанням високої потужності вимагає постійної концентрації, оскільки будь-яка помилка може мати серйозні наслідки.

Тривале перебування в стані підвищеної відповідальності призводить до хронічного стресу та професійного виснаження, що, своєю чергою, знижує концентрацію уваги та збільшує ймовірність помилкових дій [24].

Територіальна роз'єднаність об'єктів обслуговування вимагає регулярних переміщень між зарядними станціями. Постійні поїздки в умовах інтенсивного міського трафіку є джерелом додаткового стресу та фізичної втоми.

Аварійні виклики становлять найбільш несприятливий сценарій з точки зору безпеки праці. Раптова несправність станції потребує термінового виїзду, незалежно від часу доби, часто з транспортуванням резервного обладнання та в умовах обмеженого часу. Поєднання фізичної втоми, часового тиску та підвищеної електробезпеки суттєво збільшує ризик настання нещасного випадку.

Таким чином, умови праці технічного персоналу зарядних станцій електробусів характеризуються комплексним впливом різноманітних небезпечних та шкідливих чинників, що вимагає системного підходу до управління професійними ризиками.

4.3 Організаційно-технічні заходи по забезпеченню безпеки

Організація робочого графіка та перерв. Фахівці, які відповідають за технічне обслуговування зарядних станцій для електробусів, виконують різноманітні завдання, що відрізняються за складністю. Їхні обов'язки включають в себе дистанційний контроль за станом обладнання, виявлення несправностей, планове технічне обслуговування, а також виїзди до місць експлуатації транспортної інфраструктури для усунення аварійних ситуацій. Зважаючи на це, планування робочого графіка має враховувати особливості як розумової, так і фізичної праці [30].

Під час роботи з комп'ютерним обладнанням необхідно дотримуватися вимог щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, зокрема щодо організації робочого місця, режиму праці та перерв [31]. Невиконання цих вимог може призвести до втоми очей, зниження здатності до концентрації та нервово-емоційного виснаження.

Для працівників, які здійснюють виїзди для обслуговування зарядних станцій, слід забезпечити раціональне планування маршрутів і уникати постійних понаднормових робіт. Доцільно формувати резервні бригади для оперативного реагування на термінові виклики. Такий підхід зменшує ризик перевтоми та ймовірність помилок під час виконання робіт підвищеної небезпеки.

Окремої уваги потребують регулярні медичні огляди та оцінка психофізіологічного стану персоналу. Своєчасне виявлення ознак професійного вигорання сприяє підтримці належного рівня безпеки праці.

Нормативи мікроклімату та облаштування робочих місць. У приміщеннях, де здійснюється дистанційний контроль за роботою зарядних станцій, показники мікроклімату мають відповідати нормам ДСН 3.3.6.042-99 [32]. У холодний період року температура повітря повинна перебувати в межах 22–24 °С, а в теплий – 23–25 °С. Відносна вологість повітря має бути в діапазоні 40–60 %.

Відхилення від оптимальних показників мікроклімату негативно впливають на продуктивність праці персоналу та можуть призводити до збільшення кількості помилок під час виконання робочих завдань. Для забезпечення комфортних умов праці слід застосовувати системи вентиляції та кондиціонування.

Робочі місця операторів повинні відповідати ергономічним стандартам. Конструкція робочих столів та крісел має сприяти підтримці фізіологічно правильної робочої пози. Освітлення робочої зони повинно бути достатнім для виконання завдань, при цьому не створюючи відблисків на екранах моніторів [31].

Ефективна організація робочого простору сприяє зменшенню статичного навантаження, зниженню відчуття втоми та підвищенню загальної продуктивності роботи персоналу.

Засоби індивідуального захисту. Під час виконання робіт з технічного обслуговування зарядних станцій працівники повинні бути забезпечені індивідуальними засобами захисту згідно з чинними нормативними вимогами [33].

До основних засобів захисту належать: діелектричні рукавички, спеціальне взуття з діелектричними властивостями, захисні шоломи, окуляри та інструменти з ізольованими ручками. Використання цих засобів є обов'язковим під час роботи поблизу елементів, що перебувають під напругою.

Спеціальний робочий одяг призначений для захисту від механічних пошкоджень та забруднень. При очищенні зарядних станцій від пилу та інших нашарувань рекомендується використовувати респіратори для захисту органів дихання.

Робітники повинні пройти навчання щодо правильного використання засобів індивідуального захисту. Регулярна перевірка їх технічного стану дає змогу своєчасно виявляти пошкодження та замінювати непридатні засоби.

Організація безпечного технічного обслуговування. Усі роботи з технічного обслуговування зарядних станцій повинні проводитися відповідно до

Правил улаштування електроустановок та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [21, 34].

Перед початком робіт необхідно повністю знеструмити обладнання, переконатися у відсутності напруги та встановити заборонні знаки. Роботи під напругою дозволені лише у виняткових випадках за наявності відповідного дозволу.

Весь персонал повинен пройти вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі з охорони праці [30]. Допуск до робіт в електроустановках надається тільки фахівцям, які мають відповідну групу з електробезпеки.

З метою запобігання виникненню пожеж необхідно регулярно перевіряти стан кабельних мереж та елементів силової електроніки. На об'єктах повинні бути доступні первинні засоби пожежогасіння та розроблені плани дій на випадок виникнення аварійних ситуацій.

Розрахунок системи захисного заземлення. Одним з найефективніших засобів захисту від ураження електричним струмом є захисне заземлення [21, 35]. Для типової зарядної станції потужністю 150 кВт використовується заземлювальний пристрій, що складається з дванадцяти вертикальних сталевих електродів довжиною 3 м і діаметром 16 мм, з'єднаних сталевую смугою перерізом 40×4 мм.

Згідно з вимогами ПУЕ, опір заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000 В не повинен перевищувати 4 Ом [21]. Для попереднього розрахунку приймаємо питомий опір ґрунту $\rho = 100$ Ом·м.

За результатами попереднього інженерного розрахунку встановлено, що застосування дванадцяти вертикальних електродів забезпечує сумарний опір заземлювального пристрою близько 3,82 Ом. Отримане значення відповідає встановленій нормі.

У разі експлуатації зарядної станції в умовах вищого питомого опору ґрунту виникає потреба у збільшенні кількості електродів або їх довжини. Стан

заземлювального пристрою має контролюватися під час періодичних перевірок електрообладнання [34, 35].

Використання захисного заземлення дозволяє знизити напругу дотику до безпечного рівня та забезпечує оперативне спрацювання захисних пристроїв у разі пошкодження ізоляції.

4.3.1 Розрахунок захисного заземлення зарядної станції

Одним із основних технічних заходів електробезпеки під час експлуатації зарядної станції електробусів є влаштування захисного заземлення. Воно призначене для зниження напруги дотику до безпечного рівня та забезпечення спрацювання захисних апаратів у разі пошкодження ізоляції.

Для зарядної станції потужністю 150 кВт приймаємо заземлювальний пристрій, що складається з вертикальних сталевих електродів, з'єднаних між собою сталеву смугою. Для електроустановок напругою до 1000 В допустимий опір заземлювального пристрою приймається не більше 4 Ом [21].

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Значення
Потужність зарядної станції	$P = 150$ кВт
Напруга електроустановки	$U \leq 1000$ В
Допустимий опір заземлення	$R_{\text{доп}} = 4$ Ом
Питомий опір ґрунту	$\rho = 100$ Ом·м
Довжина вертикального електрода	$l = 3$ м
Діаметр вертикального електрода	$d = 16$ мм = 0,016 м
Кількість електродів	визначається розрахунком
Коефіцієнт використання електродів	$\eta = 0,65$
З'єднувальна смуга	40 × 4 мм

Розраховуємо опір одного вертикального електрода за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right), \quad (4.1)$$

де ρ — питомий опір ґрунту, Ом·м;

l — довжина електрода, м;

d — діаметр електрода, м.

Підставляємо прийняті значення до формули:

$$R_1 = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot (\ln \frac{4 \cdot 3}{0,016} - 1); \quad (4.2)$$

$$R_1 = \frac{100}{18,84} \cdot (\ln 750 - 1) = 29,8 \text{ Ом.};$$

Отже, розрахунковий опір одного вертикального електрода становить 29,8 Ом.

Визначаємо необхідну кількість електродів з урахуванням коефіцієнта їхнього використання:

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{доп}} \cdot \eta}; \quad (4.3)$$

$$n = \frac{29,8}{4 \cdot 0,65} = 11,46.$$

Отримане значення округлюємо у більший бік. Для забезпечення нормативного опору заземлення приймаємо 12 вертикальних сталевих електродів ($n = 12$).

Перевіряємо фактичний опір заземлювального пристрою, який визначаємо за формулою:

$$R_3 = \frac{R_1}{n \cdot \eta}; \quad (4.4)$$

$$R_3 = \frac{29,8}{12 \cdot 0,65} = 3,82 \text{ Ом.}$$

Перевіряємо виконання умови електробезпеки:

$$R_3 \leq R_{\text{доп}};$$

$$3,82 \text{ Ом} \leq 4 \text{ Ом.}$$

Оскільки отримане значення опору заземлювального пристрою не перевищує допустимого значення, умова забезпечення електробезпеки зарядної станції виконується.

4.4 Висновки за розділом 4

Забезпечити надійну експлуатацію зарядних станцій для електробусів можливо лише через впровадження комплексу організаційних та технічних заходів. Запропоновані рішення спрямовані на мінімізацію негативного впливу

шкідливих виробничих факторів та створення безпечних умов праці для технічного персоналу.

Розглянуто аспекти організації режиму праці та відпочинку, дотримання нормативних показників мікроклімату, застосування засобів індивідуального захисту та проведення інструктажів з охорони праці. Впровадження цих заходів сприятиме зниженню психофізіологічного навантаження та підвищить ефективність роботи персоналу.

Особливу увагу приділено технічним аспектам електробезпеки. Проведений розрахунок захисного заземлення для типової зарядної станції потужністю 150 кВт підтвердив можливість досягнення нормативного значення опору заземлювального пристрою. Це свідчить про доцільність реалізації запропонованого технічного рішення.

Таким чином, реалізація комплексних організаційних та технічних заходів сприятиме зменшенню рівня виробничого травматизму, запобіганню професійним захворюванням та забезпеченню стабільної роботи зарядних станцій для електробусів.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто особливості експлуатації електробусів, актуальність їх впровадження та проаналізовані способи їх зарядження. Запропонована методика встановлення параметрів зарядної станції на кінцевому пункті.

2. Для дослідження обраний маршрут автобуса № 81 і проведені дослідження швидкості руху на маршрутах і часу руху по перегонам за даними навігації, на підставі чого побудовані діаграми руху.

3. На підставі побудованих діаграм руху проведені розрахунки середньоходових швидкостей за діаграмами руху електробуса по перегонам маршруту, розрахунок значень опорів руху в режимах розгону і гальмування, розрахунок витрат енергії за рейс, розрахунок кількості енергії, що економиться завдяки рекуперації протягом рейсу, встановлено параметри тягової акумуляторної батареї електробуса. Розраховано потужності і вибір типу зарядної станції кінцевого пункту.

4. У розділі «Охорона праці» розглянуті питання охорони праці технічного персоналу, що обслуговує зарядні станції для зарядження електробусів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. N 1550 Із змінами і доповненнями <https://ips.ligazakon.net/document/kp241550?an=24>
2. Переваги та недоліки сучасних електричних автобусів (назва з екрану). Режим доступу : <https://avtek.ua/ua/n580-preimusestva-i-nedostatki-sovremennyh-elektriceskih-avtobusov>
3. Концепція «Зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Режим доступу: <https://menr.gov.ua/news/34424.html> (дата звернення: 15.10.2024).
4. Башинська І. О. Розумна система міського пасажирського транспорту як складова Smart City: монографія // Башинська І.О., Філіппов В.Ю. – Харків: вид-во «Діса плюс», 2018. – 220 с. <http://dspace.opu.ua/xmlui/handle/123456789/8363>
5. Н. Кульбашна, Н. Лукашова, В. Далека, В. Скуріхін. Шляхи підвищення енергоефективності електробусів за рахунок сучасних фотоелектричних технологій. Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. Харків : ХНУГХ ім. О. М. Бекетова, 2025, том 1. № 189(2025). С. 52-60. <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/en/article/view/6447>.
6. Аргун Щ. В. Електробуси – перспективний міський транспорт Харкова. Автомобільний транспорт, вип. 44, 2019. С. 59 – 65.
7. Гнатов А. В., Ульянець О. А., Аргун Щ. В. Міський електробус з надшвидкою зарядкою. [Друга всеукраїнська науково-практична конференція «Автобусобудування та пасажирські перевезення в Україні»: тези доповідей] (17-18 березня 2016 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. – 112 с. – С. 43 – 44.
8. Nadiia Kulbashna , Vasyl Daleka , Natalya Lukashova, Sergey Furtat. Energy Aspects of Forming Electric Bus Charging Schedules. Lighting Engineering &

- Power Engineering 2025, Vol. 64, No. 2, 153–162.
<https://lepe.kname.edu.ua/index.php/lepe/en/article/view/538>
9. International Energy Agency (IEA). *Global EV Outlook 2023*. — Paris : IEA, 2023. — URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
 10. European Environment Agency (EEA). *Transport and environment report 2022*. — Copenhagen : EEA, 2022. — URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2022>
 11. Lajunen, A. *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*. Transportation Research Part C. — 2014. — Vol. 38. — P. 1–15.
 12. Rogge, M., Wollny, S., Sauer, D. *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport // Energies*. — 2015. — Vol. 8, No. 5. — P. 4587–4606.
 13. Göhlich, D. et al. *Design methodology for city buses // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. — Springer, 2013.
 14. Mahmoud, M. et al. *Electric buses: A review of alternative powertrains for sustainable urban transportation // Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2016. — Vol. 62. — P. 673–684.
 15. Jefferies, D., Göhlich, D. *A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimisation // World Electric Vehicle Journal*. — 2020. — Vol. 11, No. 3. — P. 56. <https://doi.org/10.3390/wevj11030056>
 16. UITP. *The Future of Buses in Europe: Results of Europe Bus Fleet Survey 2023* — Brussels: UITP, 2024. — URL: <https://www.uitp.org/news/the-future-of-buses-in-europe-results-of-europe-bus-fleet-survey-2023/>
 17. European Commission. *Sustainable and Smart Mobility Strategy* — Brussels: European Commission, 2020. — URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en
 18. 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. — Vol. 11, No. 10. — P. 707–720.
<https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1310962>

19. НЕК «Укренерго». *Звіт про розвиток системи передачі — 2023* — Київ: Укренерго, 2022. — URL: https://ua.energy/about_us/reporting/
20. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
21. Правила улаштування електроустановок : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17>
22. Mahmoudzadeh Andwari A. et al. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2017. — Vol. 78. — P. 414–430.
23. Feng X. et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review // *Energy Storage Materials*. — 2018. — Vol. 10. — P. 246–267.
24. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : наказ МОЗ України від 08.04.2014 № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0472-14>
25. ДСТУ EN IEC 61851-1:2021. Система зарядки електричних транспортних засобів дротова. Частина 1. Загальні вимоги (EN IEC 61851-1:2019, IDT; IEC 61851-1:2017, IDT), з урахуванням поправки № 1:2025.
26. ДСТУ 9222:2023. Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення.
27. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів : ДСНіП 3.3.6.096-2002. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0203-03>
28. Larsson F. et al. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7. — Article 10018.
29. Panko J. M., Kreider M. L., McAtee B. L., Marwood C. Chronic toxicity of tire and road wear particles to water- and sediment-dwelling organisms // *Ecotoxicology*. — 2013. — Vol. 22, № 1. — P. 13–21.

30. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці : НПАОП 0.00-4.12-05 : затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 № 15. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>
31. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями : наказ Міністерства соціальної політики України від 14.02.2018 № 207. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0508-18>
32. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99 : затв. постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.1999 № 42. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>
33. Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров'я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці : НПАОП 0.00-7.17-18 : затв. наказом Міністерства соціальної політики України від 29.11.2018 № 1804. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1494-18>
34. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98 : затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98>
35. ДСТУ HD 60364-5-54:2022. Електроустановки низької напруги. Частина 5-54. Вибірання та монтування електричного обладнання. Заземлення та захисні провідники (HD 60364-5-54:2011, IDT; IEC 60364-5-54:2011, IDT).