

УДК 681.516.75

doi:10.20998/2413-4295.2025.02.06

ЕНЕРГОЗАОЩАДЖУЮЧЕ УПРАВЛІННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ОБМЕЖЕНЬ НА ФАЗОВІ КООРДИНАТИ ПОЗИЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Н. О. ЄВСІНА*, М. А. ДЕНИСЕНКО, О. В. ДУДНИК

Кафедра «Автоматика та управління в технічних системах», НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
*e-mail: nataliia.yevsina@khpі.edu.ua

АНОТАЦІЯ Зростання вартості електроенергії в Україні, а також значне зниження її виробництва зумовлюють нагальну необхідність пошуку ефективних шляхів енергозбереження, що стає ключовим завданням енергетичної політики країни. В умовах сучасного розвитку промисловості особливу увагу слід приділяти підвищенню ефективності роботи електроприводів, які займають значну частку загального споживання електроенергії – від 50% до 60%. Ефективна оптимізація їхньої роботи є одним із перспективних напрямів енергозбереження. Досліджується методика мінімізації енергоспоживання позиційними електроприводами постійного струму, які працюють у складних експлуатаційних умовах, зокрема в режимах частих пусків, зупинок і реверсів. Для досягнення цієї мети запропоновано спеціальне управління, що формує оптимальну струмову діаграму під час перехідних процесів. Основною ідеєю є використання адаптивного підходу до управління струмом, який враховує фізичні обмеження електроприводу, а також особливості динаміки системи. Розроблено та обґрунтовано закон зміни струму на ключових ділянках перехідних процесів. У результаті дослідження виведено математичні залежності, що дозволяють розраховувати тривалість окремих ділянок управління, враховуючи обмеження на швидкість наростання струму. Отримані результати демонструють суттєве зменшення енергоспоживання під час перехідних процесів без втрати продуктивності чи надійності роботи електроприводу. Експериментальні дані підтверджують ефективність запропонованого методу управління. Впровадження даної методики дозволить не лише підвищити енергоефективність окремих пристроїв, але й сприятиме загальному розвитку енергозберігаючих технологій у промисловості. Таким чином, запропонований підхід має вагоме практичне значення для зниження енергетичних витрат у галузях із високим споживанням електроенергії.

Ключові слова: позиційний електропривод; енергозбереження; оптимальне управління; обмеження фазових координат; особливе управління; струм анкеру.

ENERGY-SAVING CONTROL UNDER PHASE COORDINATE CONSTRAINTS OF A POSITIONAL ELECTRIC DRIVE

N. YEVSINA*, M. DENYSENKO, O. DUDNIK

Department of Automation and Control in Technical Systems, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE
*e-mail: nataliia.yevsina@khpі.edu.ua

ABSTRACT The increase in electricity prices in Ukraine, along with a significant decline in electricity production, underscores the urgent need to find effective energy-saving solutions, which has become a key objective of the country's energy policy. In the context of modern industrial development, special attention should be given to improving the efficiency of electric drives, which account for a substantial share—50% to 60%—of total electricity consumption. Effective optimization of their operation is one of the promising avenues for energy conservation. This study examines methods for minimizing energy consumption in DC positioning electric drives that operate in challenging operational conditions, particularly in modes with frequent starts, stops, and reversals. To achieve this, a special control strategy is proposed that generates an optimal current diagram during transient processes. The core idea involves employing an adaptive approach to current control that considers the physical constraints of the electric drive as well as the dynamic characteristics of the system. A law governing current variation in key segments of transient processes has been developed and substantiated. As a result of the research, mathematical dependencies have been derived to calculate the duration of individual control segments, taking into account limitations on the current rise rate. The obtained results demonstrate a significant reduction in energy consumption during transient processes without compromising the productivity or reliability of the electric drive. Experimental data confirm the effectiveness of the proposed control method. Implementing this methodology will not only enhance the energy efficiency of individual devices but also contribute to the broader development of energy-saving technologies in industry. Thus, the proposed approach holds substantial practical significance for reducing energy costs in sectors with high electricity consumption.

Keywords: positional electric drive; energy saving; optimal control; phase coordinate constraints; special control; armature current.

Вступ

Економія електроенергії визнана найважливішим напрямом енергетичної політики України. Особливо в нинішніх умовах, коли

відзначається значний спад генерації електроенергії: влітку 2024 року відмічене 50% генерації від об'ємів 2021 року [1,2]. Максимальний енергозберігаючий ефект дає використання раціональних, таких, що забезпечують мінімальне споживання електроенергії,

способів управління технологічними процесами. Відомо, що електропривод є одним з основних споживачів енергії. За деякими оцінками його доля в загальному споживанні електроенергії складає близько 50-60 %.

Також слід зазначити, що ціни на електроенергію у всьому світі ростуть швидше, ніж ціни на устаткування, що є передумовою для впровадження енергозберігаючого устаткування, що дозволяє створити досконалішу технологію управління технологічними процесами з широкими можливостями підвищення їх економічної ефективності.

Тому задача розробки і впровадження в промисловість енергозберігаючих систем управління електроприводами була і залишається дуже актуальною.

Мета роботи

Мета цієї роботи — запропонувати метод, який дозволяє мінімізувати витрату енергії в позиційному приводі постійного струму шляхом пошуку особливого управління, що забезпечує вид струмової діаграми під час перехідного процесу.

Огляд існуючих технічних рішень

Сучасні енергозберігаючі системи ґрунтуються на таких технологіях, як частотне регулювання електроприводів [3], інтелектуальні системи управління та використання енергоефективних двигунів [4].

Енергозберігаючі системи управління — це системи, які можуть забезпечити необхідну продуктивність роботи механізму при мінімізації витрати енергоносія. Задачі відшукування законів управління для таких систем відносяться до класу варіаційних задач на умовний екстремум. Серед методів рішення варіаційних задач, одно з провідних місць займає принцип максимуму, розроблений академіком Л. С. Понтрягіним і його учнями. Проте було показано, що при деяких видах функціоналів основна теорема принципу максимуму не дозволяє знайти деякі відрізки екстремалей, які прийнято називати особливими. А. М. Летовим, Р. Кальманом та ін. були запропоновані варіанти рішення, що стали до сьогодення класичними.

Велика увага приділяється чисельному рішенню задачі оптимального управління, при якому здійснюється редукція задачі оптимального управління до задачі нелінійного програмування і її рішення класичними градієнтними методами оптимізації [5]. Також широко застосовуються еволюційні алгоритми, наприклад сучасний еволюційний алгоритм «сірого вовка» [6], який імітує природні процеси для розв'язання складних задач оптимізації Grey Wolf Optimizer [7]. Для простих систем може застосовуватися мікроконтролерна

система Arduino [8], яка дозволяє легко програмувати логіку управління, але для складніших задач його можна комбінувати з додатковими модулями або використовувати як частину гібридної системи з потужнішими обчислювальними платформами.

Суттєвого спрощення процесу пошуку оптимального розв'язку у реальному часі можна дістатися, якщо використовувати прогнозуючу модель [9], яка передбачає поведінку об'єкта на певному часовому горизонті, що дозволяє уникнути перевантажень і знизити енергоспоживання.

Постановка задачі з урахуванням моменту навантаження і обмежень на фазові координати

Динаміку позиційного електроприводу, з урахуванням моменту навантаження на валу, можна писати наступною математичною моделлю у відносних одиницях [10]:

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{d\tau} = \omega; \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\beta_m} (i - m_n); \\ \frac{di}{d\tau} = u - \omega - i. \end{cases} \quad (1)$$

де ϕ — кут повороту, ω — швидкість обертання двигуна, i — струм анкера, $\beta_m = T_m/T_a$, T_m — електромеханічна постійна часу, T_a — електромагнітна постійна якірного ланцюга, τ — відносний час, m_n — відносний момент навантаження, u — керуюча напруга.

З урахуванням обмеження на управління

$$|u(\tau)| \leq u_{\max} \quad (2)$$

та обмеження на величину наростання струму анкера

$$\frac{di}{dt} \leq \alpha_i. \quad (3)$$

Енерговитрати характеризуються квадратичним функціоналом:

$$q = \int_0^{\tau_f} i^2(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Вимагається перевести об'єкт (1) з початкового стану $\phi(0) = \phi_0$, $i(0) = \omega(0) = 0$ в положення $\phi(\tau_k) = \phi_k$, $\omega(\tau_k) = i(\tau_k) = 0$ за заданий час, мінімізуючи функціонал (4) з урахуванням обмежень (2)–(3). Визначити управління $u(t)$.

Розв'язок задачі ведемо за допомогою принципу максимуму, для чого в основну систему (1) вводиться додаткове рівняння:

$$\frac{dx_0}{dt} = i^2(t), \quad (5)$$

і складається функція Гамільтона:

$$H = \psi_0 i^2(t) + \psi_1 \omega + \psi_2 \frac{1}{\beta_m} (i - m_H) + \psi_3 (u - \omega - i), \quad (6)$$

де ψ_i – координати безперервної вектор функції.

З умови максимуму H по керуючій дії u уздовж оптимальної траєкторії, при нагоді прийняти $\psi_0 = -1$, маємо

$$\frac{dH}{du} = \psi_3 = 0. \quad (7)$$

Оптимальне управління має вигляд релейної функції

$$u_o = U_{\max} \text{sign}(\psi_3) d. \quad (8)$$

Виходячи з теореми про n інтервалів, оптимальне управління відповідно до (8) міститиме три інтервали. Таке рішення мало б задачу оптимальної швидкодії, що суперечить фізичному сенсу співвідношення часу перехідного процесу і витрат енергії. Отже, мають місце виражені (особливі) управління, притаманні для задач оптимального енергоспоживання.

Запишемо зв'язану систему рівнянь для допоміжної вектор-функції:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{d\tau} = -\frac{dH}{d\phi} = 0; \\ \frac{d\psi_2}{d\tau} = -\frac{dH}{d\omega} = -\psi_1 - \psi_3; \\ \frac{d\psi_3}{d\tau} = -\frac{dH}{di} = 2i - \frac{1}{\beta_m} \psi_2 + \psi_3. \end{cases} \quad (9)$$

З (9) витікає, що $\psi_1 = \text{const} = \psi_{10}$. Враховуючи це, виведемо вираження для струму анкера на виродженому інтервалі управління:

$$i = \frac{\psi_{20}}{2\beta_m} - \frac{\psi_{10}}{2\beta_m} \tau, \quad (10)$$

де $\psi_{20} = \text{const}$ – початкове значення для ψ_2 .

Таким чином, на виродженому інтервалі управління струм анкера убиває за лінійним законом (рис. 1).

При обмеженні (3) має місце триінтервальний алгоритм управління. Наявність моменту навантаження припускає присутність двох неробочих інтервалів: один на початку процесу управління (струм анкера від нульового значення наростає до

еквіваленту) і інший у кінці перехідного процесу (струм спадає від m_H до нульового значення). У цій роботі названі інтервали розглядатися не будуть зважаючи на їх обмеженість.

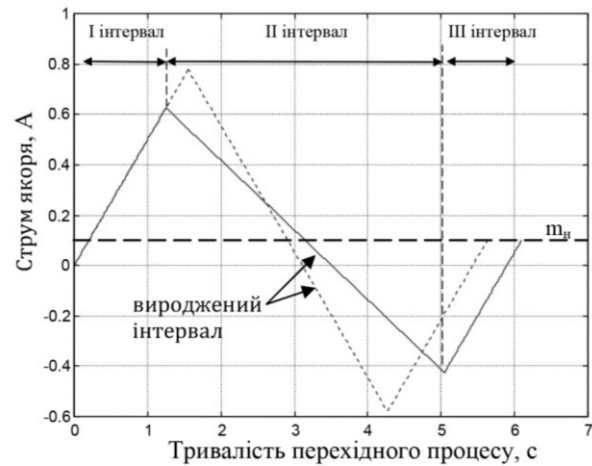


Рис. 1 – 3-інтервальна струмова діаграма

Обговорення результатів

Розглянемо вплив обмеження (3) на процес управління. Для інтервалів I та III доцільно підтримувати рівність (утримування величини наростання струму на цих інтервалах менше величини обмеження не дає помітного зниження витрат енергії через невелику тривалість цих інтервалів, проте при цьому значно ускладнюється алгоритм управління). Значення ж величини наростання струму на II інтервалі грає істотну роль, що наявне з вище сказаного. Таким чином, обмеження (3) слід розглянути як два окремі варіанти вирішення задачі, коли

$$\frac{di}{dt} = \alpha_i, \quad (11)$$

та коли

$$\frac{di}{dt} = \gamma_i < \alpha_i. \quad (12)$$

Розглянемо випадок (11), що відповідає неперервній лінії на рис. 1. Так як у цьому випадку значення наростання струму на всіх інтервалах максимально для цього обмеження, отже, нахили струмових діаграм на кожному з інтервалів максимальні. Це означає, що тривалість кожного інтервалу мінімальна і загальний час управління також мінімальний. Витрати енергії при цьому максимальні, а інтервал енергозбереження II мінімальний. Таким чином, у даному випадку маємо справу із випадком квазіоптимальної швидкодії (квазіоптимальним це рішення називаємо тому, що управління в даному випадку відрізняється від класичного релейного). Розв'язавши це завдання, можна визначити мінімальний час, на якому завдання

має рішення. З іншого боку, витрати енергії при такому управлінні вважатимемо максимальними при оцінці ефективності енергозберігаючого управління.

Склавши та розв'язавши системи рівнянь для кожного з інтервалів, отримані наступні результати: для інтервалів розгону I та гальмування III:

$$T_1 = T_3 = \sqrt[3]{\frac{\phi_k - \phi_0}{2\alpha_i} \beta_m}; \quad (13)$$

для інтервалу енергозбереження II:

$$T_2 = T_1 + T_3 = 2T_1. \quad (14)$$

Розрахований для цього випадку час перехідного процесу називатимемо часом квазіоптимальної швидкодії та позначимо τ_k^o :

$$\tau_k^o = T_1 + T_2 + T_3 = 4T_1. \quad (15)$$

Очевидно, що для вирішення задачі оптимального енергозбереження слід розглянути умову (12), яка показує, що на II інтервалі швидкість наростання струму менша за граничну, і отже на цій ділянці нахил струмової діаграми більш пологий, що відповідає пунктирній лінії на рис. 1. Таким чином, зростає час даного інтервалу, що зрештою призводить до збільшення всього часу управління τ_k . Дана задача передбачає, що час перехідного процесу наперед задано, при цьому виконується очевидна умова $\tau_k < \tau_k^o$.

Як було зазначено вище $T_1 = T_3$, отже $T_2 = \tau_k - 2T_1$.

Склавши системи рівнянь для всіх інтервалів та виконавши їх сполучення, отримаємо:

$$T_2 = \frac{\tau_k}{2} - \sqrt{\frac{\tau_k^2}{4} - \frac{6\phi_k\beta_m}{\alpha_i\tau_k}}. \quad (16)$$

Кут нахилу струмової діаграми на II інтервалі визначається виразом

$$\gamma_i = \frac{2\alpha_i T_2}{\tau_k - 2T_2}. \quad (17)$$

Знаючи тривалість інтервалів та кут нахилу діаграми на інтервалі енергозбереження, можна розрахувати управління $u(t)$ для системи (1). Загальний вигляд управління наведено на рис. 2а. Як можна бачити, оптимальне керування також складається з трьох інтервалів: на ділянках розгону і гальмування це крива 3-го порядку, а на інтервалі особливого управління — 2-го порядку. Стрибки

керуючої дії мають місце з обох боків інтервалу енергозбереження, у момент перемикання від зростання струму до спаду, та навпаки.

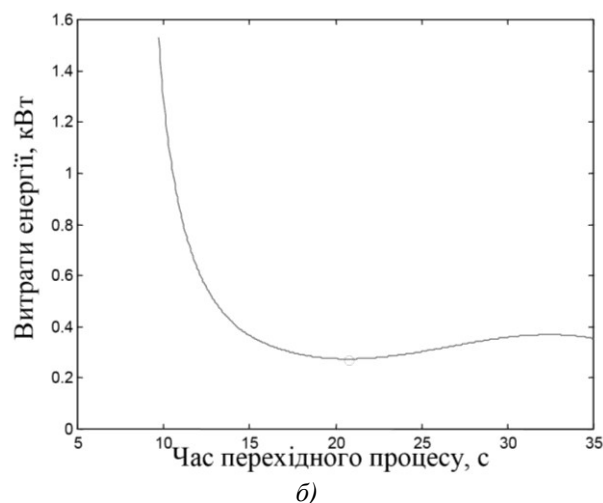
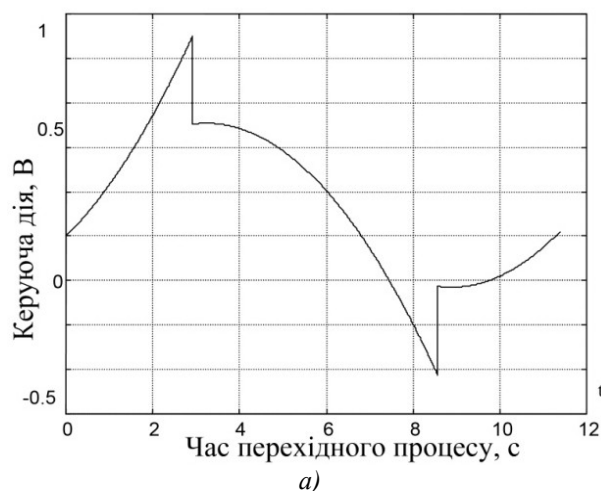


Рис. 2 – Оптимізація процесів у позиційному електроприводі. а) – оптимальне управління; б) – крива енергозбереження

У системі MATLAB [11,12] було проведено моделювання відпрацювання різних кутів повороту для низки значень параметрів приводу. Отримана крива енерговитрат (рис. 2б) характеризується істотною крутизною для відносно невеликих відхилень часу τ_k від мінімального розрахункового часу τ_k^o . Наприклад, збільшення тривалості процесу керування на 3,8% призводить до розрахункового зниження витрат енергії на 4,76%.

Також слід зазначити, що збільшувати тривалість перехідного процесу скільки завгодно не має сенсу, бо після стрімкого спаду, починається зростання енерговитрат (на рис. 2б це можна бачити з 20 с). Це явище викликане наявністю моменту навантаження m_n .

Висновки

У результаті проведеного дослідження були визначені ключові закономірності та залежності, що сприяють мінімізації витрат енергії під час управління позиційним електроприводом постійного струму. Встановлено, що струм анкеру на особливому інтервалі управління змінюється за лінійним законом, що забезпечує стабільність та прогнозованість перехідного процесу. Підтримка максимальної швидкості наростання струму дозволяє досягти однакових тривалостей інтервалів розгону і гальмування, а також встановлює тривалість особливого інтервалу управління, яка дорівнює їх сумі. Водночас зниження швидкості наростання струму на особливому інтервалі сприяє зменшенню енергоспоживання, хоча це супроводжується лише незначним збільшенням тривалості перехідного процесу. Однак надмірне збільшення тривалості цього процесу може спричинити додаткові енерговитрати через вплив моменту навантаження на валу електроприводу. Важливо зазначити, що отриманий закон оптимального управління має достатньо просту форму, що спрощує його практичну реалізацію та підвищує ефективність впровадження в енергозберігаючих системах управління електроприводами. Отримані результати створюють основу для подальшого вдосконалення алгоритмів управління, орієнтованих на підвищення енергоефективності технологічних процесів.

Список літератури

1. Рябцев Г. Омелченко В. *Енергетика України у червні 2024 р.* Центр Разумкова. Київ, 2024. 12 с. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf>.
2. Енергозабезпечення економіки України та енергозбереження. Збережена сторінка з ресурсу mk.ua від 30.04.2018 на Internet Archive: Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20180430224024/http://www.3w.mk.ua/Site3W/00000123.htm>.
3. Benítez R., Luca Z., Cardoso A. J. M. Guest Editorial Special Issue on Integrated Control and Modulation for Electric Drives. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, Vol. 11, P. 1287-1290. doi: 10.1109/JESTPE.2023.3249259.
4. Gagan A., Naimesh P., Neeraj M., Shaunak J., Hari S. Engineering intelligent motion control protocol for dual-resolution linear actuator with unified coupled drive system. *Engineering Research Express*, 2024, Vol. 6, No. 2, P. 025575. doi: 10.1088/2631-8695/ad5811.
5. Євсіна Н. О., Зуєв А. О., Гапон А. І., Денисенко М. А., Тарасенко М. В. Синтез адаптивного нечіткого логічного регулятора для керування температурою у камерній сушарці. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Випуск 4(70). С. 28-31. doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.032.
6. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 69, P. 46-61. doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.

7. Qiu Yihui, Yang Xiaoxiao, Chen Shuixuan. An improved gray wolf optimization algorithm solving to functional optimization and engineering design problems. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, P. 14190. doi: 10.1038/s41598-024-64526-2.
8. Логунов О. М. Система управління електроприводом медогонки на платформі Arduino. *Вісник Східноукраїнського Національного Університету імені Володимира Даля*. 2021. С. 60-63. doi: 10.33216/1998-7927-2021-265-1-60-63.
9. Денисенко М. А., Зуєв А. О., Євсіна Н. О., Лещенко В. М. Оптимізація системи сушіння з застосуванням прогнозуючої моделі. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Випуск 4(70). С. 32-35.
10. Meiers J., Frey G. Interfacing TRNSYS with MATLAB for Building Energy System Optimization. *Energies*, 2025, Vol. 18(2), P. 255. doi: 10.3390/en18020255.
11. Bokovi Yao, Akoro Edjadessamam, Tevi Kokou Séverin. Modeling the analog control of a DC machine in a MATLAB environment: Case of a shunt machine. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2024, Vol 43, No. 3, P. 786-799.
12. Baskoro Farid, Rohman Miftahur, S. F., Dimas Arya, Putra Aristyawan. Temperature Control of Focused Beam Lamp: PID-Controlled Pulse Width Modulation using MATLAB Simulink and Arduino. *JE-Unisla*, 2024, Vol.9, No. 2, P. 97-109. doi:10.30736/je-unisla.v9i2.1223.

References (transliterated)

1. Riabtsev H., Omelchenko V. *Enerhetyka Ukrainy u chervni 2024 r.* Tsentrazumkova. Kyiv, 2024. 12 s. Available at: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf>.
2. Enerhozabezpechennia ekonomiky Ukrainy ta enerhozberezhennia. Zberezhena storinka z resursu mk.ua vid 30.04.2018 na Internet Archive: Wayback Machine. Available at: <https://web.archive.org/web/20180430224024/http://www.3w.mk.ua/Site3W/00000123.htm>.
3. Benítez R., Luca Z., Cardoso A. J. M. Guest Editorial Special Issue on Integrated Control and Modulation for Electric Drives. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, Vol. 11, pp. 1287-1290, doi: 10.1109/JESTPE.2023.3249259.
4. Gagan A., Naimesh P., Neeraj M., Shaunak J., Hari S. Engineering intelligent motion control protocol for dual-resolution linear actuator with unified coupled drive system. *Engineering Research Express*, 2024, Vol. 6, No. 2, pp. 025575, doi: 10.1088/2631-8695/ad5811.
5. Yevsina N. O., Zuiiev A. O., Hapon A. I., Denysenko M. A., Tarasenko M. V. Syntez adaptivnoho nechitkoho lohichnoho rehulatora dlia keruvannia temperaturou u kamernii sushartsi. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'язku*, 2022, Vyp. 4(70), pp. 28-31, doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.032.
6. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 69, pp. 46-61, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.
7. Qiu Yihui, Yang Xiaoxiao, Chen Shuixuan. An improved gray wolf optimization algorithm solving to functional optimization and engineering design problems. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, pp. 14190, doi: 10.1038/s41598-024-64526-2.
8. Lohunov O. M. Systema upravlinnia elektropyvodom medohonky na platformi Arduino. *Visnyk Shkhydnooukrainskoho Natsionalnoho Universytetu imeni*

- Volodymyra Dalia*, 2021, pp. 60-63, doi: 10.33216/1998-7927-2021-265-1-60-63.
9. Denysenko M. A., Zuiiev A. O., Yevsina N. O., Leshchenko V. M. Optymizatsiia systemy sushinnia z zastosuvanniam prohnzoiuhoi modeli. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, 2022. Vyp. 4(70), pp. 32-35.
10. Meiers J., Frey G. Interfacing TRNSYS with MATLAB for Building Energy System Optimization. *Energies*, 2025, Vol. 18(2), pp. 255, doi: 10.3390/en18020255.
11. Bokovi Yao, Akoro Edjadessamam, Tevi Kokou Sévérin. Modeling the analog control of a DC machine in a MATLAB environment: Case of a shunt machine. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 2024, Vol 43, No. 3, pp. 786-799.
12. Baskoro Farid, Rohman Miftahur, S. F., Dimas Arya, Putra Aristyawan. Temperature Control of Focused Beam Lamp: PID-Controlled Pulse Width Modulation using MATLAB Simulink and Arduino. *JE-Unisla*, 2024, Vol.9, No. 2, pp. 97-109, doi: 10.30736/je-unisla.v9i2.1223.

Відомості про авторів (About authors)

Євсіна Наталя Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0214-7383; e-mail: natalia.yevsina@khpi.edu.ua.

Yevsina Natalia – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0214-7383; e-mail: natalia.yevsina@khpi.edu.ua.

Денисенко Микола Анатолійович – старший викладач кафедри автоматизації та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5252-1893; e-mail: nik1981d@gmail.com.

Denysenko Mykola – Senior Lecturer, Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5252-1893; e-mail: nik1981d@gmail.com.

Дудник Олексій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0009-0008-6529-0703; e-mail: oleksii.dudnik@khpi.edu.ua.

Dudnik Oleksii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0009-0008-6529-0703; e-mail: oleksii.dudnik@khpi.edu.ua.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Євсіна Н. О., Денисенко М. А., Дудник О. В. Енергозощаджуюче управління за наявності обмежень на фазові координати позиційного електроприводу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2025. № 2 (24). С. 43-48. doi:10.20998/2413-4295.2025.02.06.

Please cite this article as:

Yevsina N., Denysenko M., Dudnik O. Energy-saving control under phase coordinate constraints of a positional electric drive. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2025, no. 2(24), pp. 43-48, doi:10.20998/2413-4295.2025.02.06.

*Надійшла (received) 26.04.2025
Прийнята (accepted) 02.06.2025*