

М. Я. ОСТРОВЕРХОВ, Г. В. ВЕЩИКОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОЇ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

В роботі розглянуто актуальне питання автономного руху електротранспорту в умовах недостатнього живлення електроенергії мережею або при її аварійному відключенні. Метою роботи є дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту на основі використання батарей суперконденсаторів для живлення потужного тягового електроприводу. Дослідження здійснено шляхом моделювання на прикладі електропривода вагону метро. В роботі представлена математична модель суперконденсатора та асинхронного електродвигуна. Тяговий електропривод має типову систему векторного керування моментом двигуна. Для узгодження рівня напруги батареї суперконденсаторів та електродвигуна використовується DC-DC перетворювач. Отримано графіки швидкості, моменту, складових напруги та механічної енергії двигуна, а також енергії суперконденсатора та ККД всієї системи при розгоні електропривода. Результати моделювання показали ефективність роботи автономного електропривода вагону метро при живленні тільки від батареї суперконденсаторів.

Ключові слова: енергоефективність, автономне джерело, електротранспорт, тяговий електропривод, суперконденсатор.

M. OSTROVERKHOV, G. VESHCHYKOV

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC TRANSPORT AUTONOMOUS OPERATION

The work examines the topical issue of autonomous movement of electric vehicles in conditions of insufficient electricity generation or during its emergency shutdown. The article deals with the energy efficiency of autonomous operation of electric vehicles based on the use of a battery of supercapacitors to power a powerful traction electric drive. The study was carried out by modeling using the example of an electric drive of a subway car. The paper presents a mathematical model of a supercapacitor and an asynchronous motor. The traction electric drive has a typical vector torque control system. A DC-DC converter is used to match the voltage level of the supercapacitor battery and the electric motor. Graphs of speed, torque, current components and mechanical energy of the motor, as well as the energy of the supercapacitor and the efficiency of the entire system during acceleration of the electric drive were obtained. The simulation results showed the efficiency of the autonomous electric drive of the metro when powered only by a battery of supercapacitors.

Key words: energy efficiency, autonomous source, electric transport, traction drive, supercapacitor.

Вступ

На сьогодні міський електротранспорт набуває широкого розповсюдження, бо є більш екологічним та має вищий ККД, ніж транспорт із двигунами внутрішнього згорання. Актуальним є питання розвантаження електромережі в умовах недостатнього генерування електроенергії, а також автономного руху електротранспорту при аварійному її відключенні. Одним із можливих способів вирішення проблеми є використання батарей суперконденсаторів (СК) [1], [2] як джерела автономного живлення тягового електроприводу транспортного засобу.

Дослідження показали [3], що використання комбінованого джерела живлення у вигляді паралельного з'єднання акумуляторної батареї (АКБ) та батареї СК призводить до покращення енергетичних характеристик електроприводу та подовження терміну служби АКБ завдяки зменшенню ударних струмів. Така система дозволяє збільшити питому відстань, що зможе подолати транспортний засіб на одному заряді в умовах міського руху. Проте в роботі була розглянута малопотужна система автономного живлення потужністю 1,6 кВт на прикладі електроскутера.

У роботах [4], [5] батареї СК використовуються як додаткове джерело живлення при дослідженні енергоефективності рейкового електротранспорту, що живиться від контактної електроме-

режі. В таких системах батареї СК слугують для згладження коливань напруги, розвантаження мережі та накопичення енергії під час рекуперативного гальмування електротранспорту. Розрахунки показали про ефективність такої системи живлення та можливість підвищення енергоефективності до 30 %.

Таким чином, питання підвищення енергоефективності перетворення енергії в електричних колах потужного рухомого складу та дослідження способів забезпечення автономності його ходу є важливим та актуальним.

Мета роботи

Метою роботи є дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту на основі використання батарей СК для живлення потужного тягового електроприводу.

Виклад основного матеріалу

Дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту здійснено на прикладі тягового електроприводу вагону метро масою 50 т.

За результатами аналізу існуючих математичних моделей суперконденсаторів в роботі використовується схема заміщення [6], яка описує електричні процеси відповідно до мети дослідження (рис. 1).

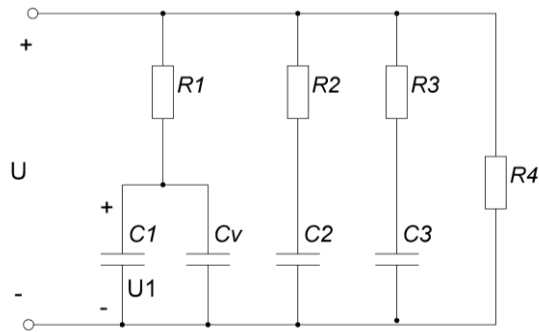


Рис. 1 – Схема заміщення суперконденсатора

Нелінійна модель СК містить три ємнісні вітки з різними сталими часу, що зростають зі збільшенням номеру індексу. Ємність $C_V(U)$ залежить від напруги

$$C_V = k_{CV}|U|, \quad (1)$$

де k_{CV} – коефіцієнт пропорційності.

Для більшості СК стала часу першої вітки становить кілька секунд, другої вітки має порядок хвилин, а третьої вітки перевищує 10 хвилин. Опір R_4 характеризує саморозряд суперконденсатора.

Таким чином, математичну модель СК можна представити у вигляді наступної системи диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} i_1 = (C_1 + k_{CV}|u_C - i_1 R_1|) \frac{d(u_C - i_1 R_1)}{dt}; \\ i_2 = C_2 \frac{d(u_C - i_2 R_2)}{dt}; \\ i_3 = C_3 \frac{d(u_C - i_3 R_3)}{dt}; \\ i_4 = \frac{u_C}{R_4}; \\ i_C = i_1 + i_2 + i_3 + i_4, \end{cases} \quad (2)$$

де i_C – повний струм суперконденсатора;
 i_i – струм i -ї вітки кола.

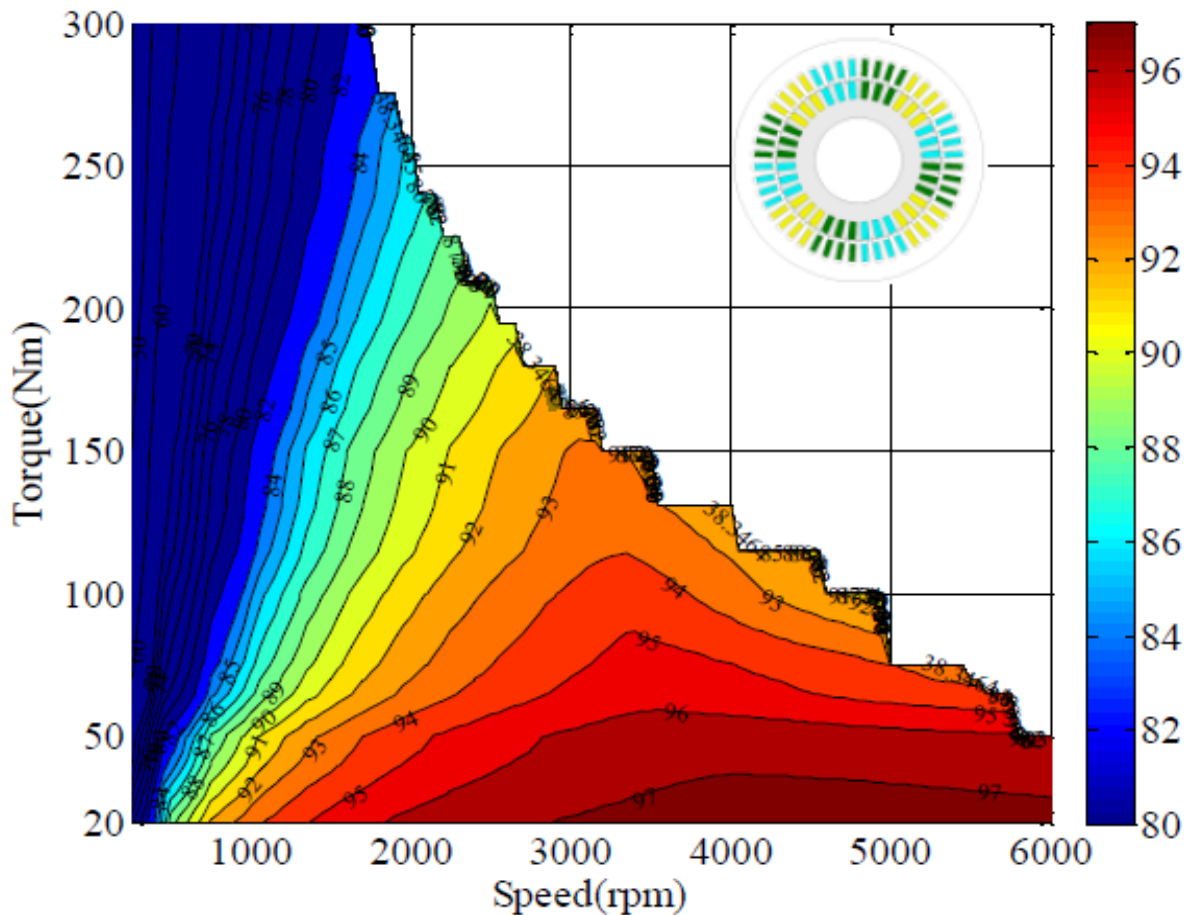


Рис. 2 – Залежності ККД асинхронного двигуна від частоти обертання та моменту на валу

Асинхронний двигун є найбільш розповсюдженою тяговою електричною машиною завдяки своїй простоті конструкції та відносній дешевизні. Незважаючи на складні алгоритми керування з розвитком напівпровідникової перетворювальної та мікропроцесорної техніки їх застосування в електричному транспорті з автономним живленням є актуальним. На рис. 2 зображена карта залежності ККД асинхронного двигуна від частоти обертання (*Speed*) та моменту на валу (*Torque*). Видно, що найбільш ефективно асинхронний двигун працює на високих швидкостях та при малих навантаженнях. В транспортних засобах навантаження росте зі зростанням швидкості, тому асинхронний двигун не буде працювати в оптимальному режимі, проте все рівно він має одні з найкращих енергетичних характеристик [7].

Запис рівнянь моделі асинхронного двигуна в системі природних координат є найбільш наочною. В ній змінні та параметри мають фізичний зміст і реальне значення та є можливість врахувати несиметрію як напруги живлення, так і параметрів електричних обмоток. Еквівалентна схема трифазного асинхронного двигуна зображена на рис. 3. Відома система диференціальних рівнянь за законом Ома для фаз статора та ротора має вигляд

$$\begin{cases} u_A = i_A R_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ u_B = i_B R_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ u_C = i_C R_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \end{cases} \quad \begin{cases} u_a = i_a R_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ u_b = i_b R_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ u_c = i_c R_c + \frac{d\psi_c}{dt}; \end{cases} \quad (3)$$

де u_A – миттєве значення напруги на затискачах фази A ;

i_A – миттєве значення струму фази A ;

$$\begin{cases} \psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a \cos \gamma + M_{Ab} i_b \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right) + M_{Ac} i_c \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right); \\ \psi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Ba} i_a \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right) + M_{Bb} i_b \cos \gamma + M_{Bc} i_c \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right); \\ \psi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Ca} i_a \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right) + M_{Cb} i_b \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right) + M_{Cc} i_c \cos \gamma; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_a = M_{aA} i_A \cos \gamma + M_{aB} i_B \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right) + M_{aC} i_C \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right) + L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c; \\ \psi_b = M_{bA} i_A \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right) + M_{bB} i_B \cos \gamma + M_{bC} i_C \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right) + M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c; \\ \psi_c = M_{cA} i_A \cos \left(\gamma - \frac{2p}{3} \right) + M_{cB} i_B \cos \left(\gamma + \frac{2p}{3} \right) + M_{cC} i_C \cos \gamma + M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c; \end{cases} \quad (5)$$

де γ – кут між осями обмоток A статора та a ротора;

L_A – індуктивність обмотки фази A ;

ψ_A – повне потокозчеплення фази A ;
 R_A – активний опір обмотки фази A .
 Позначення змінних та параметрів за фазами B та C є аналогічним.

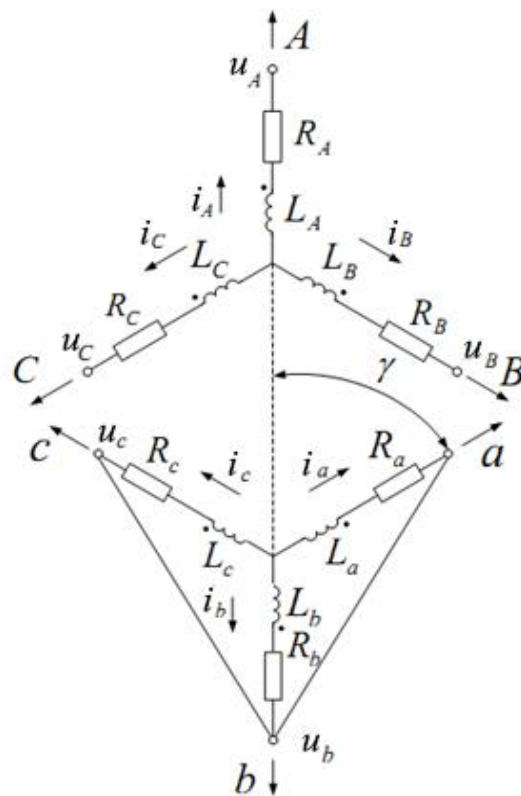


Рис. 3 – Еквівалентна схема трифазного асинхронного двигуна

Потокозчеплення статора та ротора двигуна виражаються наступним чином

M_{AA} – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора та ротора;
 M_{AB} – взаємна індуктивність між обмотками фаз A та B .

Система рівнянь (3) – (5) дозволяє проводити дослідження процесів в асинхронному двигуні, проте для синтезу алгоритмів керування вона є громіздкою з наявністю періодичних коефіцієнтів. Після перетворень Парка отримується відома математична модель асинхронного двигуна в синхронній системі координат d - q , що орієнтована по вектору потокозчеплення ротора

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1d}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1d} - \alpha \beta L_m i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta |\psi_2| + \frac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1q} - \alpha \beta L_m i_{1q} - \omega_0 i_{1d} - \beta \omega p_n |\psi_2| + \frac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} = -\alpha |\psi_2| + \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J} - \frac{M_c}{J}; \\ M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} |\psi_2| i_{1q}, \end{array} \right. \quad (6)$$

де $\alpha = \frac{R_2}{L_2}$, $\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$, $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}$ – параметри мо-

делі;

R_1, R_2 – активний електричний опір обмотки статора та ротора;

L_1, L_2, L_m – індуктивність обмотки статора, ротора та контуру намагнічування;

ω, ω_0 – кутова швидкість ротора та магнітного поля;

J – момент інерції двигуна;

M, M_c – момент двигуна та момент опору;

u_{1d}, u_{1q} – компоненти вектора напруги статора;

i_{1d}, i_{1q} – компоненти вектора струму статора;

$|\psi_2|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора;

p_n – число пар магнітних полюсів.

Для керування тяговим асинхронним двигуном на основі моделі (6) використовується типова система векторного керування моментом двигуна [8].

Обговорення результатів

Дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту здійснено шляхом моделювання. Рух вагону метро забезпечує асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з номінальною потужністю $P_n = 132$ кВт, номінальною напругою живлення $U_n = 380$ В, номінальним струмом $I_n = 239,6$ А та номінальною кутовою швидкістю $\omega_n = 153,46$ рад/с. Джерелом автономного живлення електроприводу служить батарея з восьми послідовно з'єднаних суперконденсаторів марки EATON XLR-51R3187-R з наступними основними характеристиками: ємність $C = 188$ Ф;

максимальна робоча напруга $U_{\max} = 51,3$ В; тривалий струм $I = 86,6$ А; запас енергії $E = 247,4$ кДж; маса $m = 14,7$ кг. Для живлення електропривода від батареї СК та узгодження рівнів напруг використовується підвищувальний DC - DC перетворювач.

На рис. 4 представлено у відносних одиницях кутова швидкість, момент двигуна та момент опору під час пуску за 16 с. Розгін здійснюється під дією незмінного моменту 800 Нм, а швидкість збільшується за лінійнозростаючою залежністю до 119 рад/с або в перерахунку на швидкість вагону 47 км/год.

На рис. 5 зображено у відносних одиницях графіки складових струму статора в системі координат d - q . Струм i_q згідно з моделлю (6) відповідає за створення моменту двигуна, тому практично точно його повторює.

На рис. 6 показано графік напруги в ланці постійного струму електропривода та батареї СК. За час розгону напруга СК U_c зменшується з 400 В до 285 В при стабілізації напруги U_{dc} в середньому на рівні 540 В.

На рис. 7 зображено графік споживання енергії батареї СК, яка зростає за час розгону до 920 кДж. Графік механічної енергії двигуна представлено на рис. 8, яка досягає значення 800 кДж в кінці розгону.

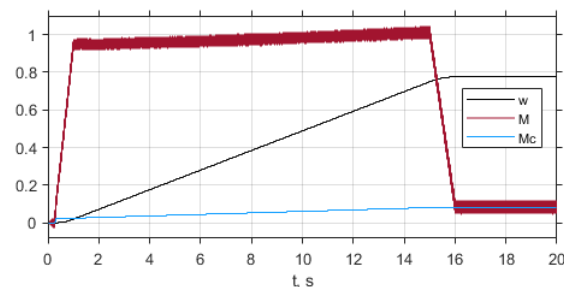


Рис. 4 – Графіки швидкості та моменту двигуна під час пуску

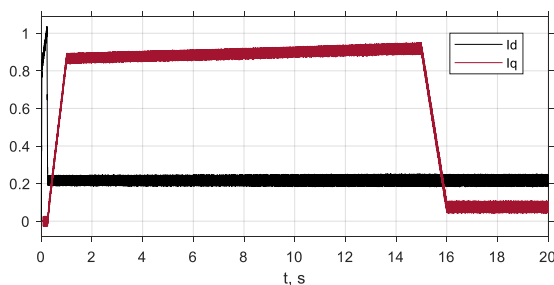
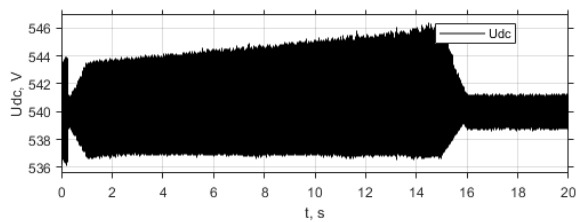
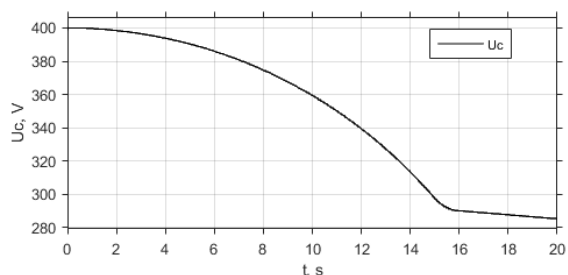


Рис. 5 – Струми статора за осями d та q



а



б

Рис. 6 – Графіки напруг:

а – в ланці постійного струму; б – на батареї СК

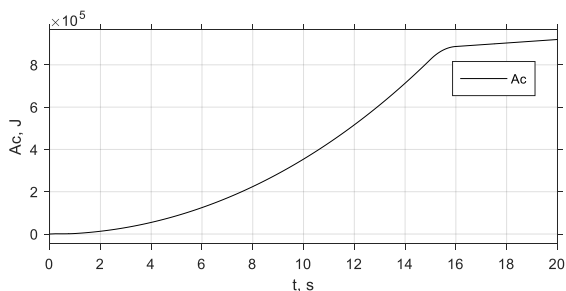


Рис. 7 – Графік енергії батареї СК

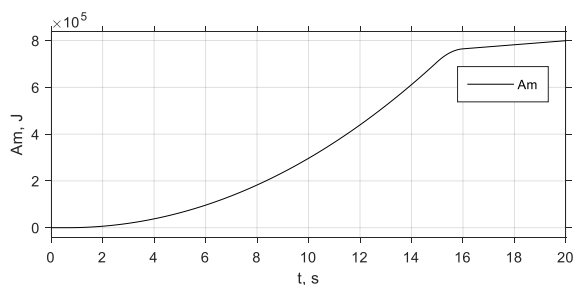


Рис. 8 – Графік механічної енергії двигуна

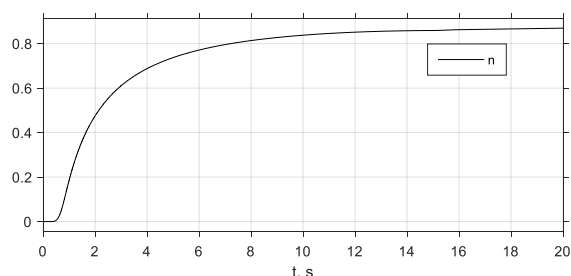


Рис. 9 – Графік ККД системи

За результатами дослідження отримано графік ККД, який характеризує ефективність перет-

ворення енергії (рис. 9). В кінці розгону ККД досягає максимального значення 87 %.

Таким чином, за результатами дослідження встановлено, що за час розгону вагону метро витрачається біля 50 % всієї енергії батареї СК.

Висновки

В роботі шляхом моделювання проведено дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту на основі використання батарей суперконденсаторів для живлення тягового електроприводу вагону метро в умовах аварійного відключення електроенергії мережі або її недостатнього генерування. Тяговий електропривод має типову систему векторного керування моментом асинхронного двигуна. Для узгодження рівня напруги батареї суперконденсаторів та електродвигуна використовується DC-DC перетворювач.

В процесі розгону до лінійної швидкості вагону метро 47 км/год за час 16 с витрачено 920 кДж енергії батареї суперконденсаторів, що склало 50 % її загальної ємності. Ефективність перетворення енергії характеризує загальний ККД системи, який в кінці періоду розгону становить 87 %.

Результати дослідження показали працездатність розглянутої системи, що обумовлює їх продовження з урахуванням руху вагону метро з усталеною швидкістю та сповільнення в режимі рекуперативного гальмування із поверненням енергії до батареї суперконденсаторів.

Список літератури

1. Сулим А. О. Аналіз питання застосування перспективних накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену / А. О. Сулим // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2017. – Вип. 169. – С. 72–81. – ISSN 1994-7852 (print). – ISSN 2413-3795 (on-line).
2. Сьомочкін А. Б. Застосування суперконденсаторів в гібридних системах / А. Б. Сьомочкін, В. В. Шевчук // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – Вип. 42. – С. 109–114. – ISSN 2523-4552 (print).
3. Ostroverkhov M. Increasing the Efficiency of Electric Vehicle Drives with Supercapacitors in Power Supply / M. Ostroverkhov, D. Trinchuk // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 12-14 May 2020, Kyiv, Ukraine. – 2020. – pp. 258–261. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160291>.
4. Yatsko, S. Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage / S. Yatsko, Y. Vashchenko, A. Sidorenko, B. Liubarskyi, B. Yeritsyan // International Journal of Renewable Energy Research-IJRER. – 2019. – Vol. 9, No. 2. – P. 848–858. – DOI: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i2.9143.g7652>. – ISSN 1309-0127 (on-line).
5. Steiner M. Energy storage on board of railway vehicles / M. Steiner, J. Scholten // 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 11–14 September 2005, Dresden, Germany. – 2005. – DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219410>.

6. Zubieta L. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications / L. Zubieta, R. Bonert // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2000. – Vol. 36, Is. 1. – P. 199–205. – DOI: <https://doi.org/10.1109/28.821816>.
7. Yang Z. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications / Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, M. Krishnamurthy // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. – 2015. – Vol. 1, Is. 3. – P. 245–254. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
8. Bozhko S. Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results / S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa, S. M. Peresada // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2017. – Vol. 53, Is. 1, Jan.-Feb. 2017. – P. 181–193. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2608789>.
- er Supply”, *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 12-14 May 2020, Kyiv, Ukraine*, pp. 258–261, <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160291>.
4. Yatsko, S., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Yerytsyan B. (2019), “Method to Improve the Efficiency of the Traction Rolling Stock with Onboard Energy Storage”, *International Journal of Renewable Energy Research-IJRER*, vol. 9, no. 2, pp. 848–858, <https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i2.9143.g7652>, ISSN 1309-0127 (on-line).
5. Steiner M., Scholten J. (2005), “Energy storage on board of railway vehicles”, *2005 European Conference on Power Electronics and Applications, 11–14 September 2005, Dresden, Germany*, <https://doi.org/10.1109/EPE.2005.219410>.
6. Zubieta L., Bonert R. (2000), “Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, is. 1, pp. 199–205, <https://doi.org/10.1109/28.821816>.
7. Yang Z., Shang F., Brown I. P., Krishnamurthy M. (2015), “Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, is. 3, pp. 245–254, <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
8. Bozhko S., Dymko S., Kovbasa S., Peresada S. M. (2016), “Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, is. 1, Jan.-Feb. 2017, pp. 181–193, <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2608789>.

References (transliterated)

1. Sulym A. (2017), “Analiz pytannja zastosuvannya perspektivnyh nakopychuvachiv energii na ruhomomu skladi metropolitenu [Analysis of Energy Storage Implementation on the Metro Rolling Stock]”, *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, no. 169, pp. 72–81, ISSN 1994-7852 (print), ISSN 2413-3795 (on-line).
2. S'omochkin A. B., Shevchuk V. V. (2016), “Zastosuvannya superkondensatoriv v gibrydnyh systemah [Application of supercapacitors in hybrid systems]”, *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu*, no. 42, pp. 109–114, ISSN 2523-4552 (print).
3. Ostroverkhov M., Trinchuk D. (2020), “Increasing the Efficiency of Electric Vehicle Drives with Supercapacitors in Pow-

Надійшла (received) 18.11.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Островерхов Микола Якович (Ostroverkhov Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри теоретичної електротехніки; м. Київ; тел.: (050) 254–10–67; e-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7322-8052>.

Вещиков Георгій Вячеславович (Veshchikov Heorhii) – аспірант кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (063) 960-13-37; e-mail: veshchikov98@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0606-9765>.