

М. О. ВЖЕСНЄВСЬКИЙ, І. Ш. НЕВЛЮДОВ**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ АВТОМАТИЗОВАНИМ ШАТЛОМ СКЛАДСЬКОЇ СИСТЕМИ**

У вигляді системи двох звичайних диференціальних рівнянь із початковими умовами запропоновано математичну модель, яка дозволяє досліджувати процеси споживання електричної енергії автоматизованим шатлом із двигунами постійного струму, який використовується як засіб автоматизації в сучасних складських системах для транспортування вантажів між стелажми. Запропонована математична модель дозволяє визначати кутову швидкість коліс шатла та струм в обмотуваннях роторів його рушійних електричних двигунів для заданої електричної напруги живлення. Процес споживання електричної енергії характеризується струмом в обмотуванні роторів рушійних електричних двигунів шатла та напругою їхнього живлення. На основі запропонованої математичної моделі виконано дослідження процесу споживання енергії при зрушенні автоматизованого шатла із нерухомого стану до досягнення їм усталеної швидкості миттєво поданою сталою електричною напругою живлення. На розглянутому прикладі показано, що запропонована модель дозволяє досліджувати як перехідні, так й усталені процеси споживання електричної енергії шатлом із двигунами постійного струму при транспортуванні вантажів між стелажми складської системи.

Ключові слова: автоматизація, споживання енергії, моделювання, мобільний робот, транспортувальний шатл, логістика.

M. VZHESNIEVSKYI, I. NEVLIUDOV**RESEARCH OF THE PROCESS OF ENERGY CONSUMPTION BY THE AUTOMATED SHUTTLE OF THE WAREHOUSE SYSTEM**

The purpose of this study is the mathematical modelling of electromechanical processes to estimate the electricity consumption of an automated shuttle warehouse system. In the form of a system of two ordinary differential equations with initial conditions, it is proposed the mathematical model allowing to study the processes of electric energy consumption by an automated shuttle with direct current motors, which is used as the automation tools in modern warehouse systems for transporting goods between racks. The proposed mathematical model allows us to determine the angular velocity of the shuttle wheels and the current in the rotor windings of its driving electric motors for a given supplied electric voltage. The process of electric energy consumption is characterized by the current in the rotor windings of the driving electric motors of the shuttle and their supplied voltage. By means the proposed mathematical model, the process of energy consumption is researched for the automated shuttle accelerated from the state of the rest to achieving of the steady speed under an instantaneously supplied constant electric voltage. The considered example shows that the proposed model allows us to study both transient and steady processes of electric energy consumption by a shuttle with direct current motors when transporting goods between racks of a warehouse system.

Key words: automation, energy consumption, modelling, mobile robot, transport shuttle, logistics.

Вступ

Споживання різних видів енергії розглядається сьогодні як важливий фактор щодо забезпечення сталого розвитку в умовах обмеженості наявних природних ресурсів та забруднення навколишнього середовища [1]. Отже, тема даного дослідження, в якому розглядаються питання щодо споживання електроенергії автоматизованим шатлом складської системи, є актуальною через зв'язок із проголошеними цілями сталого розвитку, які підтримуються різними країнами, та Україною у тому числі.

Аналіз останніх опублікованих наукових досліджень свідчить, що проблемі споживання електроенергії приділяється багато уваги. Наприклад, в роботі [2] розглядається споживання електроенергії електричними транспортними засобами із джерелом енергії у вигляді акумуляторів, що важливо не тільки для зменшення витрат електроенергії, але й для скорочення кількості циклів заряджання акумуляторів, що сприятиме збільшенню їхнього ресурсу та зменшенню за рахунок цього небезпечних для навколишнього середовища відходів. Особливої уваги приділяється щодо проблеми споживання енергії автономним електричним транспортом [3–5]. При цьому, дослідження щодо споживання електроенергії вимагає використання ускладнених математичних моделей, в яких враховуються електромеханічні процеси [6], [7]. Забезпечення енергозбереження може забезпечуватися різноманітними шляхами, наприклад за рахунок рекуперації [8].

Мета роботи

Впровадження автоматизованих шатлів [9], [10] із електроприводом щодо перевезення вантажів є однією із сучасних тенденцій розвитку складських систем різного призначення. В той же час, питання щодо споживання енергії в складських системах зазвичай розглядаються з точки зору належної логістики, як наприклад, в роботі [11] без належної уваги щодо удосконалення шатлів шляхом забезпечення належних електромеханічних процесів, як це досліджується для подібних систем, наприклад в роботі [7]. Отже, метою даного дослідження є математичне моделювання електромеханічних процесів щодо оцінки споживання електроенергії автоматизованим шатлом складської системи.

Математична модель електромеханічних процесів в автоматизованому шатлі складської системи

Типовий автоматизований шатл (рис. 1) представляє електромеханічну систему у вигляді шасі із встановленим вантажем, із двома рушійними мотор-колесами та двома опорними колесами; рух а забезпечується двигунами постійного струму мотор-колес. Автоматизовані шатли зазвичай рухаються уздовж напрямних, отже є голономними електромеханічними системами, у яких швидкість поступального руху шасі пропорційна кутовій швидкості коліс. З урахуванням цієї обставини для математичного моделювання автоматизованого шатла пропонується використовувати електромеханічні аналогії та рівняння Лагранжа 2-го роду. Зрозуміло, що різноманітні можливі конструкції автоматизованих шатлів неможливо врахувати в межах одного дослідження, отже розглянемо тут узагальнену математичну модель автоматизованого шатла як електромеханічної системи, яка є основою для подальших досліджень.

При використанні рівнянь Лагранжа 2-го роду слід обирати узагальнені координати досліджуваної системи. Для механічних систем маємо мінімальну кількість узагальнених координат, що дорівнює одиниці. У випадку електромеханічних систем маємо механічні (рис. 1) та електричні (рис. 2) складові, отже для дослідження таких систем слід використовувати як мінімум дві узагальнені координати, щоб визначати стан механічної та електричної складової. В якості узагальненої координати, що визначає стан механічної частини автоматизованого шатла, можна та доцільно використовувати кут повороту ротору рушійного електричного двигуна, та при цьому в якості узагальненої координати, що визначає стан електричної частини автоматизованого шатла, можна і доцільно використовувати електричний заряд ланцюга ротору рушійних електричних двигунів. Такий вибір узагальнених координат та використання рівнянь Лагранжа 2-го роду приведе в результаті до системи двох диференціальних рівнянь другого порядку, які слід розглядати із відповідними початковими умовами. Такий підхід в результаті приводить до узагальненої математичної моделі автоматизованого шатла як електромеханічної системи у такому вигляді (рис. 1 та рис. 2):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(\omega, I), \quad L \frac{dI}{dt} = -RI - B\omega + U, \quad (1)$$

$$\omega(t_0) = \omega_0, \quad I(t_0) = I_0, \quad (2)$$

де $t \geq t_0$ – час;

ω – кутова швидкість роторів рушійних електричних двигунів автоматизованого шатла;

I – струм в ланцюгах роторів рушійних електричних двигунів автоматизованого шатла;

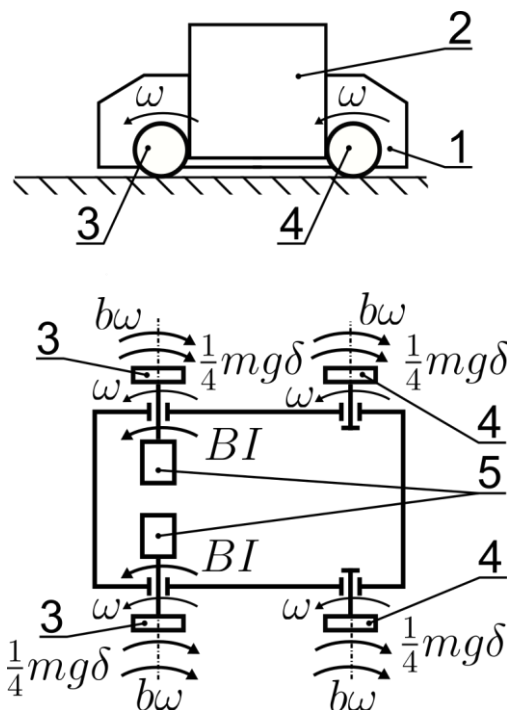


Рис. 1 – Типова конструкція автоматизованого шатла: 1 – шасі; 2 – вантаж; 3 – рушійні колеса; 4 – опорні колеса; 5 – рушійні електричні двигуни

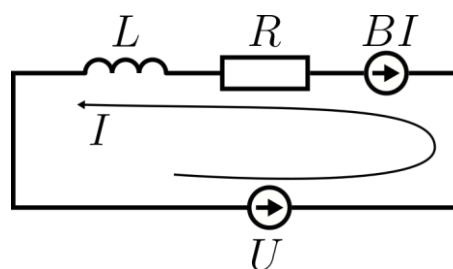


Рис. 2 – Еквівалентна електрична схема рушійного електричного двигуна постійного струму

J – узагальнений момент інерції автоматизованого шатла відносно осі обертання ротору електричного двигуна;

$M(\omega, I)$ – узагальнений обертальний момент автоматизованого шатла відносно осі обертання ротора рушійного електричного двигуна;

L, R, B – індуктивність, активний опір обмотування ротора, електромеханічна характеристика рушійного електричного двигуна;

U – напруга живлення рушійних електричних двигунів автоматизованого шатла;

t_0 – заданий початковий момент часу;

ω_0, I_0 – задані початкові значення кутової швидкості та струму в початковий момент часу.

Узагальнений момент інерції автоматизованого шатла відносно осі обертання ротора рушій-

ного електричного двигуна у першому диференціальному рівнянні (1) визначається наявним зв'язком між рухами механічних складових таким чином:

$$J = mr_w^2 + 4J_w + 2J_e, \quad (3)$$

де m , r_w та J_w – повна маса, радіус та момент інерції навколо осі обертання коліс автоматизованого шатла;

J_e – момент інерції ротора рушійного електричного двигуна автоматизованого шатла відносно осі обертання.

Узагальнений обертальний момент у першому диференціальному рівнянні (1), зрозуміло, залежить від конструктивних особливостей автоматизованого шатла, але найбільш загальною властивістю є нелінійність внаслідок тертя кочення, оскільки за відносно невеликих швидкостях руху сили в'язкого опору можна без помітної похибки вважати лінійно залежним від швидкості. Таким чином, узагальнений обертальний момент можемо представити у такому вигляді:

$$M(\omega, I) = \begin{cases} -b\omega + 2BI - mg\delta \operatorname{sign}(\omega), & \omega \neq 0, \\ \frac{|M_\delta(I)| + M_\delta(I)}{2} \operatorname{sign}(I), & \omega = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де δ – коефіцієнт тертя кочення коліс автоматизованого шатла;

$M_\delta(I) = 2B|I| - mg\delta$ – різниця між рушійним моментом електричного двигуна та моментом тертя кочення.

Математична модель (1) – (4) електромеханічних процесів в автоматизованому шатлі дозволяє визначати кутову швидкість ротору та струм в його обмотуванні, що відповідають заданій електричній напрузі живлення рушійних двигунів. Вигляд (4) узагальненого обертального моменту наочно свідчить про суттєву нелінійність електромеханічних процесів в автоматизованому шатлі внаслідок наявності тертя кочення. Зрозуміло, що така суттєва нелінійність диференціальних рівнянь математичної моделі (1) – (4) значною мірою обмежує можливості щодо суто аналітичних досліджень електромеханічних процесів в автоматизованому складському шатлі. За цих умов маємо застосовувати обчислювальні методи щодо розв'язування диференціальних рівнянь (1), (3), (4) з урахуванням початкових умов (2). Застосування таких обчислювальних методів не містить принципових труднощів, і саме це надає можливість досліджувати електромеханічні процеси в автоматизованому шатлі за допомогою запропонованої математичної моделі (1) – (4). При цьому, маємо можливість визначати струм в обмотуваннях роторів рушійних електричних двигунів, який разом із заданою напругою живлення надає можливість оцінювати споживання електричної енергії. Отже, запропонована математична модель (1) – (4) елект-

ромеханічних процесів в автоматизованому складському шатлі надає можливість досліджувати споживання шатлом електричної енергії протягом експлуатації.

Комп'ютерне моделювання процесу споживання електричної енергії в автоматизованому шатлі

Використання обчислювальних методів щодо інтегрування звичайних диференціальних рівнянь (1), (3), (4) з урахуванням початкових умов (2) є типовою математичною задачею, для розв'язування якої існує різноманітне спеціалізоване програмне забезпечення. Для дослідження процесу споживання електричної енергії автоматизованим складським шатлом будемо використовувати комп'ютерну систему *Scilab* [12], яка розповсюджується для вільного користування у тому числі з відкритим кодом і створена для виконання наукових та інженерних розрахунків й моделювання. Вибір саме комп'ютерної системи *Scilab* обумовлений тим, що в ній передбачено графічне середовище моделювання *Xcos*, яке надає великих можливостей щодо створення комп'ютерних моделей різних процесів. На рис. 3 показана створена засобами графічного середовища моделювання *Xcos* комп'ютерна модель електромеханічних процесів в автоматизованому складському шатлі, відповідно до диференціальних рівнянь (1), (3), (4) та початкових умов (2).

При виконанні комп'ютерного моделювання електромеханічних процесів в автоматизованому шатлі відповідно до математичної моделі (1) – (4), розглядаємо колеса як суцільні однорідні диски та використовуємо такі вихідні данні:

$$\begin{aligned} m &= 110 \text{ кг}, b = 1,5 \text{ кг/с}, J_e = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\ m_w &= 1,2 \text{ кг}, r_w = 62,5 \text{ мм}, \delta = 2 \text{ мм}, \\ R &= 2,0 \text{ Ом}, L = 25 \text{ мГн}, B = 0,55 \text{ Н}\cdot\text{м/А}, \end{aligned} \quad (5)$$

де m_w – маса колеса автоматизованого шатла.

Вихідні данні (5) відповідають характеристикам типового автоматизованого шатлу із тих, що сьогодні використовується як технічні засоби автоматизації в складських системах. Розглядатимемо випадок, коли напруга живлення є сталою:

$$U = 24 \text{ В}. \quad (6)$$

Стала електрична напруга живлення (6) дозволяє за результатами моделювання електричного струму мати можливість оцінити споживання електроенергії автоматизованим шатлом відповідно до основної мети дослідження. У випадку сталої напруги живлення доцільно вважати, що в початковий момент часу (2) маємо автоматизований шатл в нерухомому стані:

$$\omega_0 = 0, I_0 = 0. \quad (7)$$

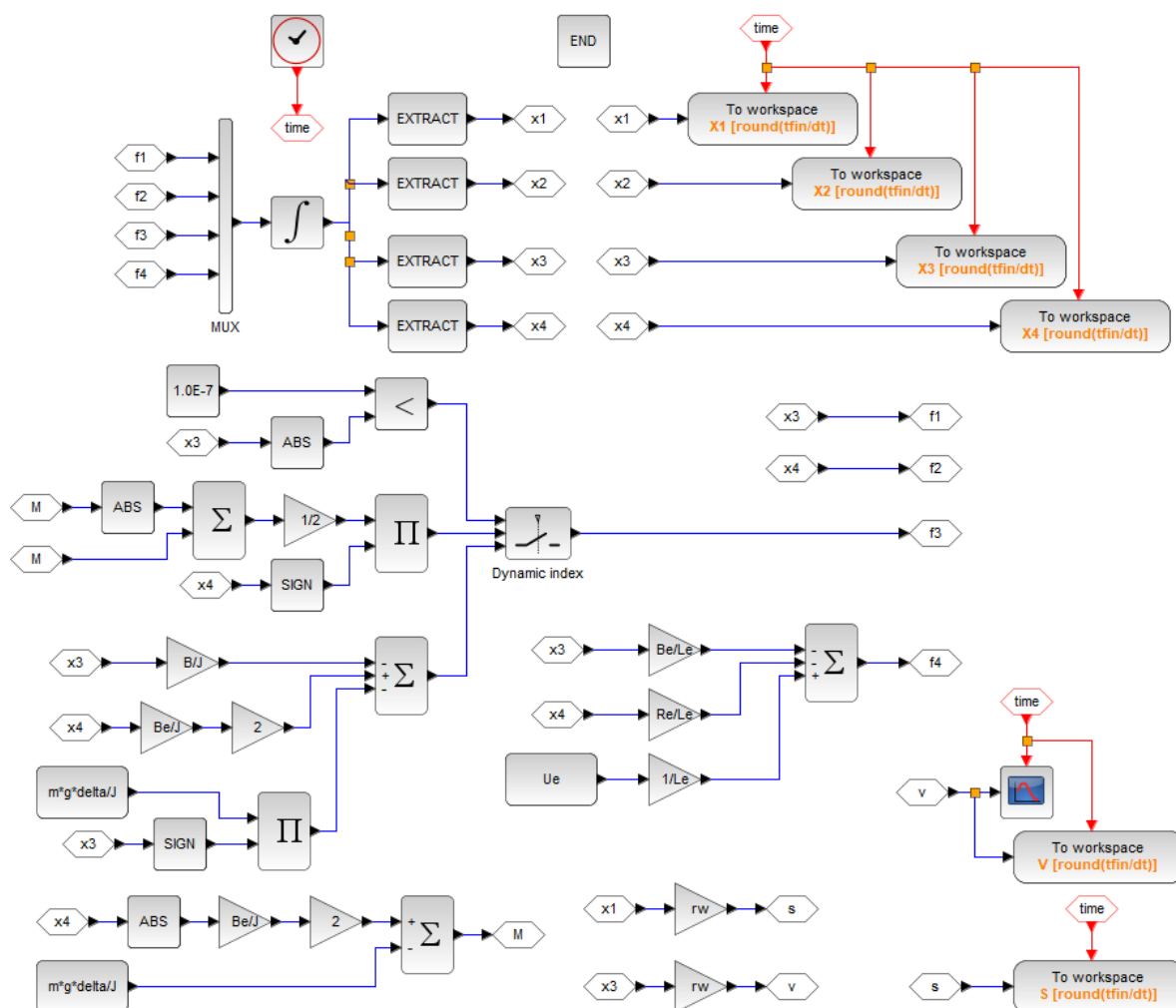


Рис. 3 – Комп'ютерна модель електромеханічних процесів в складському автоматизованому шатлі

Рух автоматизованого шатла розглядаємо протягом часу

$$t_0 \leq t \leq t_f, \quad (8)$$

де t_f – момент часу, впритул до якого дослужуються електромеханічні процеси в автономному шатлі.

Значення моментів часу (8), якими обмежено дослідження електромеханічних процесів прийнято такими:

$$t_0 = 0, t_f = 10 \text{ с}. \quad (9)$$

Крок інтегрування обирається таким чином, щоб забезпечити відображення результатів моделювання із кроком часу

$$\Delta t = 0,01 \text{ с}. \quad (10)$$

Отже, результати такого моделювання у вигляді залежності від часу електричного струму, наочно покажуть процес споживання електричної енергії автономним шатлом при зрушенні з місця впритул до досягнення ним усталеної швидкості.

Результати моделювання процесу споживання електричної енергії в автоматизованому шатлі

Споживання електричної енергії визначається при сталій напрузі живлення залежністю від часу електричного струму, отже, слід обґрунтувати достовірність відповідних результатів моделювання. Для цього використовуємо диференціальні рівняння (1), (3), лінеаризовані для кутової швидкості $\omega > 0$ у такому вигляді:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = -b\omega + 2BI - mg\delta, \\ L \frac{dI}{dt} = -RI - B\omega + U. \end{cases} \quad (11)$$

Для лінеаризованих рівнянь (11) у випадку сталої напруги живлення (6) маємо:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) = \omega_\infty, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} I(t) = I_\infty, \quad (12)$$

де ω_∞, I_∞ – усталені значення кутової швидкості коліс та струму в роторах рушійних електричних двигунів автоматизованого шатлу.

З урахуванням властивостей (12), лінеаризовані рівняння (11) набудуть вигляду:

$$-b\omega_{\infty} + 2BI_{\infty} = mg\delta, RI_{\infty} + B\omega_{\infty} = U. \quad (13)$$

Співвідношення (13) розглядаємо як систему рівнянь відносно невідомих усталених значень ω_{∞} , I_{∞} та отримаємо в результаті:

$$\omega_{\infty} = \frac{2BU - Rmg\delta}{Ru + 2B^2}, I_{\infty} = \frac{BU + Bmg\delta}{Rb + 2B^2}. \quad (14)$$

Отже, достовірність результатів моделювання щодо електричного струму встановлюється наявністю в них другої властивості (12), що має відповідати другому значенню (14). Відповідні математичній моделі (1) – (4) та прийнятим вихідним даним (5) – (10) результати комп'ютерного моделювання відповідно рис. 3 та щодо теоретично встановлених властивостей (12), (14) електромеханічних процесів в автоматизованому шатлі представлені на рис. 4.

Обговорення результатів

Отримані за допомогою комп'ютерної моделі (рис. 3) результати моделювання електромеханічних процесів (рис. 4) повністю узгоджені із встановленими теоретично властивостями (12), (14). Це підтверджує достовірність розробленої комп'ютерної моделі таких процесів (рис. 3) та дозволяє використовувати отримані з її допомогою результати.

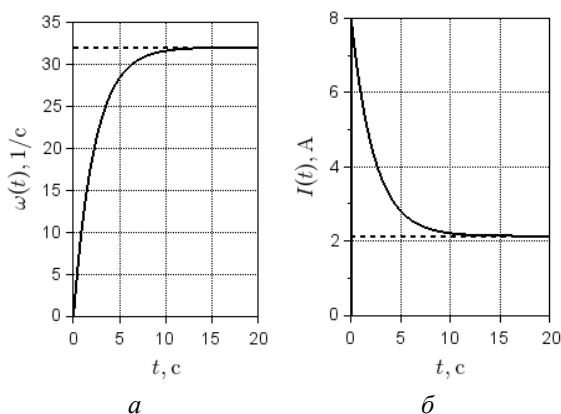


Рис. 4 – Результати моделювання електромеханічних процесів роторів рушійних електричних двигунів автоматизованого шатлу:

— — результати моделювання;
 - - - - усталені значення;

a – кутової швидкості; *б* – електричного струму

Результати для кутової швидкості (рис. 4а) свідчать, що при зрушенні з місця автоматизованого шатлу із нерухомого стану протягом певного часу – приблизно через 15 секунд після відповідного перехідного процесу встановлюється усталене значення кутової швидкості. Протягом устале-

ного процесу маємо монотонне збільшення кутової швидкості (рис. 4а).

Процес споживання електричної енергії при зрушенні з місця автоматизованим шатлом впритул до досягнення усталеної швидкості зрозумілий із рис. 4б. Результати моделювання (рис. 4б) свідчать, що споживання електричної енергії під час перехідного процесу значно більші, ніж при русі із усталеною швидкістю.

Висновки

В даному дослідженні розглянуто споживання електричної енергії автоматизованим складським шатлом, який представляє собою електромеханічну систему для виконання транспортувань вантажів між стелажми.

Запропоновано математичну модель як основу щодо дослідження зв'язаних електромеханічних процесів в автоматизованих шатлах, які широко впроваджуються сьогодні як технічні засоби автоматизації складського господарства. Можливості досліджувати споживання електричної енергії у запропонованій математичній моделі забезпечуються за рахунок визначення струму роторів рушійних електричних двигунів, відповідних заданих напругі їхнього живлення.

З використанням запропонованої математичної моделі виконано дослідження електромеханічних процесів в типовому автоматизованому шатлі, який використовується як засіб автоматизації складських систем. Показано, що при миттєво поданій сталій напрузі живлення при зрушенні автоматизованого шатлу із нерухомого стану поживання електричної енергії протягом перехідного процесу набагато більше, ніж при усталеному русі із постійною швидкістю.

Список літератури

1. Elavarasan R. M. The untold subtlety of energy consumption and its influence on policy drive towards Sustainable Development Goal 7 / R. M. Elavarasan, M. Nadarajah, R. Pugazhendhi, A. Sinha, S. Gangatharan, D. Chiaramonti, M. A. Houran // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 334. – No. paper 120698. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120698>.
2. Zhai Z. Modeling energy consumption for battery electric vehicles based on in-use vehicle trajectories / Z. Zhai, L. Zhang, G. Song, X. Li, L. Yu // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2024. – Vol. 137. – No. paper 104509. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104509>.
3. Островерхов М. Я. Дослідження енергоефективності автономної роботи електротранспорту / М. Я. Островерхов, Г. В. Вещиков // *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. – 2023. – № 3(15). – С. 41–46. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.06>.
4. Manavaalan G. Energy saving and speed control in autonomous electric vehicle using enhanced manta ray foraging algorithm optimized intelligent systems / G. Manavaalan, K. Gobikannan, S. Elango, P. Vinodh Kumar // *Journal of Power Sources*. – 2024. – Vol. 619. – No. paper 235217. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235217>.

5. Kwak J. Deep learning based approaches to enhance energy efficiency in autonomous driving systems / J. Kwak, Y. Lee, M. Choi, S. Lee // *Energy*. – 2024. – Vol. 307. – No. paper 132625. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132625>.
6. Sun B. Analysis of the influence of electric flywheel and electromechanical flywheel on electric vehicle economy / B. Sun, B. Li, J. Xing, X. Yu, M. Xie, Z. Hu // *Energy*. – 2024. – Vol. 295. – No. paper 131069. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131069>.
7. Kolupaieva I. Intelligent Automated Control in Accordance with Resource Efficiency Criteria toward Circular Economy Transition / I. Kolupaieva, I. Nevliudov, Y. Romashov, L. Tiesheva, L. Vértesy // *Intelligent and Fuzzy Systems*, Springer Nature Switzerland, Cham. – 2024. – PP. 133–141. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67195-1_17.
8. Буряковський С. Г. Оцінка потенціалу енергозбереження при застосуванні рекуперації енергії на моторвагонному електрорухомого складу для приміських перевезень / С. Г. Буряковський, Л. В. Овер'янова, В. О. Нещерет, К. І. Іванов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2023. – № 3(15). – С. 52–59. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.08>.
9. Yang J. Scheduling shuttles in deep-lane shuttle-based storage systems / J. Yang, R.B.M. de Koster, X. Guo, Y. Yu // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 308, Is. 2. – PP. 696–708. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.037>.
10. Battarra I. A design framework for shuttle-based automated storage systems / I. Battarra, R. Accorsi, G. Lupi, R. Manzini // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – vol. 58, is. 19, pp. 1216–1221. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.086>.
11. Cannava L. Green warehousing practices: Assessing the impact of PV self-consumption enhancement strategies in a logistics warehouse / L. Cannava, F. D. Javan, B. Najafi, S. Perotti // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2024. – Vol. 72. – No. paper 104054. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104054>.
12. Minářčík P. An Experimental Platform for Monitoring, Identification, and Control of HVAC Processes* / P. Minářčík, H. Procházka, M. Gulán // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – Vol. 56, Is. 2. – PP. 4705–4712. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.996>.
3. Ostroverkhov M., Veshchikov G. (2023), “Research of Energy Efficiency of Electric Transport Autonomous Operation”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(15), pp. 41–46, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.06>.
4. Manavaalan G. Energy saving and speed control in autonomous electric vehicle using enhanced manta ray foraging algorithm optimized intelligent systems / G. Manavaalan, K. Gobikannan, S. Elango, P. Vinodh Kumar // *Journal of Power Sources*. – 2024. – Vol. 619. – No. paper 235217. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235217>.
5. Kwak J. Deep learning based approaches to enhance energy efficiency in autonomous driving systems / J. Kwak, Y. Lee, M. Choi, S. Lee // *Energy*. – 2024. – Vol. 307. – No. paper 132625. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132625>.
6. Sun B., Li B., Xing J., Yu X., Xie M., Hu Z. (2024), “Analysis of the influence of electric flywheel and electromechanical flywheel on electric vehicle economy”, *Energy*, vol. 295, no. paper 131069. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131069>.
7. Kolupaieva I., Nevliudov I., Romashov Y., Tiesheva L., Vértesy L. (2024), “Intelligent Automated Control in Accordance with Resource Efficiency Criteria toward Circular Economy Transition”, *Intelligent and Fuzzy Systems*, Springer Nature Switzerland, Cham, P. 133–141. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67195-1_17.
8. Buriakovskiy S., Overanova L., Neshcheret V., Ivanov K. (2023), “Energy Saving Potential Evaluation for the Regenerative Braking Applications on the Rolling Stock for Suburban Rail”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 3(15), 52–59, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2023.03.08.3.06>.
9. Yang J., de Koster R.B.M., Guo X., Yu Y. (2023), “Scheduling shuttles in deep-lane shuttle-based storage systems”, *European Journal of Operational Research*, vol. 308, is. 2, pp. 696–708. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.11.037>.
10. Battarra I. A design framework for shuttle-based automated storage systems / I. Battarra, R. Accorsi, G. Lupi, R. Manzini // *IFAC-PapersOnLine*. – 2024. – vol. 58, is. 19, pp. 1216–1221. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.086>.
11. Cannava L., Javan F. D., Najafi B., Perotti S. (2024), “Green warehousing practices: Assessing the impact of PV self-consumption enhancement strategies in a logistics warehouse”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 72, no. paper 104054. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104054>.
12. Minářčík P., Procházka H., Gulán M. (2023), “An Experimental Platform for Monitoring, Identification, and Control of HVAC Processes*”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, is. 2, pp. 4705–4712. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.996>.

References (transliterated)

1. Elavarasan R. M., Nadarajah M., Pugazhendhi R., Sinha A., Gangatharan S., Chiramonti D., Houran M. A. (2024), “The untold subtlety of energy consumption and its influence on policy drive towards Sustainable Development Goal 7”, *Applied Energy*, vol. 334, no. paper 120698. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120698>.
2. Zhai Z., Zhang L., Song G., Li X., Yu L. (2024), “Modeling energy consumption for battery electric vehicles based on in-use vehicle trajectories”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 137, no. paper 104509. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104509>.

Надійшло (received) 23.11.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Вжеснівський Максим Олегович (Vzhesnievskiy Maksym) – аспірант кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, Харківський національний університет радіоелектроніки; м. Харків; тел.: (093) 986–99–50; e-mail: maksym.vzhesnievskiy@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7585-628X>.

Невлюдов Ігор Шакірович (Nevliudov Igor) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки; м. Харків; тел.: (067)990–82–32; e-mail: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

Автори вдячні доктору технічних наук Ромашову Юрій Володимировичу за підтримку при виконанні наукових досліджень та рукопису статті.