

УДК 629.341

ЕЛЕКТРОБУС НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ ДЛЯ МІСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

**А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н., О.В. Бикова, зав. лаб.,
О.В. Підгора, студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет**

Анотація. Проведено аналіз існуючих енергоефективних міських автобусів, а саме гібридних автобусів та електробусів. Виконано розрахунок енергетичних показників електробуса на суперконденсаторах для одного з маршрутів м. Харкова. Запропоновано як основний накопичувач електроенергії використовувати блок суперконденсаторів. Розраховано витрати на паливе (електроенергію) на один день роботи для дизельного, гібридного та електричного автобуса.

Ключові слова: електробус, гібридний автобус, суперконденсатор, електротранспорт, акумуляторна батарея, енергоефективні технології.

ЭЛЕКТРОБУС НА СУПЕРКОНДЕНСАТОРАХ ДЛЯ ГОРОДСКИХ ПЕРЕВОЗОК

**А.В. Гнатов, проф., д.т.н., Щ.В. Аргун, доц., к.т.н., Е.В. Быкова, зав. лаб.,
А.В. Пидгора, студент, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет**

Аннотация. Проведен анализ существующих энергоэффективных городских автобусов, а именно гибридных автобусов и электробусов. Выполнен расчет энергетических показателей электробуса на суперконденсаторах для одного из маршрутов г. Харькова. Предложено в качестве основного накопителя электроэнергии использовать блок суперконденсаторов. Рассчитаны расходы на горючее (электроэнергию) на один день работы для дизельного, гибридного и электрического автобуса.

Ключевые слова: электробус, гибридный автобус, суперконденсатор, электротранспорт, аккумуляторная батарея, энергоэффективные технологии.

ULTRACAPACITOR ELECTROBUS FOR URBAN TRANSPORT

**A. Gnatov, Prof., Doct. of Science, Sch. Argun, Assoc. Prof., Ph. D.,
Ye. Bykova, head of laboratory, A. Pidgora, student,
Kharkiv National Automobile and Highway University**

Abstract. Analysis of existing energy-efficient urban buses, namely hybrid buses and electrobuses was carried out in this paper. The energy indicators of ultracapacitor electrobus for one of Kharkiv bus routes were calculated. It was proposed to use the ultracapacitor unit as the main electricity storage. The expenses for fuel (electricity) for one working day of the diesel bus, hybrid bus and electrobus were calculated.

Key words: electrobus, hybrid bus, ultracapacitor, electric transport, accumulator battery, energy-efficient technology.

Вступ

Одна з найбільш нагальних і актуальних проблем у галузі автобусних перевезень – екологічність транспорту. Особливо гостро ця проблема стоїть при забезпеченні міських перевезень і є однією з головних причин появи електрогібридних автобусів і електробусів. Частка пасажирських міських перевезень

в Україні становить приблизно 82 %, приміських – 15 %, міжміських – 3 %, а міжнародних – 0,002 %. Міські автобуси щодня проїжджають по 200–250 км. Отже, стоїть завдання створити екологічно чистий автобус – електробус, який забезпечить такий пробіг або його частину, якщо є можливість в підзарядженні в процесі його експлуатації [1].

У Радянському Союзі існував норматив: 200000 населення – з'являється тролейбус, 500000 – трамвай, мільйон – метро. В автобусів мінімальна вивізна здатність, у тролейбуса – більше, метро – ще більше. Відповідно в Україні є електричні мережі, до яких тролейбуси й електробуси можуть підключатися.

Останнім часом багато країн активно переходить на стандарти «Євро-4», «Євро-5», відповідно до яких європейське співтовариство стимулює виробників створювати техніку більш ефективною та технологічною, а міській владі – використовувати цей вид техніки.

У гібридному (як і в електро-) транспорті економія відбувається за рахунок гальмування. А це найбільш актуальний режим для міста. Отже, режим рекуперації енергії – це один з найбільш важливих аспектів у сучасному міському електробусі [1, 2].

Розрахунок, проектування та створення електробуса для категорії «міський автобус» є актуальною й важливою науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить не тільки втілити енергоефективні технології в міський транспорт, а й майже повністю зробити його екологічно чистим та безпечним для навколишнього середовища та населення.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є проведення аналізу наявних енергоефективних та екологічних міських автобусів і розрахунок електробуса на суперконденсаторах для одного з маршрутів м. Харкова.

Аналіз публікацій

Автобус (скорочення від «автомобіль-онібус») – безрейковий механічний транспортний засіб, призначений для перевезення восьми і більше пасажирів, який приводиться в рух енергією, запасеною або виробленою з палива, що зберігається на борту, або з будь-яким іншим видом автономної тяги (автобус у традиційному розумінні) [3].

До енергоефективних та екологічно чистих транспортних автобусів можна віднести гібридні моделі та електробуси. Так, наприклад, компанія «Volvo Buses» (рис. 1) після кількох років наполегливої праці над гібридними технологіями запустила в серійне ви-

робництво дизель-електричні автобуси [4]. Гібридні автобуси дозволяють максимально знизити витрату палива, забезпечуючи мінімальний викид шкідливих речовин в атмосферу. Гібридний автобус витрачає в середньому на 30–35 % дизельного палива менше, ніж звичайна міська модель аналогічного дизельного автобуса.



Рис. 1. Автобус Volvo 7700 Hybrid

Интерес до електричного громадського транспорту зростає пропорційно зростанню вартості палива. Але є ще один стимулюючий чинник, що примушує уряд багатьох країн замислитися про електричні автобуси – їх екологічність. На відміну від тролейбуса, автобус не потребує контактної мережі й повністю мобільний, але при цьому працює на електриці, накопиченій у тягових акумуляторних батареях [5].

Сьогодні стало трендом турбуватися про навколишнє середовище. Доказом тому є успішність втілення електробусів у категорію міських перевезень у розвинених країнах по всьому світу. Найбільшим представником електробусів є компанія «BYD Auto» з моделлю K9 (Китай) (рис. 2).



Рис. 2. Електробус BYD K9

Екологічно чисті автобуси BYD здатні в міському режимі долати 250–300 км шляху без підзарядження. Їх час зарядження – 3 години на спеціальних терміналах [5].

Електроавтобус зі швидким зарядженням

Новий транспортний засіб є проміжною ланкою між звичайним електричним транспортом і тролейбусами. Автобус заряджається від особливо швидких зарядних установок під час посадки/висадки пасажирів і здатний їздити маршрутом без необхідності у багатогодинній зарядці батарей [6].

У Люксембурзі компанія «АВВ» запустила автоматичні системи швидкого зарядження, яка може прибрати один з головних бар'єрів для збільшення використання міських електричних автобусів – тривалий час зарядження при коротких відстанях пробігу (рис. 3) [7].



Рис. 3. Швидке зарядження електроавтобусів (м. Люксембург)

З автоматичним підключенням на даху час звичайного зарядження електробуса триває 4–6 хв. Систему можна легко інтегрувати в наявні автобусні лінії, встановивши швидкі пристрої зарядження на кінцевих зупинках, терміналах, депо і (або) на проміжних зупинках.

Для того, щоб з'ясувати, який автобус буде менше споживати палива (або електричної енергії), проведемо порівняння звичайного дизельного автобуса, гібридного автобуса, електричного автобуса на акумуляторах та автобуса на суперконденсаторах.

Для коректного подання даних обрано один маршрут у м. Харків («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 147). Довжина шляху в один бік дорівнює 20,4 км. Час руху становить 55 хв. Кількість зупинок – 36.

У Харкові цим маршрутом їздить дизельний автобус «Богдан А091». На один маршрутний проїзд витрачається 6,7 літра дизельного пального. За один день автобус робить 10 таких поїздок. Ціна 1 літра дизельного пального – 16,80 грн. Витрати на пальне на один день складають 1126 грн.

Якщо обрати гібридний автобус, для приведення в рух якого використовується не тільки дизельний двигун, а й електричний двигун потужністю 180 кВт, то отримаємо приблизно 35 % економії дизельного палива. Отже, витрати на дизельне пальне для гібридного автобуса на обраний маршрут м. Харкова будуть складати 732 грн.

Якщо обрати електробус, який приводиться в рух електричним двигуном потужністю 230 кВт, то експлуатаційні затрати на один робочий день будуть значно менші. Львівський автобус «Електрон Е 19101» може проїхати без підзарядження до 210 км, а щоб підзарядитися на 70 %, необхідно усього 15–20 хв. Таким чином такий автобус якраз підходить для цього маршруту. На автобусі «Електрон Е 19101» стоять акумуляторні батареї ємністю 120 кВт·год. Отже, на один робочий день електробус витратить 120 кВт. Ціна 1 кВт електроенергії для промислового споживання дорівнює 1,38 грн. Відповідно на один робочий день буде витрачено 165 грн. на електричну енергію. А якщо проводити зарядження акумуляторних батарей уночі (за нічним тарифом), то це буде удвічі менше – приблизно 85–90 грн.

Електробус «Електрон Е 19101» буде більш економічним, порівняно з розглянутими вище, але на ньому стоять звичайні Li-Ion-акумулятори, а термін їх служби при такому інтенсивному використанні становить 3–5 років. Це є значним недоліком таких автобусів.

Електроавтобус на суперконденсаторах

Пропонується обрати електробус, який використовує замість Li-Ion-акумуляторів суперконденсатори (іоністори). Термін служби іоністорів на порядок довший, ніж у Li-Ion акумуляторів (10–15 років, 500000 циклів зарядження–розрядження, а нового типу 1 млн – це 25–30 років).

Пропонується на базі автобуса «Богдан А091» зробити електробус, у якого, на місці для двигуна буде знаходитися блок ультраконденсаторів (3) з апаратурою керування (рис. 4). Два електричні двигуни (4) розміщуються безпосередньо на осі обертання коліс, як це зображено на рис. 4. Зарядний пристрій розташований на даху електробуса, що забезпечить безпечний заряд ультраконденсаторів на зупинках громадського транспорту.

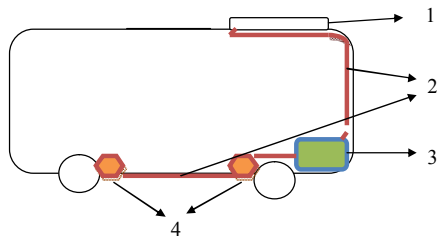


Рис. 4. Схематичне зображення елементів автобуса: 1 – зарядний пристрій; 2 – проводка; 3 – суперконденсатори; 4 – електричні двигуни

Вибір того чи іншого типу електричної машини для електробуса не може бути проведений у відриві від вибору інших елементів тягового електропривода. Застосування кожного типу двигунів несе істотні зміни силового перетворювача, механічних елементів (редукторів, гальм), набору первинних вимірювачів (датчиків положення, швидкості тощо), а також визначає будову системи керування.

Розрахунок енергетичних показників

Для робочого циклу руху по замкнутому маршруту для міського транспорту: розгін – пробіг – гальмування – стоянка, енергія, необхідна для розгону транспортного засобу, містить тільки кінетичну енергію розгону з урахуванням втрат [8]

$$E_1 = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u} \quad (1)$$

Доступна для рекуперації енергія становить

$$E_2 = \frac{K_u \cdot m \cdot V_1^2}{2}, \quad (2)$$

де m – маса транспорту; K_u – сумарний коефіцієнт, що враховує всі втрати під час руху транспорту; V_1 – швидкість транспорту після розгону.

Ефективність рекуперації можна подати як відношення енергії рекуперації до енергії, необхідної на розгін транспортного засобу

$$EF = \frac{E_2}{E_1} \quad (3)$$

Для робочого циклу руху міського транспорту ефективність рекуперації за наявності накопичувача можна подати у вигляді

$$EF = \frac{\varphi \cdot \eta \cdot K_u^2 \cdot V_2^2}{V_1^2}, \quad (4)$$

де η – ККД роботи накопичувача в циклі зарядження–розрядження; φ – ККД роботи DC/DC-перетворювача; V_2 – швидкість транспорту після вибігу.

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

$$E_{\text{пт}} \cdot S = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u},$$

звідки

$$K_u = \frac{V_1^2}{2E_{\text{пт}} \cdot S} \quad (5)$$

де $E_{\text{пт}}$ – питоме енергоспоживання транспорту; S – довжина маршруту в циклі.

Оскільки тролейбуси мають такі ж електротехнічні умови експлуатації, як і розглянутий міський електробус, то для порівняння будемо спиратися на цей вид транспорту.

Досвід експлуатації тролейбусів по міському маршруту ($S \sim 350$ м, $V_1 \sim 45$ км/год, час розгону 20–25 с, час циклу ≈ 60 с) дає величину $E_{\text{пт}} = 85\text{--}100$ Вт·год/(т·км); $\varphi = 0,95$; $\eta = 0,8$. Як правило, для тролейбусів $V_2/V_1 = 0,85$.

Підставляючи відповідні величини у вираз (5), отримуємо: $K_u = 0,65$. З виразу (3) визначаємо ефективність рекуперації

$$EF = \frac{E_2}{E_1} = \frac{0,6}{1,44} = 0,42.$$

Розрахункова енергія, необхідна для розгону автобуса з масою 8 т до швидкості 55 км/год, дорівнює

$$E_1 = \frac{m \cdot V_1^2}{2K_u} = \frac{8000 \cdot 15,3^2}{2 \cdot 0,65} = 1,44 \text{ МДж}.$$

За ефективності рекуперації $EF = 0,42$ енергія, яку буде зекономлено в кожному робочому циклі, становитиме

$$E_{рек} = 1,44 \cdot 0,42 = 0,6 \text{ МДж}.$$

Необхідна енергія для здійснення циклу, з урахуванням рекуперації, дорівнює

$$E_{цик} = 1,44 - 0,6 = 0,83 \text{ МДж}.$$

Середня потужність електродвигуна на розгоні для забезпечення часу розгону 25 с повинна становити

$$P_{ср} = 1,44 / 25 = 57,6 \text{ кВт}.$$

Для того щоб конденсатор забезпечив розгін автобуса протягом всього необхідного часу (25 с), енергія, що віддається при розряді, повинна бути не менше $57,6 \text{ кВт} = 1,425 \text{ МДж}$. Під час гальмування накопичувач може отримати лише 0,6 МДж.

Згідно з проведеними розрахунками визначаємо технічні вимоги для компонентів електричної силової установки у складі міського автобуса «Богдан А091» (табл. 1–3).

Таблиця 1 Технічні вимоги для електробуса «Богдан А091»

Найменування	Значення
1	2
Номінальна потужність електродвигуна, кВт	60
Максимальна потужність електродвигуна, кВт	120 (два по 60)
Номінальна потужність накопичувача, кВт	90
Енергія накопичувача за номінальної потужності, МДж	більше 1,44

Закінчення табл. 1

1	2
Ресурс, цикл	< 1000 000
ККД у циклі зарядження/розрядження (η),	< 0,8
Термін служби, років	10
Максимальний пробіг за рахунок енергії накопичувача, км.	до 5

Розрахунки показують, що для того, щоб підзарядити блок суперконденсаторів електробуса, необхідно буде встановити п'ять зарядних пристроїв на обраному маршруті («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 147, м. Харків).

Таблиця 2 Накопичувач на основі ЕК для електричного приводу міського автобуса «Богдан А091»

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

Таблиця 3 Характеристики міського автобуса «Богдан А091» з електроприводом

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

Розрахований час зарядження суперконденсаторів буде складати від декількох секунд (20–30 с) до декількох хвилин (до 5 хв). Цей час визначається потужністю зарядного пристрою.

Висновки

Проведено аналіз наявних енергоефективних та екологічних міських автобусів, а саме гібридних автобусів та електробусів.

Проведено розрахунок електробуса на суперконденсаторах для маршруту м. Харкова («Пролетарська» – «Проспект Гагаріна», маршрут № 147). Довжина шляху в один бік дорівнює 20,4 км, час руху – 55 хв, кількість зупинок – 36. Запропоновано як основний накопичувач електроенергії замість Li-Ion-акумуляторів (термін служби – 3 роки) поставити блок суперконденсаторів (термін служби – 15 років). Номінальна потужність тягового електродвигуна – 60 кВт, максимальна потужність – 120 кВт (або два по 60 кВт). Як накопичувач електричної енергії пропонується використовувати модуль 14×30ЭК404 потужністю 90 кВт. Максимальний пробіг автобуса при повному зарядженні модуля накопичення енергії становить 5 км.

Розраховано необхідну енергію для циклу прискорення до швидкості 55 км/год та гальмування для міського електробуса «Богдан А091» вагою 8 т. На такий цикл електробус витрачає 1,44 МДж; при цьому за рахунок рекуперації буде зекономлено 0,6 МДж. Отже, на один цикл прискорення – гальмування електробус витрачає 0,83 МДж.

Розраховано витрати на паливо (електроенергію) на один день роботи, які становлять:
– для дизельного автобуса – 1126 грн;
– гібридного автобуса – 732 грн;
– електробуса – 165 грн.

Література

1. Бажинов О.В. Гібридні автомобілі: монографія / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков та ін. – Х.: Крок, 2008. – 328 с.
2. Бажинов О.В. Синергетичний автомобіль. Теорія і практика: монографія / О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, С.А. Серіков, В.Я. Дваденко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 236 с.
3. Автобус // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Автобус>.
4. Гібридні автобуси Volvo // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: http://volvo.infocar.com.ua/news_44205.html.
5. Електробус BYD K9 // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://internetua.tv/index.php/press-releases/3120-byd-5.html>.
6. Електроавтобус з швидкою зарядкою // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <http://autonews.autoua.net/novosti/11004-kitajcy-sozdali-elektroavtobus-so-sverhbystroj-zar.html>.
7. Запуск автоматичної системи швидкої зарядки // Матеріали сайту – 2015. – Режим доступу: <https://ecotown.com.ua/news/V-Lyukseburzi-vstanovyly-robotadlya-shvydkoyi-zaryadky-elektroavtobusiv/>.
8. Чолпан П.П. Фізика: підручник / П.П. Чолпан. – К.: Вища школа, 2003. – 568 с.

Рецензент: О.В. Бажинов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 10 березня 2016 р.