

## ТЯГОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОБУСА

**Гнатів А. В.**, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, e-mail: kalifus76@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0932-8849;

**Аргун Ш. В.**, к.т.н., доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, ORCID: 0000-0001-6098-8661;

**Гнатова Г. А.**, студентка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

*Останнім часом все більше застосовуються енергоефективні та енергозберігаючі технології на транспорті. Стимулюється перехід транспорту на екологічно чисті технології, найбільше поширення з яких набули електротехнології. Одним з основних елементів електротранспорту є тягова силова установка. Проведено дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення. Представлені графічні залежності тягового зусилля і швидкості електромобіля з трисупеневою, двоступінчастою і одноступінчастою коробкою передач. Визначено, що досліджувані конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості, це вказує на те, що електричні транспортні засоби будуть мати однакові показники прискорення і однакову здатність долати підйоми. Представлено аналітичні співвідношення, що дозволяють визначити максимальний підйом, який електричний транспортний засіб може подолати на визначеній швидкості. Ефективність прискорення електричного транспортного засобу оцінюється часом, який потрібен для його прискорення від початкової до кінцевої швидкості. Для легкових автомобілів на відміну від електробусів, ефективність прискорення є більш важливою, ніж максимальна крейсерська швидкість і здатність долати підйоми.*

**Ключові слова:** електромобіль, електросилова установка, електродвигун, тяговий електродвигун, електробус, енергоефективні технології.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.036-043**

**Вступ.** Останнім часом все більш популярними і затребуваними стають енергоефективні електричні технології. Особливо велика увага цьому приділяється в сфері транспорту. Для великих міст та мегаполісів проблема забруднення навколишнього середовища є досить гострою. Отже, стимулюється перехід транспорту на екологічно чисті технології, найбільше поширення з яких набули електротехнології, до яких можна віднести перехід на електромобілі та транспортні засоби (ТЗ) на паливних елементах [1, 2].

Також, не слід залишати поза увагою такий чинник, як енергетична ефективність. Цей чинник показує наскільки ефективно використовуються енергоресурси. Сучасні двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) безнадійно далекі від забезпечення енергоефективності, адже лише тільки їх ККД складає близько 30 % і це в найкращому випадку. Найбільш яскраво це проявляється при експлуатації ТЗ у міських умовах, де безперервно змінюються цикли прискорення та гальмування. При цьому, навіть у найбільш сучасних транспортних засобах ДВЗ постійно працює навіть при доволі повільному і довгому процесі гальмування. Все це є причиною втрати енергії, а якщо точніше, витрачання її вдаремно без виконання корисної роботи [3, 4].

**Аналіз публікацій.** Одним з найбільш важливих елементів тягового електроприводу силової установки ТЗ є електричний двигун (ЕД). Вибір ЕД для електросилової установки та дослідження його тягових характеристик, є важливим складовим елементом при проектуванні електричного ТЗ.

На цей час в якості тягового ЕД в електросилових установках на транспорті знаходять своє застосування [5]:

- колекторні двигуни постійного струму;
- асинхронні двигуни (АД);
- синхронні двигуни (СД);

- вентильні двигуни (ВД) з постійними магнітами;
- реактивно-вентильні електродвигуни з самозбудженням і з незалежним збудженням.

У більшості науково-технічних робіт рекомендується в якості основного тягового електродвигуна використовувати АД [1, 6–11]. Це пов'язано з тим, що сучасні системи управління дозволяють АД не поступатися за регулюючими якостями, як двигунам постійного струму, так і іншим типам електродвигунів. Також АД мають досить непогані масо-габаритні показники при найменшій ціні (якщо порівнювати за потужністю). Але слід зазначити, що такі машини мають гірші масогабаритні показники, ніж СД з постійними магнітами реактивні ВД.

При виборі ЕД для силової установки ТЗ необхідно уявити, які тягові характеристики будуть отримані при використанні конкретного двигуна. Цьому питанню приділяється увага в роботах [1, 7–10, 12]. Отже, питання дослідження тягових характеристик силової установки електробуса є досить актуальним і потребує більш детального розгляду.

**Метою роботи** є дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення.

**Електробус міського призначення.** Загальна схема конструкції електробуса представлена на рис. 1. Основні технічні та енергетичні параметри даного електробуса були розраховані у авторських публікаціях [1, 11–13]. Даний електробус призначений для міських умов експлуатації, має клас «малої» місткості.

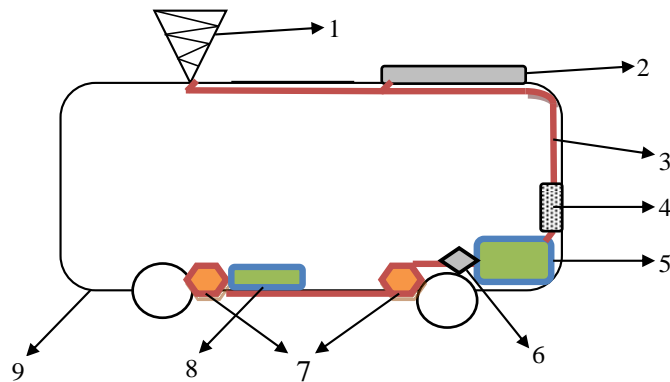


Рисунок 1 – Схема конструкції електробуса:

1 – пантограф для під'єднання до тролейбусної контактної мережі; 2 – зарядний блок від потужних зарядних пристроїв; 3 – струмопроводи; 4 – блок управління; 5 – блок ультраконденсаторів; 6 – інвертор; 7 – тяговий електричний двигун; 8 – блок акумуляторних батарей; 9 – корпус автобуса

Перед тим, як провести дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення слід зазначити основні критерії, якими керуються при виборі ЕД.

При виборі ЕД необхідно керуватися декількома основними критеріями [5]:

- вид електричного струму, що живить обладнання;
- потужність електродвигуна;
- режим роботи;
- кліматичні умови та інші зовнішні чинники.

Спираючись на перелічені критерії і маючи технічне завдання досить просто вибрати необхідний тип та клас електродвигуна для тягової силової установки електробуса.

**Основні характеристики тягових двигунів.** ЕД зі змінною швидкістю обертання зазвичай мають характеристики, представлені на рис. 2 [14].

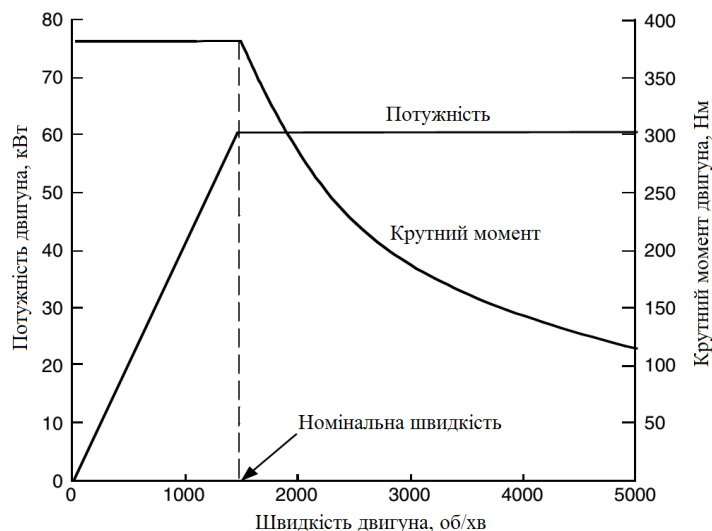


Рисунок 2 – Типові характеристики електродвигуна зі змінною швидкістю

В області низьких швидкостей (нижче базової швидкості, як показано на рис. 3), двигун має постійний крутний момент. У високошвидкісній області (вище базової швидкості) двигун має постійну потужність. Ця характеристика зазвичай представлена відношенням швидкості  $x$ , яка визначається як відношення максимальної швидкості двигуна до його базової швидкості. У низькошвидкісних режимах подача напруги на двигун збільшується зі збільшенням швидкості через електронний перетворювач, в той час як магнітний потік підтримується постійним. У точці базової швидкості напруга ЕД досягає напруги джерела. Після базової швидкості напруга ЕД підтримується постійною, а потік слабшає, гіперболічно знижуючись зі збільшенням швидкості. Отже, його крутний момент також падає гіперболічно зі збільшенням швидкості [15].

На рис. 3 представлено графічну залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт з різними швидкісними коефіцієнтами  $x$  ( $x=2, 4$  і  $6$ ).

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

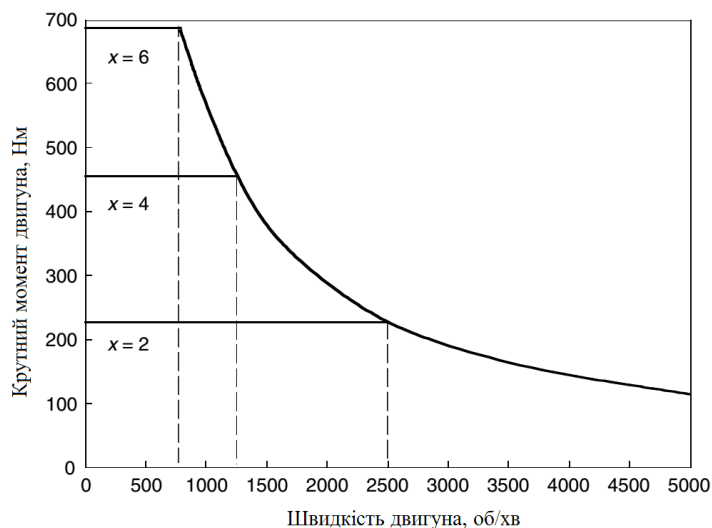


Рисунок 3 – Графічна залежність крутного моменту від швидкості двигуна потужністю 60 кВт зі швидкісними коефіцієнтами  $x=2, 4$  і  $6$

Тягові сили і вимоги до передачі. Тягове зусилля  $F_T$ , що розвивається тяговим двигуном на ведучих колесах, і швидкість транспортного засобу  $V$  виражаються у вигляді [15]:

$$F_T = \frac{T_d \cdot i_{\pi} \cdot i_0 \cdot \eta_T}{r_b} \quad (1)$$

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

де  $T_d$ ,  $N_d$  – вихідний момент двигуна і швидкість в об/хв, відповідно;  $i_{\pi}$  – передавальне відношення передачі;  $i_0$  – передавальне число кінцевого приводу;  $\eta_T$  – ефективність всієї трансмісії від двигуна до ведучих коліс;  $r_b$  – радіус ведучих коліс.

Використання багатоступінчастої або одноступінчастої коробки передач залежить в основному від швидкості ЕД (характеристик крутного моменту). Тобто при номінальній потужності ЕД, якщо він має велику область постійної потужності, буде достатньо одноступінчастої коробки передач для високого тягового зусилля на низьких швидкостях. В іншому випадку потрібна трансмісія з декількома передачами (більше двох). На рис. 4 показано тягове зусилля електромобіля, а також швидкість ТЗ з тяговим ЕД  $x=2$  і триступінчастою коробкою передач. Перша передача охоплює область швидкості a-b-c, друга передача d-e-f, а третя g-f-h [15].

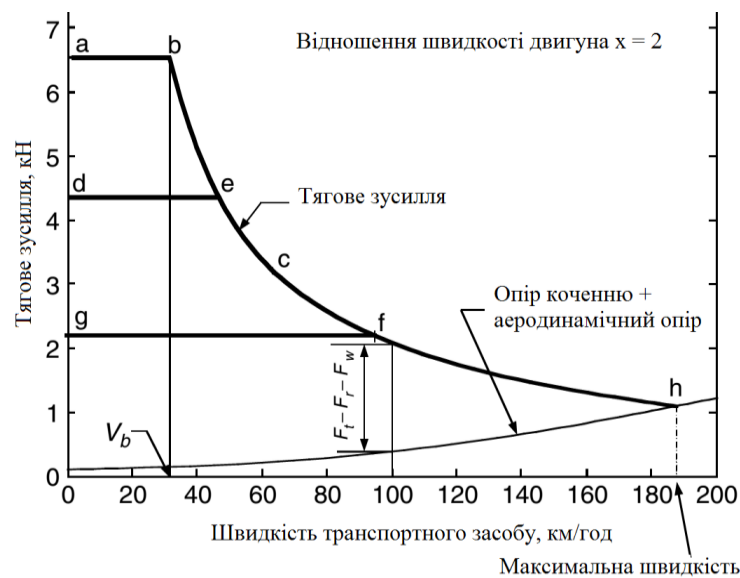


Рисунок 4 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном  $x=2$  і триступінчастою коробкою передач

На рис. 5 показано тягове зусилля з тяговим двигуном  $x=4$  і двоступінчастою коробкою передач. Перша передача покриває область швидкості a-b-c, а друга передача – d-e-f [15].

На рис. 6 показано тягове зусилля з тяговим двигуном  $x=6$  і одноступінчастою коробкою передач.

Ці три конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості ТЗ. Отже, електричні ТЗ будуть мати однакові показники прискорення і здатність долати підйоми.

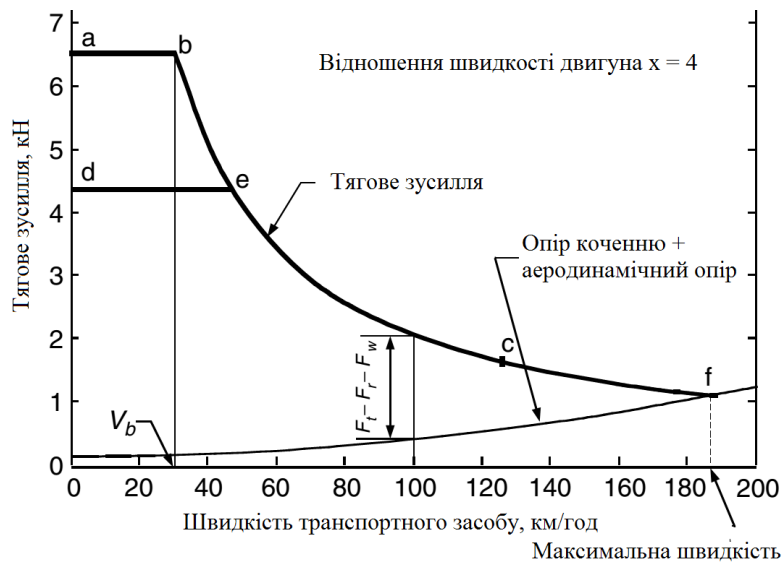


Рисунок 5 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном  $x=4$  і двоступінчастою коробкою передач

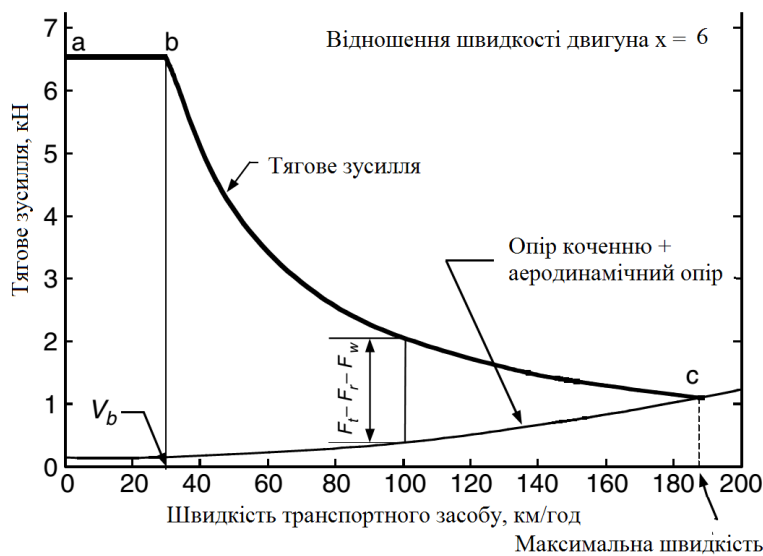


Рисунок 6 – Тягове зусилля і швидкість електромобіля з тяговим двигуном  $x=6$  і одноступінчастою коробкою передач

**Ефективності додання підйому.** Основні характеристики електробуса включають максимальну крейсерську швидкість, здатність долати підйоми і прискорення. Максимальна швидкість ТЗ може бути знайдена, як точка перетину кривої тягового зусилля з кривою опору (опір коченню плюс аеродинамічний опір) на діаграмі тягового зусилля в залежності від швидкості ТЗ, рис. 1–4 [15]. Слід зазначити, що в деяких конструкціях такої точки перетину не існує. Це стосується конструкцій в яких зазвичай використовується великий тяговий двигун або велике передавальне число. У цьому випадку максимальна швидкість електромобіля визначається максимальною швидкістю тягового ЕД [15]:

$$V_{\max} = \frac{\pi \cdot N_{\text{д max}} \cdot r_{\text{в}}}{30 i_{\text{п min}} \cdot i_0}, \quad (3)$$

де  $V_{\max}$  – максимальною швидкістю тягового ЕД, м/с;  $N_{\text{д max}}$  – максимально допустима швидкість тягового ЕД, об/хв;  $i_{\text{п min}}$  – мінімальне передавальне відношення трансмісії (найвища передача).

Похибка визначається чистим тяговим зусиллям ТЗ,  $F_{\text{T-net}}$  ( $F_{\text{T-net}} = F_{\text{T}} - F_{\text{r}} - F_{\omega}$ ), як показано на рис. 2–5. На середніх і високих швидкостях здатність долати підйом менша,

ніж на низьких швидкостях. Максимальний підйом, який ТЗ може подолати на даній швидкості, може бути розрахований за допомогою виразу (4) [15]:

$$i = \frac{F_{T-net}}{M_{T.3}g} = \frac{F_T - (F_r + F_w)}{M_{T.3}g}, \quad (4)$$

де  $F_T$  – тягове зусилля на ведучих колесах;  $F_r$  – опір коченню шини;  $F_w$  – аеродинамічний опір;  $M_{T.3}$  – загальна маса ТЗ.

Однак на низьких швидкостях здатність долати підйоми набагато вища. Розрахунки, засновані на (4), приведуть до значних відхилень отриманого результату від дійсного стану справ. Замість цього слід використовувати рівняння (5):

$$\sin \alpha = \frac{d - f_r \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2}, \quad (5)$$

де  $d$  – коефіцієнт продуктивності транспортного засобу ( $d = (F_T - F_w)/M_{T.3}g$ );  $f_r$  – коефіцієнт опору коченню електробуса.

Ефективність прискорення ТЗ оцінюється часом, який потрібен для його прискорення від початкової до кінцевої швидкості. Для легкових автомобілів на відміну від електробусів, ефективність прискорення є більш важливою, ніж максимальна крейсерська швидкість і здатність долати підйоми, тому що вимога у прискоренні визначає потужність приводу ЕД.

### Висновки

1. Проведено дослідження основних тягових характеристик силової установки електробуса міського призначення.
2. Представлені графічні залежності тягового зусилля і швидкості електромобіля з триступінчастою, двоступінчастою і одноступінчастою коробкою передач.
3. Визначено, що досліджувані конструкції мають однакове тягове зусилля в залежності від швидкості, це вказує на те, що електричні транспортні засоби будуть мати однакові показники прискорення і однакову здатність долати підйоми.
4. Представлено аналітичні співвідношення, що дозволяють визначити максимальний підйом, який електричний транспортний засіб може подолати на визначеній швидкості.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hnatov A., Arhun Shch., Ponikarovska S., Ulyanets O. Ultracapacitors electrobus for urban transport. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*. April 24–26, 2018. Kyiv, Ukraine. P. 539–543. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477449.
2. Gnatov A., Arhun Shch., Ulyanets O. Joint Innovative Double Degree Master Program «Energy-Saving Technologies in Transport». *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. May 29–June 2 2017. Kyiv, Ukraine. P. 1203–1207.
3. Vehicle Emission Standards. 2016. URL : <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission> – 03.07.2016.
4. G. Wang. Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources*, 2011, №1 (196). pp. 530–540.
5. Аргун, Ш. В. Розрахунок основних характеристик тягового асинхронного двигуна для електричної трансмісії міського електробуса. *Автомобільний транспорт*, 43, 36–46. doi: 10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36.
6. Dost P., Schael M. Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2014. pp. 1–6.
7. Chuanwei Zhang, Nuoting Wang. Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 2017. pp. 165–1693.
8. Ene Lucian-Vasile, Sănătescu Diana-Ramona. Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017*

*10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. 2017. pp. 597–600.

9. Rogério Paulo de F. Martins, Duarte M. Sousa, V. Fernão Pires, António Roque. Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2013. pp. 1247–1252.

10. Huang, Wanyou, Wang, Guangcan, Yu, Mingjin. Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International Journal Of Electric And Hybrid Vehicles*. 2017, Vol. 9, Issue: 4. pp. 350–360.

11. Hnatov A., Shch. Arhun I., S. Ponikarovska. Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017. № 14 (4). pp. 4649–4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.

12. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Бикова О.В., Підгора О.В. Електробус на суперконденсаторах для міських перевезень. *Вісник ХНАДУ*. 2016. № 72. С. 29–34.

13. Аргун Щ. В., Гнатов А. В., Ульянец О.А. Екологічний та енергоефективний атомобільний транспорт і його інфраструктура. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2016. № 2 (77). С. 18–27.

14. Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Трунова І. С. *Теорія електроприводу транспортних засобів : підручник*. Харків : ХНАДУ, 2016. 292 с.

15. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., Ebrahimi, K. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. CRC press, 2018.

## REFERENCES

1. Hnatov, A., Arhun, Shch., Ponikarovska, S. & Ulyanets, O. (2018). Ultracapacitors electrobus for urban transport. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2018)*. April 24 – 26. Kyiv, 539–543. doi: 10.1109/ELNANO.2018.8477449.

2. Gnatov, A., Arhun, Shch. & Ulyanets, O. (2017). Joint Innovative Double Degree Master Program «Energy-Saving Technologies in Transport». *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. May 29–June 2 2017. Kyiv, 1203–1207.

3. Vehicle Emission Standards. 2016. Retrived from <https://infrastructure.gov.au/roads/environment/emission> – 03.07.2016.

4. Wang G. (2011). Advanced vehicles: costs, energy use, and macroeconomic impacts. *Journal of Power Sources, Vol. 1 (196)*, 530–540.

5. Arhun, Shch. (2018). Rozrakhunok osnovny`x xaraktery`sty`k tyagovogo asy`nxronnogo dvy`guna dlya elektry`chnoyi transmisiyi mis`kogo elektrobusa. *Avtomobil`ny`j transport*, 43, 36–46. doi: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.36>.

6. Dost, P. & Schael M. (2014). Constantinos Sourkounis. Comparison of Control Methods for Asynchronous Motors within Electric Vehicles. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–6.

7. Chuanwei, Zhang & Nuoting Wang (2017). Research on asynchronous motor control of electric vehicle. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC)*, 165–169.

8. Ene, Lucian-Vasile & Sănătescu, Diana-Ramona. (2017). Electric drive system for speed adjusting of a three-phase asynchronous motor using a PLC for propelling an electric vehicle. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 597–600.

9. Rogério Paulo de F. Martins, Duarte M. Sousa, V. Fernão Pires, António Roque.(2013). Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control. *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 1247–1252.

10. Huang, Wanyou, Wang, Guangcan & Yu, Mingjin. (2017). Analysis of the effect of driving motor on electric vehicle dynamic performance. *International Journal Of Electric And Hybrid Vehicles, Vol. 9, Issue 4*, 350–360.

11. Hnatov, A., Arhun, Shch. & Ponikarovska S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14 (4), 4649-4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.
12. Hnatov, A., Arhun, Shch., Bykova, O. & Pidgora, O. (2016). Elektrobus na superkondensatorax dlya mis`ky`x perevezen`. *Visnyk KhNADU*, 72, 29–34.
13. Arhun, Shch., Hnatov, A. & Ulyanets, O. (2016). Ekologichny`j ta energoefekty`vny`j atomobil`ny`j transporti jogo infrastruktura. *Visnyk Zhy`tomy`rs`kogo derzhavnogo texnologichnogo universy`tetu*, 2 (77), 18–27.
14. Hnatov, A., Arhun, Shch. & Trunova I. (2016). *Teoriia elektropyvodu transportnykh zasobiv : pidruchnyk*. Kharkiv : XNADU.
15. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S. & Ebrahimi, K. (2018). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press.

**Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова А. В. ТЯГОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОБУСА**

*В последнее время все больше применяются энергоэффективные и энергосберегающие технологии на транспорте. Стимулируется переход транспорта на экологически чистые технологии, наибольшее распространение из которых получили электротехнологии. Одним из основных элементов электротранспорта является тяговая силовая установка. Проведено исследование основных тяговых характеристик силовой установки электробуса городского назначения. Представлены графические зависимости тягового усилия и скорости электромобиля с трехступенчатой, двухступенчатой и одноступенчатой коробкой передач. Определено, что исследуемые конструкции имеют одинаковое тяговое усилие в зависимости от скорости, это указывает на то, что электрические транспортные средства будут иметь одинаковые показатели ускорения и одинаковую способность преодолевать подъемы. Представлены аналитические соотношения, позволяющие определить максимальный подъем, который электрическое транспортное средство может преодолеть на определенной скорости. Эффективность ускорения электрического транспортного средства оценивается временем, которое требуется для его ускорения от начальной до конечной скорости. Для легковых автомобилей в отличие от электробусов, эффективность ускорения является более важной, чем максимальная крейсерская скорость и способность преодолевать подъемы.*

**Ключевые слова:** *электромотоцикл, электросиловая установка, электродвигатель, тяговый электродвигатель, электробус, энергоэффективные технологии.*

**Hnatov A., Arhun S., Hnatova H. TRACTION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC BUS POWER PLANT**

*Energy-efficient and energy-saving technologies have been recently increasingly used in transport industry. The shift to environmentally friendly technologies in transport industry is being promoted, and electric technologies became the most widespread among them. One of the main elements of electric transport is a propulsion power plant. The research on main traction characteristics of power plant of urban assignment electric bus was undertaken. Graphic correlations of propulsive force and speed of electric vehicles with a three-speed, two-speed, and single-speed gearboxes are presented. It is defined that the designs, being investigated, have the same propulsive force in relation to speed, which indicates that electric vehicles will have the same acceleration rates and climbing capacities. The analytical correlations are presented, which enable to determine the maximum driving gradient the electric vehicle is capable of at a certain speed. The acceleration efficiency of an electric vehicle is estimated by the time required to accelerate it from initial to final speed. Unlike electric buses, for light motor vehicles, the acceleration efficiency is more important than the maximum cruising speed and the climbing capability. The study of the main traction characteristics of the power plant of the city bus. The graphical dependences of traction force and speed of electric vehicle with three-stage, two-stage and one-stage gearbox are presented. It is determined that the investigated structures have the same traction force depending on the speed, this indicates that electric vehicles will have the same acceleration and the same ability to overcome the lift. Analytical ratios are presented to determine the maximum lift that an electric vehicle can overcome at a certain speed.*

**Keywords:** *electric car, electric power plant, electric motor, traction electric motor, electric bus, energy-efficient technologies.*

© Гнатов А. В., Аргун Щ. В., Гнатова Г. В.

Статтю прийнято  
до редакції 21.07.19