

НАУКОВА РОБОТА

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ «АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ»

НАПРЯМ КОНКУРСУ «АВТОМОБІЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА»

НА ТЕМУ:

**«МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ ТРОЛЕЙБУСАМИ З
АВТОНОМНИМ ХОДОМ»**

АНОТАЦІЯ

Стрімке впровадження заходів, спрямованих на зменшення шкідливих викидів вихлопних газів транспортних засобів призводить до активного застосування екологічно чистих технологій. Все ширшого застосування набувають електричні транспортні засоби, в тому числі для перевезення пасажирів за встановленими маршрутами. Незважаючи на зменшення вартості експлуатації електричних транспортних засобів, однією з проблем залишається забезпечення оптимального запасу ходу, оскільки недостатній запас енергії призведе до неможливості нормального функціонування перевізного процесу, з іншої сторони надлишок енергії підвищуватиме собівартість перевезень.

Актуальність обраної теми полягає у необхідності забезпечення запасу ходу на електричній тязі з врахуванням конкретних умов експлуатації транспортних засобів.

Методи досліджень, які застосовувалися під час виконання роботи, засновані на основних положеннях теорії руху транспортних засобів, теорії великих чисел методах обробки статистичних та експериментальних даних, методах математичного моделювання. Дослідження проводилися з використанням персонального комп'ютера та сучасного програмного забезпечення.

Метою роботи є моделювання запасу ходу на електричній тязі з врахуванням конкретних умов експлуатації транспортних засобів.

Об'єктом досліджень є процес руху транспортних засобів з електричним приводом при невизначених зовнішніх факторах.

Предметом досліджень є вплив реальних умов експлуатації транспортних засобів з електричним приводом на запас їхнього ходу.

Завдання роботи:

- провести аналіз сучасних досягнень та підходів для вирішення питання моделювання витрат електричної енергії транспортних засобів в реальних умовах експлуатації;

- встановити вплив зовнішніх факторів під час руху транспортного засобу та визначити можливі рівні їх варіювання;

- здійснити моделювання витрат електричної енергії під час руху транспортного засобу під дією зовнішніх факторів ,які змінюються випадковим чином;

- здійснити перевірку адекватності запропонованої моделі.

Науково-практичну цінність становлять:

- застосований підхід до моделювання та розрахунку запасу ходу транспортних засобів при невизначеності впливу зовнішніх факторів;

- застосований підхід до моделювання впливу зовнішніх факторів на рух транспортних засобів.

Апробація результатів роботи. Результати роботи доповідалися на XI студентській науково-технічній конференції машинобудівного факультету “Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті” [1].

Результати роботи впроваджені у ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс»», про що свідчить довідка про використання результатів наукової роботи, що наведена у Додатку.

На обговорення виносяться такі положення досліджень: застосований підхід до моделювання та розрахунку запасу ходу транспортних засобів при невизначеності впливу зовнішніх факторів, застосований підхід до моделювання впливу зовнішніх факторів на рух транспортних засобів.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Сучасні підходи до визначення запасу ходу транспортних засобів з електричним приводом.	6
1.1 Аналіз сучасних вітчизняних та іноземних досліджень ..	6
1.2 Фактори, які впливають на витрату електричної енергії. .	7
2 Моделювання руху транспортного засобу.	10
2.1 Сили, які діють на транспортний засіб під час руху.	10
2.2 Витрати електричної енергії.	14
2.3 Характеристики їздового циклу та транспортного засобу.	15
2.4 Зміна зовнішніх чинників під час руху транспортного засобу.	18
3 Витрати електричної енергії транспортними засобами.	23
Висновки.	27
Перелік джерел посилання	29
Додатки.	36

ВСТУП

В Україні значно розвинута тролейбусна мережа. Практично кожен обласний центр та значна кількість міст обласного підпорядкування мають розгалужену мережу тролейбусних маршрутів. Станом на 01.01.2020 р. в Україні нараховується 30 підприємств, які експлуатують тролейбуси, при цьому загальна довжина контактної мережі становить 3324,67 км, В середньому на 1 км² площі міста припадає 0,8 км контактної мережі, та 0,43 км на 1000 жителів міста. Ці показники є досить високі в порівнянні з країнами близького та далекого зарубіжжя. Для міста Луцьк ці показники становлять 1,5 та 0,5 відповідно. Зважаючи, що контактна тролейбусна мережа м. Луцьк є добре розвинута, об'єднує усі частини міста, враховуючи перспективний план розвитку Луцької міської територіальної громади, доцільно розглянути питання продовження маршрутів тролейбусів до прилеглих сіл. В даному випадку організація маршрутів може здійснюватися двома шляхами: будівництвом контактної мережі або використанням тролейбусів з автономним ходом чи електробусів. На сьогодні виробники тролейбусів пропонують досить широкий вибір транспортних засобів, а запас автономного ходу забезпечують відповідно до вимог замовника. Ці факти зумовлюють необхідність здійснення відповідних розрахунків та визначення необхідного запасу автономного ходу тролейбуса для конкретних умов експлуатації. Ці факти зумовили необхідність моделювання руху транспортного руху з врахуванням впливу зовнішніх факторів для подальших розрахунків необхідного запасу ходу.

1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСУ ХОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

1.1 Аналіз сучасних вітчизняних та іноземних досліджень

Сучасний етап розвитку конструкцій транспортних засобів характеризується стрімким вдосконаленням автомобілів на електричній тязі, зокрема електробусів та тролейбусів на автономному ходу. Конструкції таких транспортних засобів постійно вдосконалюються та здешевлюються. У комплексних дослідженнях [2] проведених Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and National Renewable Energy Laboratory (NREL) відзначено основні досягнення та прогалини у технологіях щодо електрифікації транспортних засобів. Авторами констатовано стійку тенденцію до зменшення вартості акумуляторних батарей до 2030 року (рисунок 1.1). Звичайно це позитивно впливатиме на подальший розвиток електричних автомобілів, однак разом з тим залишаються певні проблеми, які потребують вирішення.

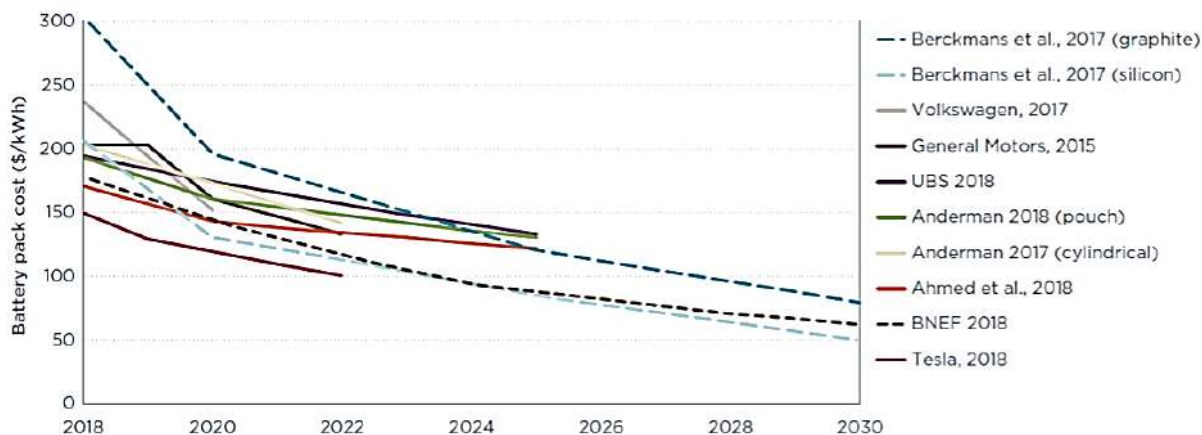


Рисунок 1.1 – Прогнозування вартості акумуляторних батарей [2]

Однією з проблем, яка досить гостро постає на даному етапі розвитку електричних автобусів та тролейбусів з автономним ходом є запас їх ходу на електричній тязі. Величина запасу ходу електробуса або тролейбуса впливає на їх вартість та масу, а, відповідно і на пасажиромісткість, тобто в будь якому випадку визначатиме енергоефективність транспортного засобу. З іншої сторони збільшення

запасу ходу підвищує мобільність тролейбусів, а отже, позитивно відображатиметься на виконанні транспортної роботи. Конструктивні особливості кузовів автобусів дають можливість виготовляти транспортні засоби під конкретні вимоги замовника щодо запасу автономного ходу на електричній тязі. Зважаючи на це, необхідно обслуговувати маршрути транспортними засобами, які мають оптимальний запас ходу, тобто цього запасу достатньо для руху за визначеними маршрутами та графіком, водночас відсутній надлишковий запас енергії, який не використовується. Ця теорія підтверджується дослідженнями [3], за результатами, яких представлено інструмент електрифікації міського автобусного транспорту, який спирається на віртуальне моделювання парків звичайних та електронних автобусів протягом записаних циклів водіння, включаючи управління зарядом. Інструмент дозволяє довільно встановлювати розташування зарядних станцій, кількість та параметри зарядних пристроїв для кожної станції, обмеження мережі, ємність акумулятора електронної шини та подібні фактори. Схожі дослідження проведені та висвітлені у роботах [4] спираються в основному на планування інфраструктури для забезпечення функціонування електричних автобусів.

Як свідчить аналіз результатів попередніх досліджень основною проблемою, яка постає під час визначення необхідного запасу ходу електричними транспортними засобами є невизначеність умов експлуатації [5 – 7]. У роботі [8] розглянуто фактори, які впливають на витрату енергії електричними транспортними засобами та наведено взаємозв'язки між системою «автомобіль – водій – дорога – навколишнє середовище». У цій роботі авторами досліджено вплив зовнішніх чинників на витрату електричної енергії у м. Луцьк з врахуванням їздового циклу.

1.2 Фактори, які впливають на витрату електричної енергії

Фактори, які впливають на витрату енергії електричним транспортним засобом можна розділити на три групи: керовані, умовно-керовані та некеровані (рисунк 1.2). Вплив керованих факторів може бути мінімізований за допомогою певних заходів. Умовно-керовані фактори практично не піддаються зміні в процесі

експлуатації, однак їх вплив може бути зменшений інфраструктурними змінами. Вплив на некеровані фактори неможливий, їх можна лише враховувати в процесі експлуатації транспортних засобів.

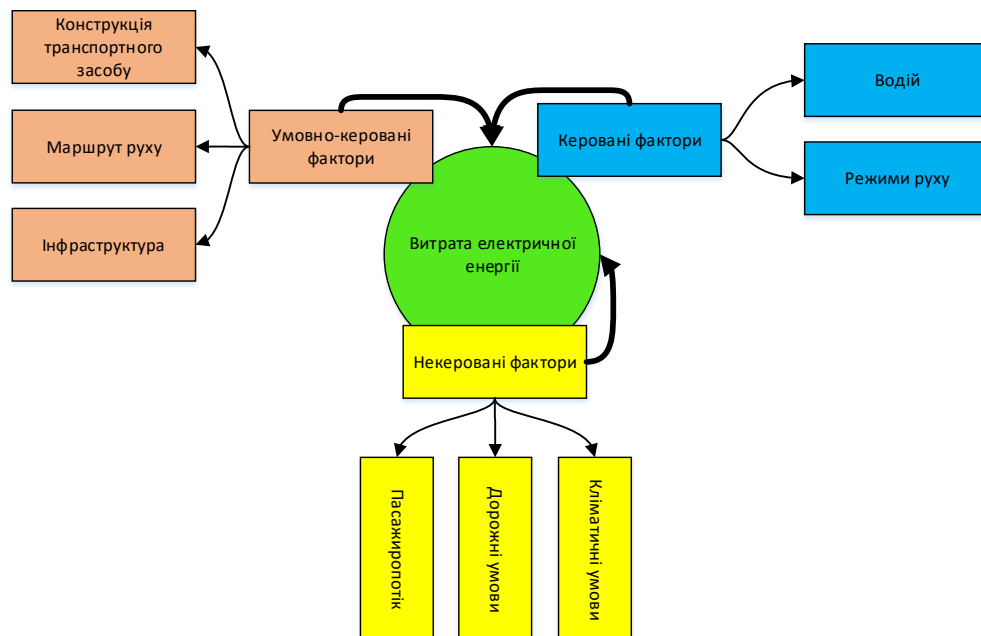


Рисунок 1.2 – Фактори, які впливають на витрату електричної енергії транспортними засобами

Керовані фактори. До керованих факторів віднесено стиль водіння та режими руху. У роботі [9] автори на основі проведених експериментальних досліджень встановили, що різниця між споживанням електричної енергії різними водіями, за умови незмінності інших факторів може становити до 10 разів. Подібні дослідження, проведені для автобусів, обладнаних двигунами внутрішнього згоряння [10], підтверджують значну різницю між витратою палива при різних стилях водіння. Окрім того можна відмітити дослідження [11 – 13]. Режими руху автобуса, звичайно значною мірою залежить від стилю водіння, однак графік руху теж може значно впливати на витрату електричної енергії автобусом. Ця гіпотеза підтверджується результатами досліджень, які наведено у [6, 14 – 17]. Аналіз результатів попередніх досліджень підтверджує можливість ефективного керування зазначеними факторами та подальшу мінімізацію їх впливу на витрату електричної енергії автобусами з електричним приводом.

Умовно-керовані фактори. Умовно-керовані фактори не дають можливості зміни їх впливу в процесі експлуатації, разом з тим їх вплив досить добре враховується під час планування маршруту, інфраструктури або придбання транспортних засобів. Саме тому до цих факторів віднесено конструкцію транспортного засобу, яка є визначальною під час визначення витрат електричної енергії [18 – 21], інфраструктура, тобто наявність зарядних станцій, контактної мережі [22], а також характеристики маршруту руху [23 – 25].

Некеровані фактори. Пасажиropотік, тобто частота зупинок, час простою на зупинках, кількість пасажирів впливатиме безпосередньо на режим руху електробуса, його масу та, як результат витрату електричної енергії [26 – 28]. Стан та тип дорожнього покриття, відповідно до проведених досліджень [29, 30], також значною мірою може впливати на витрату електричної енергії транспортними засобами. Аналогічний вплив на енергоефективність електробусів чинять також умови руху [27, 31], та кліматичні умови [30, 32, 33].

Значна кількість досліджень присвячені дослідженням взаємного впливу різноманітних факторів на витрату електричної енергії електробусами [34 – 37]. У роботі [38] авторами проведено дослідження та визначено 19 факторів, які впливають на ефективність руху транспортних потоків, які розділено на 4 категорії. Ці дослідження дають можливість більш повно здійснювати моделювання режимів руху транспортних та витрату ними електричної енергії. Аналіз наведених вище досліджень демонструє значну невизначеність зовнішніх впливів, як керованих так і некерованих факторів, що унеможлиблює адекватне моделювання споживання електричної енергії електробусами. Цей факт призводить до значних труднощів у прогнозуванні реальних витрат електричної енергії, а також мінімізації негативних впливів на споживання електричної енергії транспортними засобами.

2 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

2.1 Сили, які діють на транспортний засіб під час руху

У роботі [8] авторами розглянуто вплив зовнішніх чинників на споживання електричної енергії транспортними засобами, однак зважаючи на значну їх невизначеність необхідно здійснити комплексний аналіз їх впливу. Таким чином метою даної роботи є моделювання впливу зовнішніх факторів на споживання електричної енергії транспортними засобами, обладнаних електричними двигунами.

Розрахунок споживання палива доцільно здійснювати використовуючи положення теорії руху транспортних засобів [27, 33, 39, 40]. У роботі [41] здійснено моделювання та оцінка споживання енергії електричним транспортним засобом, при цьому здійснено моделювання усіх важливих елементів автомобіля. Оскільки для цілей даних досліджень важливим є саме вплив зовнішніх факторів, то подальші розрахунки будуть здійснюватися без врахування особливостей конструкції автобуса, за виключенням навантаження, тому що цей показник значною мірою залежить від пасажиропотоку. Так як майже усі зовнішні чинники, які мають вплив на витрату електричної енергії транспортним засобом є випадковими величинами, які характеризуються невизначеністю в певному діапазоні, то для варіювання цими факторами доцільно скористатися законом великих чисел [42, 43].

Як відомо, рух транспортного засобу можна описати рівнянням силового балансу [44 – 46]:

- для режиму розгону та руху з постійною швидкістю:
-

$$P_{\kappa} = P_j + P_f + P_w \pm P_h \quad (2.1)$$

- для режиму гальмування

$$P_j = P_w + P_f + P_{\tau} \pm P_h, \quad (2.2)$$

де P_j – сила інерції транспортного засобу, Н;

P_f – сила опору руху, Н;

P_w – сила опору повітря, Н;

P_h – сила опору підйому, Н;

P_τ – гальмівна сила транспортного засобу, Н.

Сила інерції транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_j = j_a \cdot m_a \cdot \delta_r, \quad (2.3)$$

де j_a – прискорення транспортного засобу під час його розгону, м/с²;

m_a – маса транспортного засобу, кг;

δ_{ob} – коефіцієнт врахування обертових мас транспортного засобу.

Сила опору руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_f = G_a \cdot f \cdot \sin \alpha \quad (2.4)$$

де G_a – вага транспортного засобу, яка рівна добутку його маси на прискорення вільного падіння, Н;

f – коефіцієнт опору кочення;

α – кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги.

Сила опору повітря під час руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_w = k_w \cdot B \cdot H \cdot (V \pm V_\epsilon \cdot \cos \beta)^2, \quad (2.5)$$

де B – колія транспортного засобу, м;

H – максимальна висота транспортного засобу, м;

k_w – коефіцієнт обтічності транспортного засобу;

V – швидкість руху транспортного засобу, м/с;

V_g – швидкість вітру, м/с. Знак “плюс” ставиться, при попутному вітрові, а знак “мінус” – при зустрічному;

β – кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю автомобіля.

Сила опору підйому під час руху транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_h = G_a \cdot \sin \alpha. \quad (2.6)$$

де α – кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги;

Гальмівна сила транспортного засобу визначається за залежністю:

$$P_r = j_r \cdot m_a \cdot \delta_r, \quad (2.7)$$

де j_r – сповільнення транспортного засобу під час гальмування, м/с².

Для проведення подальших досліджень необхідно визначити область зміни параметрів, встановити змінювані та незмінювані параметри. З даною метою усі параметри, які входять у рівняння руху транспортного засобу (2.1), (2.2) розподілено на дві групи: конструктивні, які визначаються лише конструкцією транспортного засобу і не змінюються в процесі його руху та експлуатаційні, які змінюються під час руху транспортного засобу (таблиця 2.1). Окрім того експлуатаційні параметри поділено на підгрупи, відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.1.

Таблиця 2.1 – Область зміни параметрів, які входять у рівняння руху транспортного засобу

Назва параметра	Позначення	Одиниці вимірювання	Діапазон зміни
1. Конструктивні			
Маса транспортного засобу	m_a	кг	Не змінюється для конкретного транспортного засобу. Для досліджень визначено межі зміни від 10 000 кг – для спорядженої маси 10 метрового електробуса до 30 000 кг для повної маси 18-ти метрового електробуса
Коефіцієнт врахування обертових мас транспортного засобу	δ_r	—	Не змінюється для конкретного транспортного засобу. Наближено визначається за залежністю [47 – 49]: $\delta_r = \frac{1}{1.04 + 0.04 \cdot u_i^2}$ де u_i - передатне число i -ї передачі. Зважаючи на відсутність коробки передач у більшості тролейбусів та електробусів приймається $u_i = 1,00$
Коля транспортного засобу	B	м	Не змінюється для конкретного транспортного засобу, значення приймаються згідно його технічних характеристик.
Максимальна висота транспортного засобу	H	м	Не змінюється для конкретного транспортного засобу, значення приймаються згідно його технічних характеристик.
Коефіцієнт обтічності транспортного засобу	k_w	—	Не змінюється для конкретного транспортного засобу, значення приймаються згідно його технічних характеристик. Визначається за формулою [50] $k_w = 0.5 \cdot C_x - \rho_a$ де C_x - коефіцієнт аеродинамічної сили, що залежать лише від конфігурації поверхонь транспортного засобу. Приймається 0,76...0,86, згідно [51] $\rho_a = 1,229 \text{ г/см}^3$ - густина повітря
2. Експлуатаційні			
Прискорення транспортного засобу під час його розгону	j_a	м/с ²	Згідно [8] прискорення під час розгону транспортного засобу становлять: $\begin{cases} j = 0...1,0 \text{ при } V = 0...5 \text{ м/с} \\ j = 0...0,7 \text{ при } V = 5...10 \text{ м/с} , \\ j = 0...0,5 \text{ при } V > 10 \text{ м/с} \end{cases}$

Назва параметра	Позначення	Одиниці вимірювання	Діапазон зміни
Сповільнення транспортного засобу під час гальмування	j_{τ}	м/с ²	Згідно [EN 1986-1 – 2011] прискорення під час гальмування транспортного засобу прийнято в межах: $\begin{cases} j = -1,05 \dots 0 \text{ при } V = 0 \dots 5 \text{ м/с} \\ j = -0,85 \dots 0 \text{ при } V = 5 \dots 10 \text{ м/с} \\ j = -0,50 \dots 0 \text{ при } V > 10 \text{ м/с} \end{cases}$
Швидкість руху транспортного засобу	V	м/с	Визначається прийнятим їздовим циклом або реальними умовами руху. Відповідне обґрунтування прийнятих значень буде наведено нижче.
Швидкість вітру	$V_{\text{в}}$	м/с	Залежить від пори року та регіону експлуатації, приймається в межах 0...7 м/с, згідно [52]
Кут між напрямком вітру та поздовжньою віссю автомобіля	β	—	0...360 °
Коефіцієнт опору кочення	f	—	Залежить від стану та типу дорожнього покриття, метеорологічних умов змінюється з межах 0,01...0,02 [53]. Окрім того коефіцієнт опору кочення залежить від швидкості транспортного засобу і може бути визначений за залежністю $f = 0.005 + (1/p)(0.01 + 0.0095(V/100)^2)$ де p – тиск повітря в шинах, бар; V – швидкість транспортного засобу.
Кут поздовжнього підйому (ухилу) дороги.	α	°	Залежить від конкретної дороги, з врахуванням міських умов експлуатації приймається 0...10 %, згідно [54]

За прийнятими значеннями показників, використовуючи залежності (2.1) та (2.2) можна розрахувати силу, необхідну для руху транспортного засобу.

2.2 Витрати електричної енергії

Енергію, яка буде витрачена на рух транспортного засобу доцільно визначати за залежністю [55 – 58]:

$$E = \frac{A}{\eta_{\Sigma}} \quad (2.8)$$

Враховуючи (2.7), загальну витрату електроенергії доцільно визначати, як сума миттєвих витрат електричної енергії, на кожну секунду їздового циклу [8]:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^t E_{mi} = \sum_{i=1}^t \frac{A_{mi}}{\eta_{\Sigma}} \quad (2.9)$$

Тоді витрата електричної енергії транспортним засобом під час його руху становитиме:

$$E_{\Sigma} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \cdot \int_0^t (P_k \cdot V) dt = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \cdot \int_0^t ((P_j + P_f + P_w \pm P_h - P_r) \cdot V) dt \quad (2.10)$$

2.4 Характеристики їздового циклу та транспортного засобу

Аналізуючи залежність (2.10) необхідно визначити їздовий цикл, за яким будуть здійснюватися подальші розрахунки. У роботі [59] проведено аналіз сучасних підходів щодо застосування їздових циклів під час моделювання експлуатаційних показників транспортних засобів, в тому числі і витрат електричної енергії. Відсутність стандартизованого їздового циклу для транспортних засобів категорії М₃ призводить до розробки їздових циклів для конкретних умов експлуатації та конкретних міст. Результати проведених експериментальних досліджень щодо режимів руху автобусів, які рухаються встановленими міськими маршрутами наведено на рисунку 2.1.

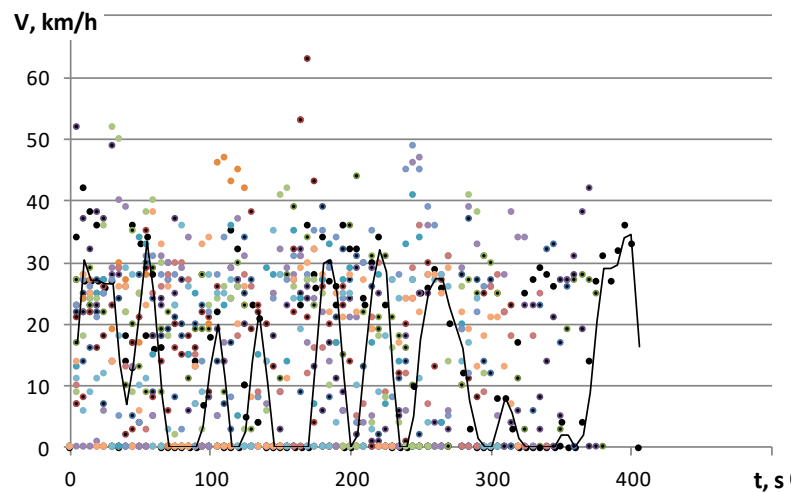


Рисунок 2.1 – Фрагмент графіка руху автобуса у м. Луцьк [8]

Як видно з рисунку 2.1, на графіку переважають елементарні ділянки їздового циклу «розгін-гальмування», з максимальною швидкістю 30 км/год. Тому для подальших досліджень прийнято елементарну ділянку їздового циклу, що наведено на рисунку.

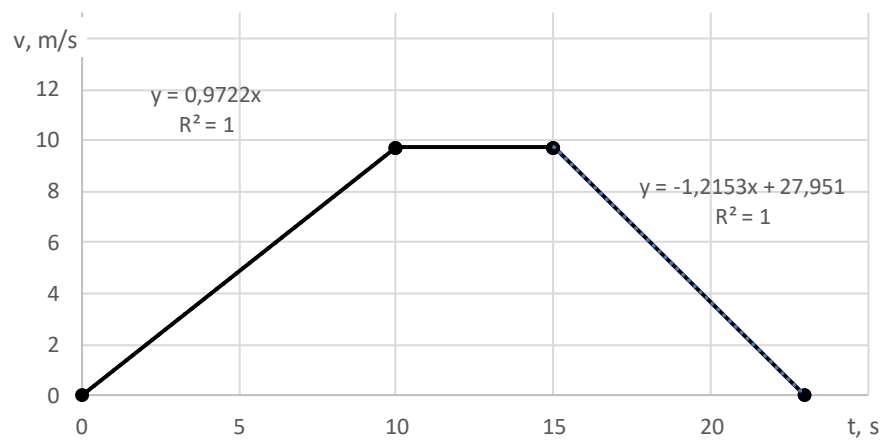


Рисунок 2.2 – Ділянка їздового циклу, на якій здійснено розрахунки витрат енергії транспортними засобами

Максимальна швидкість руху становить 35 км/год (9,7 м/с), тривалість руху 23 с. Варто зауважити що в даному випадку розглядаються повністю електричні транспортні засоби, тому прийнято, що під час зупинок вони не споживають

електричної енергії, яка використовується для руху, що пояснює відсутність таких ділянок в елементарному їздовому циклі, наведеному на рисунку.

Розрахунок витрат електричної енергії здійснено для тролейбуса Т701, технічні характеристики якого наведено у таблиці.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики тролейбуса моделі Богдан Т701

Найменування показника	Модифікація тролейбуса
	Т 70110
Габаритна довжина по елементах кузова, мм	11960
Габаритна ширина, мм	2550
Габаритна висота, мм	3800
Колісна база, мм	5860
Колія передньої/задньої осей, мм	2160/1890
Пасажиromісткість, осіб	105
Порожня маса, кг	11800
Технічно допустима максимальна маса, кг	18940
Передня вісь	VOITH TURBO IFS 75-225
Задня вісь (ведуча)	ZF AV-132/80
Передавальне число головної передачі	9,82
Шини коліс	275/ 70R 22,5
Тиск у шинах, кгс/см ²	8,0
Тяговий двигун	ЕД-139АУ2
Імпульсний перетворювач (IGBT)	Cegelec CDC 050P
Статичний перетворювач 600/27 В, 3ф 400 В	Cegelec SMTK 7.0Z
Блок гальмівних резисторів	R9PO4B125, 300 кВт
Двигун привода компресора	Siemens 1LA7113-4AA10-Z
Двигун привода гідронасоса	Siemens 1LA7106-4AA16
Акумуляторна батарея	6СТ-190, 12В, 190 А*год (2 шт)
Блок пониження радіозавод	ЕМС 2KN-350
Підвіска передньої осі	Незалежна, пневматична з двоважільними напрямними пристроями, двома пружними елементами, двома телескопічними гідравлічними амортизаторами та регулятором положення кузова

Найменування показника	Модифікація тролейбуса
	Т 70110
Підвіска задньої осі	Залежна, пневматична зі штанговим напрямним пристроєм, чотирма пружними елементами, чотирма телескопічними гідравлічними амортизаторами та двома регуляторами положення кузова
Рульове управління	Рульовий механізм – інтегральний з гідропідсилювачем. Рульова колонка – регульована за кутом нахилу і по висоті
Робоча гальмівна система	Пневматична, двоконтурна з системою ABS, гальмівні механізми всіх коліс – дискові, з автоматичним регулюванням зазору між гальмівними накладками і диском
Стоянкова гальмівна система	Один з контурів робочої гальмівної системи
Запасна гальмівна система	Механічний привод гальмівних механізмів коліс ведучих мостів від пружинних енергоаккумуляторів заднього моста з пневматичним управлінням
Допоміжна гальмівна система	Електродинамічне гальмування, як функція тягового електродвигуна

2.5 Зміна зовнішніх чинників під час руху транспортного засобу

На першому етапі було здійснено моделювання за окремими складовими (залежності (2.1), (2.2), які впливають на витрату електричної енергії, відповідно до залежності 2.10: сила інерції транспортного засобу (P_j), сила опору руху (P_f), сила опору повітря (P_w), сила опору підйому (P_h), гальмівна сила транспортного засобу (P_r), з метою встановлення внеску кожної з них. Під час моделювання параметри змінювалися в межах, обґрунтування яких наведено у таблиці 2.1. За результатами проведених досліджень побудовано відповідні графіки, які наведено на рисунках 2.3 – 2.6. Побудову наведених графіків здійснено на основі отриманих значень відповідних сил, із врахуванням закону великих чисел кількість точок становить 7000.

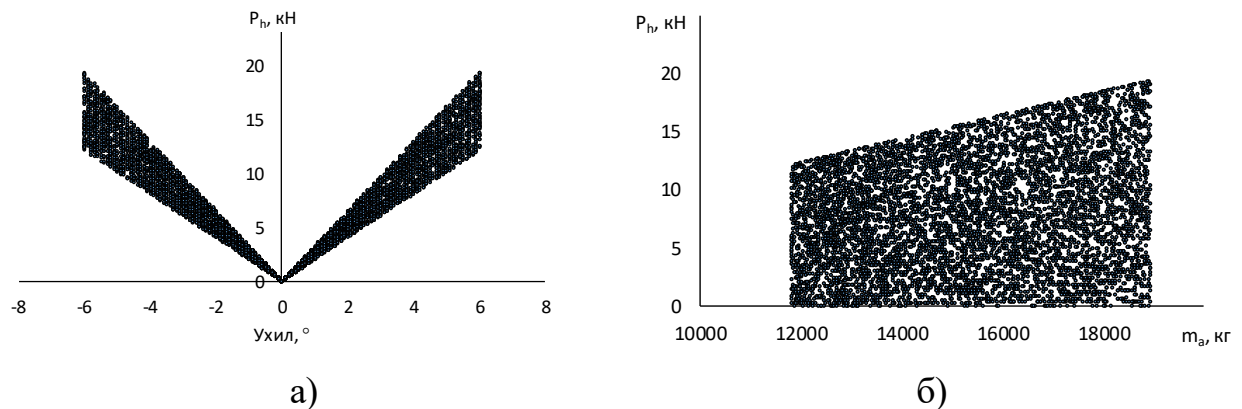


Рисунок 2.3 – Діапазон зміни сили опору підйому під час руху транспортного засобу: а) значення ухилу; б) значення маси.

На рисунку 2.3 наведено діапазон зміни сили підйому під час руху транспортного засобу. Симетричність отриманого графіка свідчить про однакову дій сили опору підйому, ключове значення має лише знак. В даному випадку додатнє значення ухилу свідчить про руху транспортного засобу вгору, а від’ємне – вниз. Також важливим є режим руху самого транспортного засобу, оскільки вплив даної сили може як допомагати економити електричну енергію так і призводити до підвищення її витрати. Окрім того під час моделювання впливу сили опору підйому значення маси автобуса випадковим чином варіювалося від спорядженої до повної, імітуючи зміну кількості пасажирів, тому дана модель враховує зміну двох факторів: ухилу дороги та маси транспортного засобу, які змінюються випадковим чином не залежно один від одного. Діапазон зміни даної сили наведено нижче у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Діапазон зміни сили опору підйому залежну від величини ухилу

Значення ухилу, °	Значення сили опору підйому, Н		Різниця, %
	максимальне	мінімальне	
-6	19394,3	10286,8	47,0
-5	16183,8	8416,6	48,0
-4	12872,2	6287,1	51,2
-3	9659,1	4282,0	55,7

Значення ухилу, °	Значення сили опору підйому, Н		Різниця, %
	максимальне	мінімальне	
-2	6424,6	2271,8	64,6
-1	3213,7	204,0	93,7
0	2900,5	0,0	100,0
1	6010,5	2047,6	65,9
2	9372,2	4062,8	56,7
3	12575,6	6095,3	51,5
4	15693,4	8096,1	48,4
5	18925,1	10316,4	45,5
6	19342,0	12149,2	37,2

На рисунку 2.4 наведено графіки зміни сили опору кочення під час зміни трьох параметрів: маси транспортного засобу, коефіцієнта опору кочення та ухилу дороги.

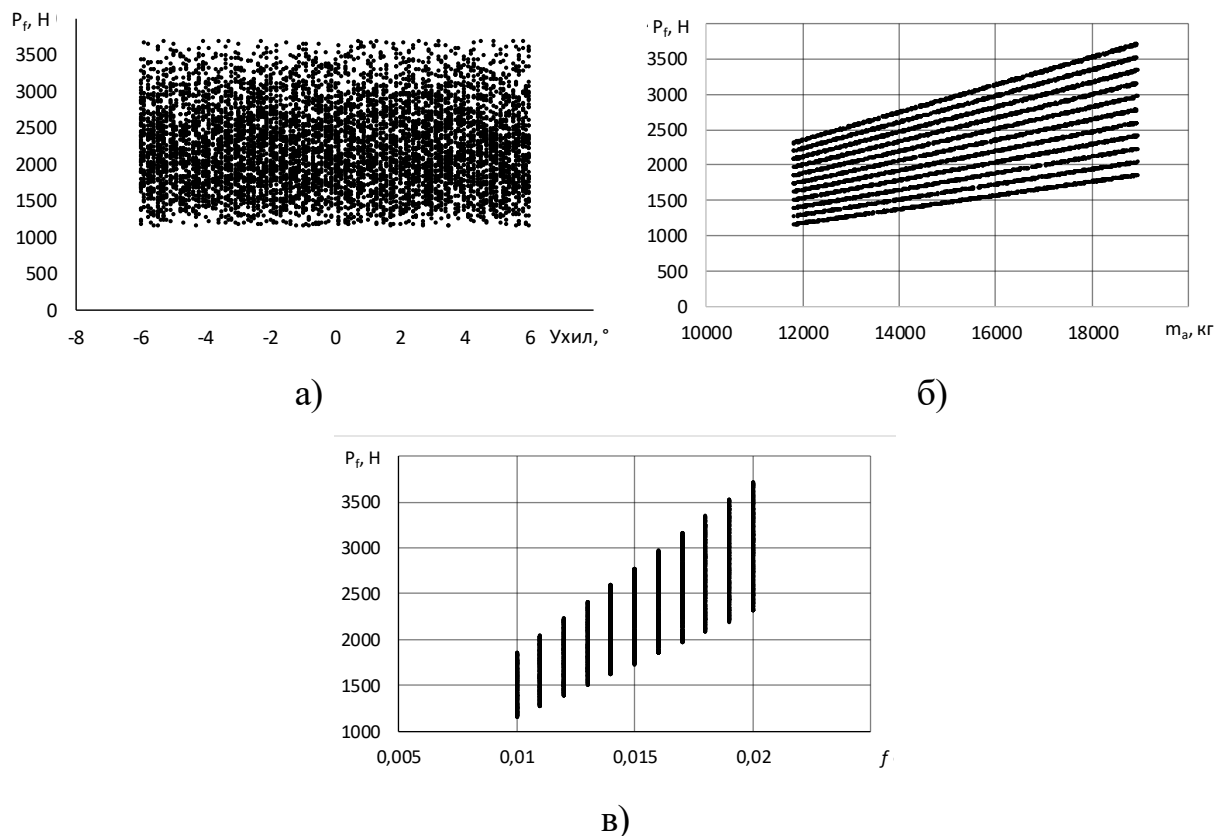


Рисунок 2.4 – Діапазон зміни сили опору кочення під час руху транспортного засобу: а) значення ухилу; б) значення маси; в) значення коефіцієнту опору кочення.

Діапазон зміни сили опору кочення становить 1153...3712 Н.

Для моделювання впливу сили опору повітря використано три змінних фактора: швидкість транспортного засобу, швидкість вітру та його напрям, при чому основною метою було врахування впливу саме зустрічного та попутного вітру. Графіки наведено на рисунку **.

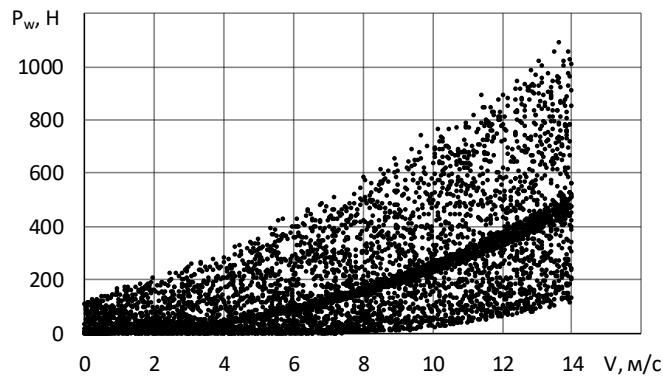
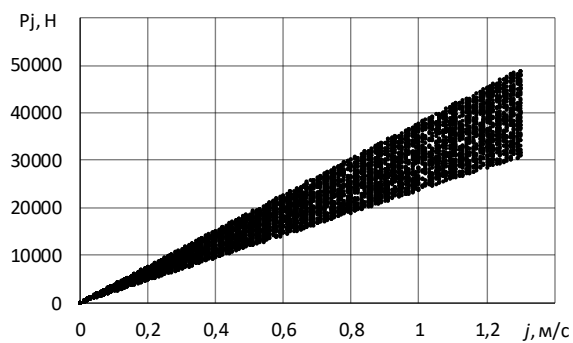


Рисунок 2.5 – Діапазон зміни сили опору повітря під час руху транспортного засобу

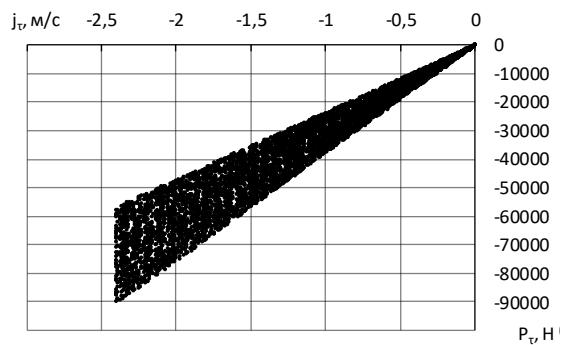
Діапазон зміни сили опору є досить значний, оскільки великий вплив має саме швидкість та напрям вітру, також спостерігається значний розкид даних на великих швидкостях транспортного засобу. Однак відмічається чітке скупчення точок від швидкості 4 м/с, де розкид становить близько 50 Н.

Динаміка зміни сили інерції та гальмівної сили наведено на рисунку 2.6 (а, б).

Як видно з наведених графіків (рис. 2.6) характер впливу та розкид сил інерції та гальмівних сил практично однаковий, по величині гальмівні сили приблизно у 1,5...2,0 рази більші, ніж сили інерції. Під час моделювання дії сил маса транспортного засобу та значення прискорення (сповільнення) змінювалися випадковим чином, в межах зазначених в таблиці 2.1.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Діапазон зміни: а) сили інерції та б) гальмівної сили під час руху транспортного засобу

Проведені дослідження щодо впливу різних факторів стали основою для моделювання витрат електричної енергії, необхідної для руху транспортного засобу з електричним приводом.

З ВИТРАТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТРАНСПОРТНИМИ ЗАСОБАМИ

За наведеними у таблицях 2.1, 2.2 вихідними даними здійснено моделювання витрат електричної енергії на подолання їздового циклу, наведеного на рисунку 2.2. Результати моделювання наведено на рисунках 3.1, 3.2, 3.3.

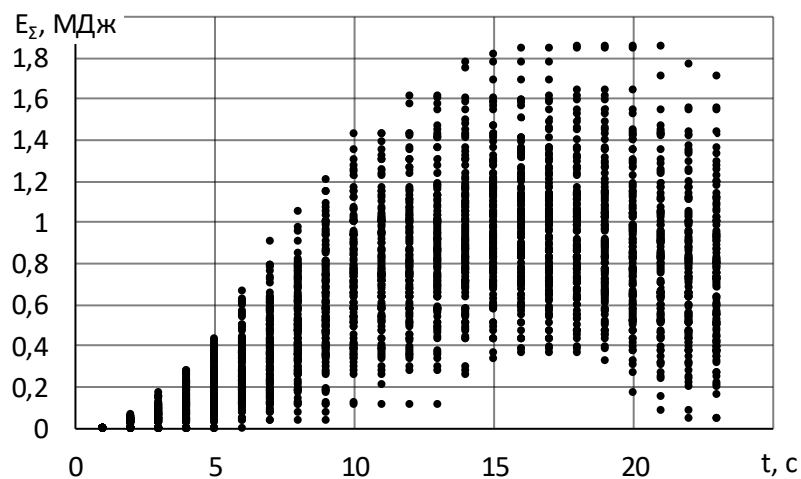


Рисунок 3.1 – Моделювання накопичених витрат електричної енергії тролейбусом Т 70110, під час дії зовнішніх факторів

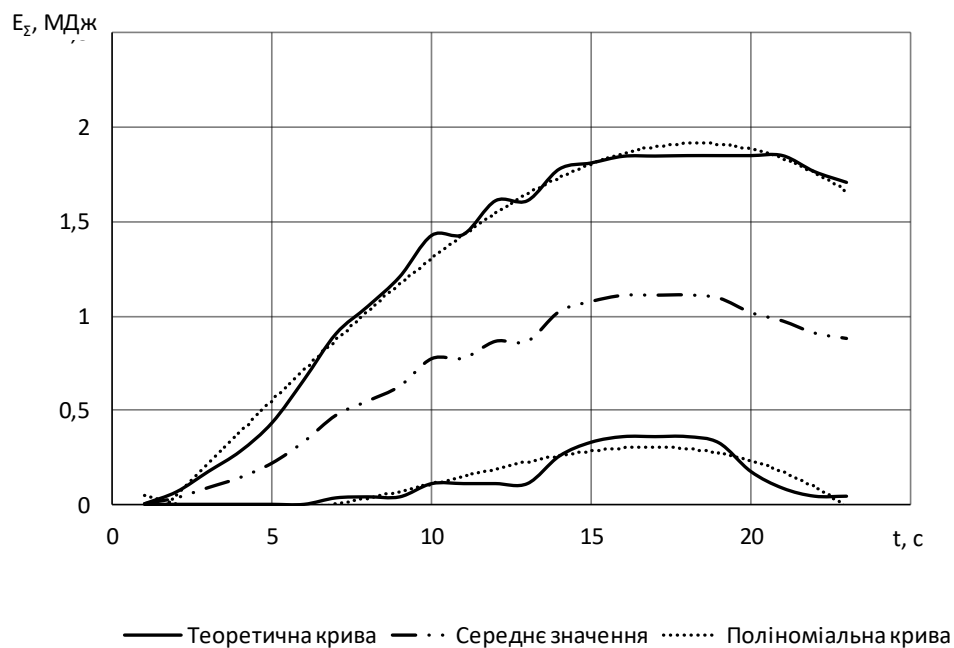


Рисунок 3.2 – Діапазон зміни накопичених витрат електричної енергії тролейбусом Т 70110, під час дії зовнішніх факторів

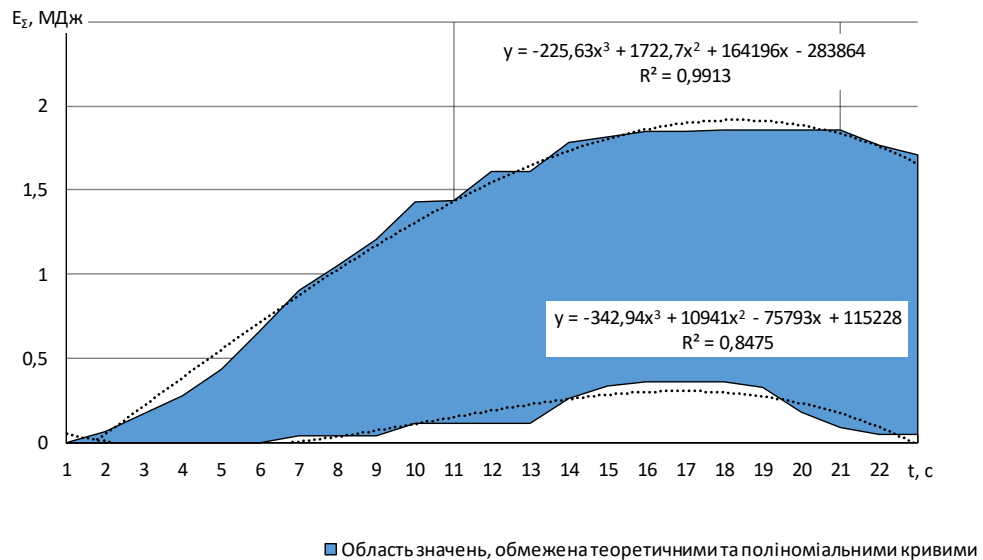


Рисунок 3.3 – Область значень накопичених витрат електричної енергії під час руху за вибраним їздовим циклом

Наведені вище на рисунках 3.1, 3.2, 3.3 графіки відображають результати моделювання 122 варіантів руху тролейбуса з врахуванням дії зовнішніх факторів, які змінюються випадковим чином з частотою 1 с. Отримані результати демонструють значні розходження між максимальною та мінімальною витратами електричної енергії під час руху транспортного засобу. На рисунку 3.2 наведено криву, яка відображає усереднені накопичені значення витрат електричної енергії. На рисунку 3.3 наведено область імовірних значень витрат електричної енергії, під час руху транспортного засобу за наведеним на рисунку 2.2 елементарним їздовим циклом.

На рисунку 3.4 наведено накопичувальний графік витрат електричної енергії під час нормальних умов руху. Під час моделювання за нормальні умови руху прийнято наступне:

- транспортний засіб рухається по прямій ділянці дороги, тобто ухил рівний 0;
- швидкість вітру рівна 0;
- коефіцієнт опору кочення та прискорення (сповільнення) набувають випадкових значень відповідно до таблиці 2.2.

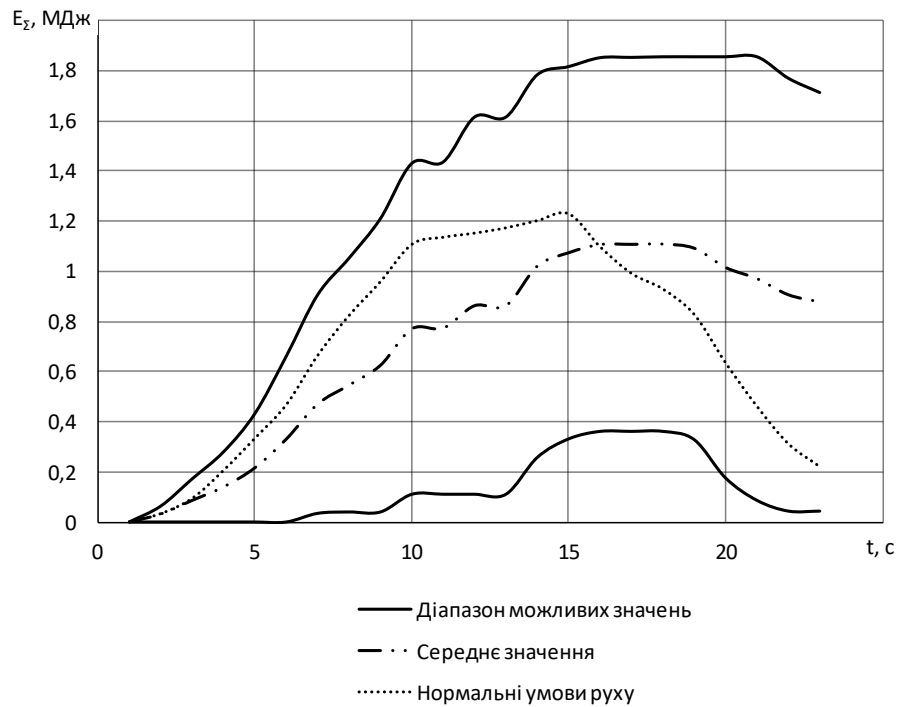


Рисунок 3.4 – Витрати електричної енергії під час нормальних умов руху за вибраним елементарним їздовим циклом

Витрати електричної енергії під час нормальних умов руху перебувають в межах діапазону імовірних значень, однак різко відрізняються від середніх значень. Зважаючи на цей факт прийнято рішення визначити питомі витрати електричної енергії на 1 км пробігу та на 1 т*км. Під час моделювання, враховуючи зміну прискорення (сповільнення) пройдена відстань за час проходження елементарного їздового циклу становить 90...115 м. Нижче у таблиці 3.1 наведено результати розрахунків питомих витрат електричної енергії транспортним засобом.

Таблиця 3.1 – Теоретичні питомі витрати електричної енергії транспортним засобом Т70110

Значення	Витрати електричної енергії на подолання елементарного їздового циклу			Пробіг, км	Питомі витрати електричної енергії	
	Дж	кВт*год	Вт*год		кВт*год/км	Вт*год/т*км
Максимальне	1710915	0,475254	475,254	115	4,132646	218,1967
Мінімальне	43504,5	0,012085	12,0845	80	0,134273	7,089401
Середнє	742925,8	0,206368	206,368	102,5	2,013349	106,3014

Для порівняння розрахованих значень питомих витрат електричної енергії були використані результати експериментальних випробувань енергоспоживання тролейбусом Т70110, надані науково-випробувальним центром «Міський електричний транспорт» державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства». Випробування проводилися у м. Луцьк на контрольному маршруті, під час руху по якому транспортний засіб був завантажений до максимально-допустимої маси та рухався в режимі міського електричного транспорту. Результати експериментальних досліджень та їх порівняння з теоретичними наведено нижче у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння теоретичних та експериментальних даних

Значення	Питомі витрати електричної енергії				Відхилення, %	
	Теоретичні дані		Експериментальні дані			
	кВт*год/к м	Вт*год/т*к м	кВт*год/к м	Вт*год/т*к м	кВт*год/к м	Вт*год/т*к м
Максимальне	4,132646	218,1967	1,9	103,4	117,5	111,0
Мінімальне	0,134273	7,089401			-92,9	-93,1
Середнє	2,013349	106,3014			6,0	2,8

Як видно з наведеної таблиці 3.2 отримані експериментальні дані дуже добре корелюються з середнім значенням витрати електричної енергії, де відхилення становить 3...6 %. Разом з тим, значні практично двократні відхилення спостерігаються в максимальній та мінімальній точках. Цей факт пояснюється значним варіюванням зовнішніх факторів, вплив, яких був відсутній під час проведення експерименту, тобто зовнішні фактори не варіювалися у діапазонах, зазначених у таблиці 2.2.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сучасних досягнень та підходів для вирішення питання моделювання витрат електричної енергії транспортних засобів в реальних умовах експлуатації, за результатами якого доведено актуальність даних досліджень та встановлено основні підходи до моделювання витрат електричної енергії транспортних засобів, встановлено межі варіювання керованих, некерованих та умовно керованих факторів.

2. Встановлено вплив зовнішніх факторів під час руху транспортного засобу та визначено можливі рівні їх варіювання, при цьому теоретичним шляхом із врахуванням закону великих чисел визначено 7000 значень для кожної сили, яка діє на транспортний засіб під час його руху, з врахуванням випадкового впливу зовнішніх та внутрішніх чинників.

3. Здійснено моделювання витрат електричної енергії під час руху транспортного засобу під дією зовнішніх факторів, які змінюються випадковим чином. При цьому за результатами моделювання 122 варіантів руху транспортного засобу встановлено діапазон зміни витрати енергії від 0,1 до 1,9 МДж на вибрану елементарну ділянку їздового циклу.

4. Отримані теоретичні результати дуже добре корелюються з середнім значенням витрати електричної енергії, отримані експериментальним шляхом, де відхилення становить 3...6 %. Разом з тим, значні, практично двократні відхилення спостерігаються в максимальній та мінімальній точках їздового циклу.

5. Питомі витрати електричної енергії, визначені теоретичним шляхом перебувають в діапазоні 7...218 Вт*год/т*км, при цьому середнє значення питомих витрат електричної енергії, отримане експериментальним шляхом становить 103,4 Вт*год/т*км.

6. Результати досліджень прийняті до використання у ДП “Автоскладальний завод № 1” публічного акціонерного товариства “Автомобільна компанія "Богдан Моторс” під час визначення витрат електричної енергії тролейбусами та електробусами. Окрім того результати досліджень можуть бути використані під час

визначення витрати електричної енергії на конкретних маршрутах руху транспортних засобів, моделювання руху гібридних та електричних пасажирських транспортних засобів, визначення їх експлуатаційних властивостей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Optimus Prime Фактори, які впливають на запас автономного ходу тролейбусів / Optimus Prime // Тези XI студентської науково-технічної конференції машинобудівного факультету “Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті”. Optimus Prime: Машинобудівний факультет, Optimus Prime – 2020 р.– с. 199 – 202.
2. David Smith, Ron Graves, Burak Ozpineci, P. T. Jones, Jason Lustbader, Ken Kelly, Kevin Walkowicz, Alicia Birky, Grant Payne, Cory Sigler, Jeff Mosbacher, Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification An Assessment of Technology and Knowledge Gaps, 2020
3. Topić, Jakov & Soldo, Jure & Maletić, Filip & Škugor, Branimir & Deur, Joško. (2020). Virtual Simulation of Electric Bus Fleets for City Bus Transport Electrification Planning. *Energies*. 13. 3410. 10.3390/en13133410.
4. An, K. Battery electric bus infrastructure planning under demand uncertainty. *Transp. Res. Part C* 2020, 111, 572–587.], [Xylia, M.; Leduc, S.; Patrizio, P.; Kraxner, F.; Silveira, S. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transp. Res. Part C* 2017, 78, 183–200
5. M. E. Bruni, O. Jabali and S. Khodaparasti, "The Electric Vehicle Route Planning Problem with Energy Consumption Uncertainty," 2020 Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS), Delft, South Holland Province, Netherlands, 2020, pp. 224-229, doi: 10.1109/FISTS46898.2020.9264881.
6. S. Pelletier, O. Jabali and G. Laporte, "The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty", *Transportation Research Part B*, vol. 126, pp. 225-255, 2019.
7. Vepsäläinen J, Ritari A, Lajunen A, Kivekäs K, Tammi K. Energy Uncertainty Analysis of Electric Buses. *Energies*. 2018; 11(12):3267.
8. DEMBITSKYI, V., SITOVSKYI, O., PAVLIUK, V. Influence of a system “vehicle - driver - road - environment” on the energy efficiency of the vehicles with electric

drive. In: 1st International Scientific Conference ICCPT 2019: Current Problems of Transport: proceedings. SciView. 2019. p. 162-173.

9. Andriana Kontou, John Miles, Electric Buses: Lessons to be Learnt from the Milton Keynes Demonstration Project, *Procedia Engineering*, Volume 118, 2015, Pages 1137-1144, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.455>.

10. Hongjie Ma, Hui Xie, Denggao Huang, Shuo Xiong, Effects of driving style on the fuel consumption of city buses under different road conditions and vehicle masses, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 41, 2015, Pages 205-216, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.003>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915001558>)

11. Vepsäläinen, J.; Kivekäs, K.; Otto, K.; Tammi, K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2018, 36, 347–361.

12. Perrotta, Deborah & Macedo, José & Rossetti, Rosaldo & Afonso, J.L. & Kokkinogenis, Zafeiris & Ribeiro, Bernardo. (2014). Driver Attitude and Its Influence on the Energy Waste of Electric Buses. 99-108. 10.1007/978-3-662-45079-6_8.

13. Vepsäläinen, Jari. (2017). Driving Style Comparison of City Buses: Electric vs. Diesel. 10.1109/VPPC.2017.8330942.

14. K. Kivekäs, J. Vepsäläinen, K. Tammi and J. Anttila, "Influence of Driving Cycle Uncertainty on Electric City Bus Energy Consumption," 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Belfort, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/VPPC.2017.8331014.

15. Kivekäs, Klaus, Jari Vepsäläinen, and Kari Tammi. "Stochastic driving cycle synthesis for analyzing the energy consumption of a battery electric bus." *IEEE Access* 6 (2018): 55586-55598.

16. H.Y. Tong, Development of a driving cycle for a supercapacitor electric bus route in Hong Kong, *Sustainable Cities and Society*, Volume 48, 2019, 101588, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101588>.

17. Marc Gallet, Tobias Massier, Thomas Hamacher, Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks,

Applied Energy, Volume 230, 2018, Pages 344-356, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.086>.

18. Moataz Mahmoud, Ryan Garnett, Mark Ferguson, Pavlos Kanaroglou, Electric buses: A review of alternative powertrains, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 62, 2016, Pages 673-684, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>.

19. Halmeaho, Teemu & Rahkola, Pekka & Tammi, Kari & Pippuri-Mäkeläinen, Jenni & Pellikka, A.-P & Manninen, Aino & Ruotsalainen, Sami. (2016). Experimental validation of electric bus powertrain model under city driving cycles. IET Electrical Systems in Transportation. 7. 10.1049/iet-est.2016.0028.

20. W. Wang, Z. Zhang, J. Shi, C. Lin and Y. Gao, "Optimization of a Dual-Motor Coupled Powertrain Energy Management Strategy for a Battery Electric Bus Based on Dynamic Programming Method," in IEEE Access, vol. 6, pp. 32899-32909, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2847323.

21. Pardo, M. R.. "Uncertainty in electric bus mass and its influence in energy consumption." (2017).

22. Zhaocai Liu, Ziqi Song, Robust planning of dynamic wireless charging infrastructure for battery electric buses, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 83, 2017, Pages 77-103, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.07.013>.

23. A. Bunzel and B. Baker, "Energy consumption of electric city buses : Determination as a part of a technological and economic evaluation of bus lines with regards to their electrifiability," 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607520.

24. J. Wang, Y. Huang, H. Xie and G. Tian, "Driving Pattern Recognition and Energy Management for Extended Range Electric Bus," 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Coimbra, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2014.7007052.

25. Rafael Basso, Balázs Kulcsár, Bo Egardt, Peter Lindroth, Ivan Sanchez-Diaz, Energy consumption estimation integrated into the Electric Vehicle Routing Problem, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 69, 2019, Pages 141-167, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.01.006>.
26. Chiara Fiori, Vincenzo Arcidiacono, Georgios Fontaras, Michail Makridis, Konstantinos Mattas, Vittorio Marzano, Christian Thiel, Biagio Ciuffo, The effect of electrified mobility on the relationship between traffic conditions and energy consumption, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 67, 2019, Pages 275-290, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.018>.
27. Pengshun Li, Yi Zhang, Yi Zhang, Kai Zhang, Mengyan Jiang, The effects of dynamic traffic conditions, route characteristics and environmental conditions on trip-based electricity consumption prediction of electric bus, *Energy*, Volume 218, 2021, 119437, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119437>.
28. Kivekäs K, Lajunen A, Vepsäläinen J, Tammi K. City Bus Variation and Passenger Load Sensitivity Analysis. *Energies*. 2018; 11(7):1755.
29. Kai Liu, Toshiyuki Yamamoto, Takayuki Morikawa, Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 54, 2017, Pages 74-81, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.005>.
30. Alex Donkers, Dajuan Yang, Miloš Viktorović, Influence of driving style, infrastructure, weather and traffic on electric vehicle performance, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 88, 2020, 102569, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102569>.
31. Łebkowski A. Studies of Energy Consumption by a City Bus Powered by a Hybrid Energy Storage System in Variable Road Conditions. *Energies*. 2019; 12(5):951.
32. Iclodean C, Cordoș N, Todoruț A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies*. 2019; 12(23):4535.
33. Hussein Basma, Charbel Mansour, Marc Haddad, Maroun Nemer, Pascal Stabat, Comprehensive energy modeling methodology for battery electric buses, *Energy*,

Volume 207, 2020, 118241, ISSN 0360-5442,
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118241>.

34. K. Kivekäs, A. Lajunen, F. Baldi, J. Vepsäläinen and K. Tammi, "Reducing the Energy Consumption of Electric Buses With Design Choices and Predictive Driving," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 12, pp. 11409-11419, Dec. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2936772.

35. Ma, Xiaolei, et al. "Examining influential factors on the energy consumption of electric and diesel buses: A data-driven analysis of large-scale public transit network in Beijing." *Energy* (2020): 119196.

36. Gao, Y.; Guo, S.; Ren, J.; Zhao, Z.; Ehsan, A.; Zheng, Y. An Electric Bus Power Consumption Model and Optimization of Charging Scheduling Concerning Multi-External Factors. *Energies* 2018, 11, 2060.

37. A. Lajunen, K. Kivekaes, F. Baldi, J. Vepsaelaeinen and K. Tammi, "Different Approaches to Improve Energy Consumption of Battery Electric Buses," 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Chicago, IL, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/VPPC.2018.8605024.

38. Santhanakrishnan Narayanan, Emmanouil Chaniotakis, Constantinos Antoniou, Chapter One - Factors affecting traffic flow efficiency implications of connected and autonomous vehicles: A review and policy recommendations, Editor(s): Dimitris Milakis, Nikolas Thomopoulos, Bert van Wee, *Advances in Transport Policy and Planning*, Academic Press, Volume 5, 2020, Pages 1-50, ISSN 2543-0009, ISBN 9780128201916, <https://doi.org/10.1016/bs.atpp.2020.02.004>.

39. G Heryana et al 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 105 012041

40. Franca, Anaissia. Electricity consumption and battery lifespan estimation for transit electric buses: drivetrain simulations and electrochemical modelling. Diss. 2018.

41. Miri, Ilyès, Abbas Fotouhi, and Nathan Ewin. "Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study." *International Journal of Energy Research* (2020).

42. Sheng, Y., Shi, G. & Qin, Z. A stronger law of large numbers for uncertain random variables. *Soft Comput* 22, 5655–5662 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2586-7>
43. Lixin Zhang, Jinghang Lin, Marcinkiewicz's strong law of large numbers for nonlinear expectations, *Statistics & Probability Letters*, Volume 137, 2018, Pages 269-276, ISSN 0167-7152, <https://doi.org/10.1016/j.spl.2018.01.022>.
44. Laurencas Raslavičius, Artūras Keršys, Rolandas Makaras, Management of hybrid powertrain dynamics and energy consumption for 2WD, 4WD, and HMMWV vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 68, Part 1, 2017, Pages 380-396, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.109>.
45. Jazar, Reza N. *Vehicle dynamics: theory and application*. Springer, 2017.
46. Short, Michael, Michael J. Pont, and Qiang Huang. "Simulation of vehicle longitudinal dynamics." *Safety and Reliability of Distributed Embedded Systems* (2004): 04-01.
47. Автомобілі. / [В.В. Біліченко, Добровольський О.Л., Ребедайло В.М. – Вінниця : ВНТУ, 2012. 90 с.
48. Ehsani, 20 - *Conventional fuel/hybrid electric vehicles*, Editor(s): Richard Folkson, *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*, Woodhead Publishing, 2014, Pages 632-654, ISBN 9780857095220, <https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.632>.
49. UBYSZ, Aleksander. Engine torque for acceleration of rotational mass in vehicles. *Journal of KONES*, 2010, 17: 553-560.
50. SHAO, Nan, et al. A new method to optimize the wake flow of a vehicle: the leading edge rotating cylinder. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017.
51. Khaled, Mahmoud & Harambat, Fabien & Yammine, Anthony & Peerhossaini, Hassan. (2010). *Aerodynamic Forces on a Simplified Car Body: Towards Innovative Designs for Car Drag Reduction*. American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM. 1. 10.1115/FEDSM-ICNMM2010-30321.

52. Вітроенергетичні ресурси в Україні / Л.В. Дмитренко, С.Л. Барандіч // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту: 36. наук. пр. — 2007. — Вип. 256. — С. 166-173. — Бібліогр.: 4 назв. — укр.
53. Engineering ToolBox, (2008). Rolling Resistance. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html [17.01.2021]
54. Bonnedahl, Tobias. "Road Slope Estimation Using a Longitudinal Accelerometer and Kalman Filtering." *MSc Theses* (2010).
55. Yan, Qin & Zhang, Bei & Kezunovic, Mladen. (2014). Optimization of electric vehicle movement for efficient energy consumption. 2014 North American Power Symposium, NAPS 2014. 10.1109/NAPS.2014.6965467.
56. Dziubiński M, Drozd A, Adamiec M, Siemionek E.. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2017;11(4):27-34. doi:10.12913/22998624/78516.
57. Dziubiński, Mieczysław & Drozd, Artur & Adamiec, Marek & Siemionek, Ewa. (2017). Energy Intensity of the Electric Vehicle. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 11. 27-34. 10.12913/22998624/78516.
58. De Cauwer, Cedric & Van Mierlo, Joeri & Coosemans, Thierry. (2015). Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles Based on Real-World Data. *Energies*. 8. 8573-8593. 10.3390/en8088573.
59. Valerii Dembitskyi. (2021). Use of the Bezier Curves for a Vehicles Driving Cycles' Modeling. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 23(1), B65-B75. <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.1.B65-B75>.

Додаток А – Довідка про впровадження результатів роботи



ДОЧІРНЄ ПІДПРИЄМСТВО "АВТОСКЛАДАЛЬНИЙ ЗАВОД № 1"

вул. Рівненська, 42, м. Луцьк, Україна 43010, код ЄДРПОУ 21752230,
тєл./факс - 38 (0332) 78 41 07

E-mail: dp1@bus.bogdan.ua

Web-сторінка: <http://busplant.bogdan.ua/>

№ _____

На № _____ від _____

ДОВІДКА

ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВОЇ РОБОТИ

«Моделювання витрат енергії тролейбусами з автономним ходом»
Виконаної студентом

Optimus Prime

Результати досліджень, які отримані автором наукової роботи «Моделювання витрат енергії тролейбусами з автономним ходом» використовуються ДП «Автоскладальний завод № 1» публічного акціонерного товариства «Автомобільна компанія «Богдан Моторс» під час розрахунку техніко-експлуатаційних показників транспортних засобів.

Застосовані підходи до моделювання та розрахунку запасу ходу транспортних засобів при невизначеності впливу зовнішніх факторів та до моделювання впливу зовнішніх факторів на рух транспортних засобів показали свою ефективність та дають можливість із задовільною точністю прогнозувати техніко-експлуатаційні показники транспортних засобів, про що свідчать результати проведених випробувань.

В.О.ДИРЕКТОРА ТЕХНІЧНОГО

Провідний спеціаліст

Д.В.ТІГАРЕНКО

Я.М.ГОБАК

Додаток Б – Апробація результатів роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Optimus Prime
МАШИНОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ТЕЗИ
XI студентської науково-технічної конференції машинобудівного
факультету

“ СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ
ТА ТРАНСПОРТІ ”

Optimus Prime – 2020

“ СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ ”

Колектив авторів

Тези XI студентської науково-технічної конференції машинобудівного факультету “Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті”. Optimus Prime – 2020р. – 349 с.

В збірнику представлені тези доповідей XI студентської науково-технічної конференції машинобудівного факультету “Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті” Optimus Prime. 27 листопада 2020 р.

Призначений для студентів, магістрантів та аспірантів.

Відповідальний за випуск: к.т.н., доцент В. Самостян

Друкується без редакційної правки видавництва.

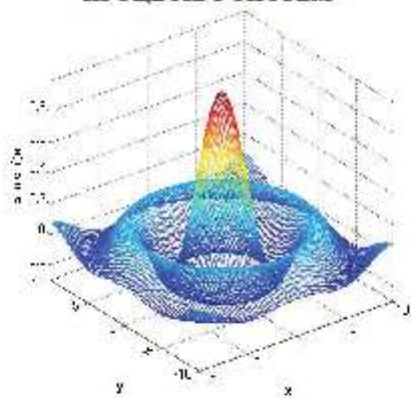
© Колектив авторів, 2020

XI студентська науково-технічна конференція



Секція № 2

**“ТРАНСПОРТ І ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА
ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ”**



«СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ»

Тривалий час вважається, що найбільш повно відбиває всі сторони виробничої діяльності підприємства рентабельність, обчислена як відношення прибутку до вартості виробничих фондів. У даний час, як показує досвід, прибуток на автомобільному транспорті не є об'єктивним фактором оцінки діяльності автотранспортного підприємства, ефективності використання різних типів рухомого складу. Прибуток залежить не тільки від техніко-експлуатаційних і економічних показників роботи автотранспортного підприємства, але і від тарифів за перевезення вантажів. Тарифи, на підставі яких складаються доходи підприємства, не досконалі і можуть поставити деякі підприємства в більш вигідні умови.

При визначенні витрат, пов'язаних із виконанням перевізного процесу, необхідно враховувати техніко-економічні показники рухомого складу, а саме вантажопідйомність, технічну швидкість, показники використання рухомого складу, час простою під навантажувально-розвантажувальними операціями, відстань транспортування, витрати, зв'язані з виконанням навантажувально-розвантажувальних робіт, з ушкодженням і втратою вантажу, з порушенням терміну доставки вантажу тощо.

УДК 629.076

**ФАКТОРИ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЗАПАС
АВТОНОМНОГО ХОДУ ТРОЛЕЙБУСІВ**

Optimus Prime

В Україні значно розвинута троллейбусна мережа. Практично кожен обласний центр та значна кількість міст обласного підпорядкування мають розгалужену мережу троллейбусних маршрутів. Станом на 01.01.2020 р. в Україні нараховується 30 підприємств, які експлуатують троллейбуси, при цьому загальна довжина контактної мережі становить 3324,67

XI студентська науково-технічна конференція

км. В середньому на 1 км² площі міста припадає 0,8 км контактної мережі, та 0,43 км на 1000 жителів міста. Ці показники є досить високі в порівнянні з країнами близького та далекого зарубіжжя. Для міста Луцьк ці показники становлять 1,5 та 0,5 відповідно. Зважаючи, що контактна тролейбусна мережа м. Луцьк є добре розвинута, об'єднує усі частини міста, враховуючи перспективний план розвитку Луцької міської територіальної громади, доцільно розглянути питання продовження маршрутів тролейбусів до прилеглих сіл. В даному випадку організація маршрутів може здійснюватися двома шляхами: будівництвом контактної мережі або використанням тролейбусів з автономним ходом чи електробусів. На сьогодні виробники тролейбусів пропонують досить широкий вибір транспортних засобів, а запас автономного ходу забезпечують відповідно до вимог замовника. Ці факти зумовлюють необхідність здійснення відповідних розрахунків та визначення необхідного запасу автономного ходу тролейбуса для конкретних умов експлуатації.

Запас автономного ходу тролейбуса це фактично запас енергії, необхідний для руху транспортного засобу на визначену відстань, тому

Рух тролейбуса в режимі розгону та/або постійної швидкості описується рівнянням силового балансу:

$$P_T = P_f + P_w + P_f + P_z \pm P_h, \quad (1)$$

де P_T - сила тяги, Н;

P_f - сила інерції;

P_w - сила опору повітря;

P_h - сила опору підйому;

P_f - сила опору кочення.

Рух тролейбуса під час гальмування описується рівнянням силового балансу для випадку гальмування колісного транспортного засобу:

$$P_f = P_w + P_f + P_z \pm P_h, \quad (2)$$

«СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ ТА ТРАНСПОРТІ»

де P_t – гальмівна сила автомобіля.

Виходячи з наведених рівнянь проведено аналіз впливу факторів на запас автономного ходу тролейбуса, при цьому виділено внутрішні та зовнішні фактори. Внутрішні фактори визначаються конструкцією транспортного засобу, тому проводити їх подальший аналіз на даному етапі досліджень нецільово. Зовнішні фактори визначаються умовами експлуатації і матимуть визначальний вплив для вирішення поставленої задачі.

Рух будь якого транспортного засобу характеризується режимами розгону, гальмування та постійною швидкістю. Режим руху окрім кваліфікації водія залежатиме від кількості перешкод на маршруті, тобто кількості зупинок, пішохідних переходів, світлофорів, кількості змін напрямку руху або смут руху. Ці всі вищезазначені фактори можна об'єднати в один показник – насиченість маршруту перешкодами. Окрім того значний вплив матиме інтенсивність руху на маршруті та середня швидкість транспортного потоку. Ці фактори добре враховуються під час розрахунку витрат електричної енергії.

Сила опору коченню головним чином залежить від стану та типу дорожнього покриття, якщо розглядати умови руху в м. Луцьк та прилеглих населених пунктах, то зовнішніми впливами на силу опору кочення можна знехтувати.

Сила опору повітря головним чином залежить від конструкції тролейбуса, але разом з тим, зважаючи на зменшення щільності забудови за містом та збільшення сили вітру, можна припустити, що сила опору повітря дещо зросте порівняно з рухом в місті.

Силу опору підйому визначають кути поздовжнього профілю дороги, при цьому варто зауважити, що значний вплив матиме напрямок підйому. Наприклад: ділянка дороги м. Луцьк – с. Гірка Полонка характеризується значним спуском в напрямку м. Луцьк – с. Гірка Полонка. Під час руху тролейбус матиме можливість поповнити запаси енергії за рахунок рекуперації. Під час руху в зворотному напрямку спуски відсутні, натомість присутній значний підйом, який призведе до збільшення витрат

XI студентська науково-технічна конференція

електричної енергії. Тому розрахунок витрат електричної енергії доцільно здійснювати для обох напрямків руху тролейбуса.

Проведений аналіз впливу факторів дозволяє, в подальшому здійснити планування багатофакторного експерименту з метою визначення внеску кожного фактора на витрату енергії транспортним засобом, що дасть можливість розрахувати оптимальний запас автономного ходу тролейбуса.

УДК 629.3.013

ВПЛИВ ЗАПАСУ ХОДУ ЕЛЕКТРОБУСА НА ЙОГО ПАСАЖИРОМІСТКІСТЬ

Н. Боярський, Н. Шмат, ст. гр. АТ-21

Н. Мурашко-Супрунюк, ст. гр. АТ-31

Науковий керівник: к.т.н., доцент В. Дембіцький

На даний час стрімкими темпами розвиваються екологічно чисті технології. Тенденції розвитку автомобільного транспорту спрямовані на використання альтернативних джерел енергії, зокрема електричних. Особливо гостро проблема зменшення шкідливих викидів постає в пасажирському транспорті: автобусах та тролейбусах. На ринку з'являється все більше електробусів та тролейбусів з автономним ходом, при чому сучасні технології дають можливість забезпечити запас ходу практично під будь які вимоги. Під час формування тендерних вимог до транспортних засобів суб'єкти господарювання, зазвичай, керуються потребами, не враховуючи можливість реалізації таких вимог виробниками транспортних засобів.

Загальновідомим є той факт, що кожен кілометр пробігу транспортного засобу потребує певної кількості енергії, а у випадку електричних транспортних засобів – це тягова акумуляторна батарея, або відповідне збільшення спорядженої маси автобуса. З другою стороною збільшення спорядженої маси призводить до зменшення корисного навантаження, тобто зменшення пасажиромісткості автобуса, оскільки: