https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-18
УДК 681.516.75

ДУДНИК ОЛЕКСІЙ
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
https://orcid.org/0009-0008-6529-0703
e-mail: oleksii.dudnik@khpi.edu.ua
ЄВСІНА НАТАЛЯ
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
http://orcid.org/0000-0003-0214-7383
e-mail: nataliia.yevsina@khpi.edu.ua
ДЕНИСЕНКО МИКОЛА
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
https://orcid.org/0000-0001-5252-1893
e-mail: nik1981d@gmail.com
ОЛЬШЕВСЬКИЙ АНДРІЙ
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
https://orcid.org/0000-0003-2734-9491
e-mail: asd.andry.asd@gmail.com

ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ВИТРАТАМИ ЕНЕРГІЇ КЕРУВАННЯ ЗА ОБМЕЖЕННЯ ДВОХ ФАЗОВИХ КООРДИНАТ

У статті визначається закон оптимального керування, який мінімізує енерговитрати в позиційному електроприводі постійного струму з урахуванням обмежень на струм анкера та швидкість його наростання. Зазначено, що позиційний електропривод, який працює в режимах частих пусків-зупинок-реверсів, характеризується істотними витратами енергії. Під час пошуку оптимального керувального впливу враховано обмеження, що накладаються на реальну систему: за напругою, за струмом і швидкістю наростання струму. У результаті визначено закони оптимального керування, що враховують обмеження на струм анкера під час розгону і гальмування; проаналізовано зниження енерговитрат, забезпечене застосуванням таких керувань.

Ключові слова: енергозаощадження, оптимальне керування, позиційний електропривод, обмеження фазових координат, обмеження струму анкера, інтервали особливого керування.

DUDNIK ALEXEY
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
YEVSINA NATALIA
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
DENYSENKO MYKOLA
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
OLSHEVSKIY ANDREY
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

ENERGY-OPTIMAL CONTROL UNDER THE CONSTRAINT OF TWO PHASE COORDINATES

Modern technological processes consist of many operations, among which the positioning operation is one of the most common. Among the numerous positioning systems, electromechanical systems based on various types of electric drives are widely used. These systems are used in industrial robots, manipulators, conveyors, and other technological equipment.

Today, the most common type of control systems for position electric drives is systems built on the principle of subordinate regulation of parameters. These systems assume the description of the controlled object in the form of a system of linear differential equations. However, often the largest part of the resulting moment of resistance to movement is the moment created by friction forces, the mathematical description of which cannot be linearized at low speeds of the executive mechanism, which occurs during medium and small displacements.

In an electric drive, optimal control usually refers to the selection of control parameters that would provide the best performance in terms of a given criterion for the process of electromechanical energy conversion, or, in other words, the best behavior of the system, its movement toward the goal along the optimal trajectory.

The purpose of this article is to determine the law of optimal control that minimizes energy consumption in a DC positional electric drive, considering the constraints on armature current and its rate of change. It is noted that a positional electric drive operating in modes with frequent starts, stops, and reversals is characterized by significant energy losses. In the process of searching for the optimal control impact, the constraints imposed on the real system, including voltage, current, and the rate of current change, were taken into account. As a result, optimal control laws were determined, considering armature current limitations during acceleration and braking. The reduction in energy consumption achieved by applying such control strategies has been analyzed.

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

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025
Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні технологічні процеси складаються з багатьох операцій, серед яких операція позиціонування є однією з найбільш поширених. Серед численних систем позиціонування широке розповсюдження отримали електромеханічні системи на базі електроприводів різного типу. Ці системи

використовуються в промислових роботах, маніпуляторах, конвеєрах та іншому технологічному обладнанні.

На сьогодні найбільш поширеним видом систем керування позиційними електроприводами є системи, побудовані за принципом підлеглого регулювання параметрів [1]. Такі системи передбачають опис об'єкта управління у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь. Однак часто найбільшу частину приведеного моменту опору руху становить момент, що створюється силами тертя, математичний опис якого не піддається лінеаризації при малих швидкостях переміщення виконавчого механізму, що має місце при виконанні середніх і малих переміщень.

В електроприводі під оптимальним управлінням зазвичай розуміють вибір таких керуючих параметрів, які забезпечували б найкраще з точки зору заданого критерію протікання процесу електромеханічного перетворення енергії, або, інакше, найкращу поведінку системи, її рух до мети по оптимальній траєкторії [2].

Розроблення та впровадження в промисловість енергоощадних систем керування електроприводами, особливо тими, які більшу частину виробничого циклу працюють у перехідних режимах, продовжує залишатися актуальним.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасний стан проектування автоматизованих електроприводів з використанням мікроконтролерів дозволяє реалізувати досить складні алгоритми функціонування окремих блоків при невеликих витратах. Це дає можливість ставити нові завдання в області вдосконалення систем управління електроприводом і практично їх вирішувати.

Принципи побудови систем управління позиційним електроприводом, які забезпечують оптимальне за швидкодією змінення швидкості у часі, наведені в роботі [3], а в роботі [4] — система позиційного управління електроприводом, що контролює реальне переміщення. У першій згаданій статті розглянуто систему з моделями, які задають та формують керуючі впливи без нагляду за фактичним положенням механізму. В цих системах будь-яка зміна параметрів функціонування або навантаження призведе до помилки позиціонування. Саме тому такі системи можуть бути застосовані лише в тих випадках, коли не вимагається висока точність виконання завдання.

Оптимальне управління широко використовується для позиціонування приводів та різноманітних механізмів з метою підвищення ефективності та покращення ряду показників роботи. У роботі [5] розглядається електричний актуатор позиціонування, який характеризується дуже малим рухом об’єкта, що контролюється, з заданою тривалістю перемикання та короткочасним характером роботи. Специфічною вимогою є мінімальне споживання енергії.

Велика увага приділяється чисельному розв’язанню задачі оптимального керування, за якого здійснюється редукція задачі оптимального керування до задачі нелінійного програмування та її розв'язання класичними градієнтними методами оптимізації [6]. Також широко застосовуються еволюційні алгоритми, наприклад сучасний еволюційний алгоритм «сірого вовка» [7]. Зокрема, як буде показано нижче в цій роботі, для визначення швидкості наростання струму на інтервалі енергозбереження доводиться розв'язувати в реальному часі рівняння вищого за 4-й порядок, що вимагає застосування швидких чисельних методів, які сходяться.

У деяких випадках домогтися істотного спрощення процесу пошуку оптимального рішення в реальному часі можна, використовуючи прогнозуючу модель [8].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення закону керування, що дає змогу мінімізувати витрату енергії в позиційному приводі постійного струму за наявності досягнення обмежень на величину струму якоря та швидкість наростання струму.

Виклад основного матеріалу

Динаміку позиційного електроприводу, з урахуванням моменту навантаження на валу, можна писати наступною математичною моделлю у відносних одиницях [9]

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

де φ – кут повороту, ω – швидкість обертання двигуна, i – струм анкера, $\beta m = Tм/Tя$, $Tм$ – електромеханічна постійна часу, $Tя$ – електромагнітна постійна якірного ланцюга, τ – відносний час, m_n – відносний момент навантаження, u – керуюча дія.

З урахуванням обмежень на керуючий струм анкера та величину наростання струму анкера

$$\begin{cases} |u(\tau)| \le u_{max} \\ i \le \alpha_i; \\ \dfrac{di}{d\tau} \le \alpha_{i'}. \end{cases} \quad (2)$$

Енерговитрати можна охарактеризувати квадратичним функціоналом

$$q = \int_0^{\tau_\eta} i^2(\tau)d\tau. \quad (3)$$

Вимагається перевести об'єкт (1) з початкового стану φ(0) =φ0, i(0) =ω(0) =0 в положення φ(τk) =φk, ω(τk) = i(τk) = 0 за заданий час, мінімізуючи функціонал (3) з урахуванням обмежень (2). Визначити управління u(t).

Розв'язок задачі

При введенні обмеження лише на швидкість наростання струму анкера процес мінімізації функціонала (2) відбувається у межах трьох інтервалів.

Оскільки на величину струму анкера теж накладається обмеження, то в разі досягнення обмежувального значення, струм має утримуватися далі на цьому рівні, доки його величина не почне зменшуватися, завдяки зміні керувального впливу. Ця обставина дає змогу говорити про появу нового інтервалу керування, внаслідок чого струмова діаграма зазнає змін. Слід зауважити, що обмеження на струм анкера симетричне, щодо осі абсцис, водночас струмова діаграма, зважаючи на наявність моменту навантаження, такою симетрією не володіє: вона виявляється піднесеною щодо осі абсцис. Таким чином, обмеження за струмом на VI інтервалі може не бути досягнуто. Отже, необхідно розглянути два окремі випадки: керування з чотирма робочими інтервалами (досягається одне обмеження в позитивній півплощині, тобто на етапі розгону) і керування з п'ятьма інтервалами (досягаються обмеження в позитивній і негативній півплощинах, тобто на етапі гальмування). Обидва випадки наведено на малюнках 1.а) і 1.б) відповідно. На малюнках присутня ділянка холостого ходу тривалістю T_{xx}, тривалість якого визначається співвідношенням

$$T_{\text{xx}} = \frac{m_n}{\alpha_{i'}}.. \quad (4)$$

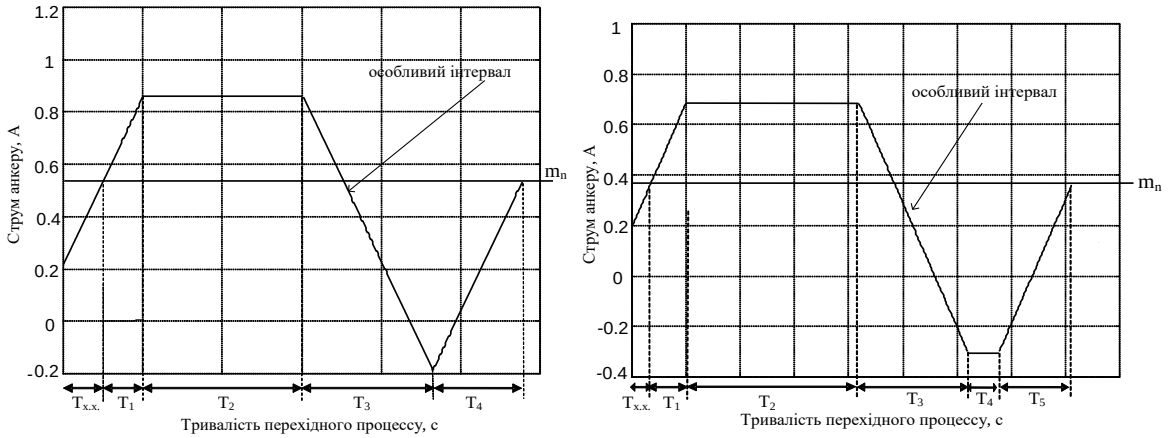


Рис. 1. Вигляд оптимальної діаграми струму анкера: а) – при досягненні обмеження на ділянці розгону; б) – при досягненні обмеження на ділянці гальмування

Хоч якось помітного впливу на величину витрат енергії під час перехідного процесу цей інтервал не чинить, тому в подальших розрахунках ураховувати його не має сенсу.

Тривалість першого інтервалу для обох випадків визначається співвідношенням

$$T_1 = \frac{\alpha_i - m_n}{\alpha_{i'}} \quad (5)$$

Вирази для визначення тривалості інтервалів управління для процесу, зображеного на рис. 1а, такі

$$T_2 = (T_1 + T_4)\left(\frac{\alpha_{i'}}{\alpha_i - m_n}T_4 - 1\right); \quad (6)$$

$$T_3 = T_1 + T_4; \quad (7)$$

$$\frac{\alpha_{i'}}{2\beta_m(\alpha_i - m_n)}[T_4{}^4 + (T_1^2 + 1)T_4^2 + T_1T_4] + \frac{1}{\beta_m}\left(1 + \frac{\alpha_{i'}}{6}\right)T_4^3 - \phi_k = 0. \quad (8)$$

Отримане рівняння 4-го порядку (8) для визначення T_4 розв'язується за допомогою чисельних методів. Отримавши значення T_4, визначаємо тривалість інтервалів T_2 і T_3 за наведеними співвідношеннями. Загальний час перехідного процесу, який є мінімальним за часом з урахуванням обмежень на велич струму і швидкість його зростання, отримуємо як суму тривалості інтервалів:

$$\tau_k^0 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \quad (9)$$

Витрати енергії на кожному з робочих інтервалів визначаються співвідношеннями

$$q_1 = m_n^2T_1 + m_n\alpha_{i'}T_1^2 + \frac{1}{3}\alpha_{i'}{}^2T_1^3, \quad (10)$$

$$q_2 = \alpha_i^2T_2, \quad (11)$$

$$q_3 = \alpha_i^2T_3 - \alpha_i\alpha_{i'}T_3^2 + \frac{1}{3}\alpha_{i'}{}^2T_3^3, \quad (12)$$

$$q_4 = m_n^2T_4 - m_n\alpha_{i'}T_4^2 + \frac{1}{3}\alpha_{i'}{}^2T_4^3.$$

Цей процес розглядатимемо як квазіоптимальний за швидкодією. З метою зменшення енерговитрат, слід вибрати тривалість перехідного процесу τ_k більшою, ніж розрахована вище тривалість квазіоптимального за швидкодією перехідного процесу τ_k^0, тобто $\tau_k > \tau_k^o$.

У разі збільшення тривалості перехідного процесу кут нахилу струмової діаграми на ділянці III — ділянці особливого управління — почне зменшуватися і визначатиметься виразом:

$$\gamma_{i'} = -\frac{(\alpha_i - m_n + \alpha_{i'}T_4)^2}{2\beta_m K + 2(\alpha_i - m_n + \frac{1}{2}\alpha_{i'}T_4)T_4}, \tag{14}$$

де $K = -\frac{1}{\beta_m}(\alpha_i - m_n)(\tau_a + \frac{\alpha_i - m_n}{\alpha_{i'}}), \tau_a = \tau_k - T_1$, при цьому T_1 не зміниться, а тривалість інтервалу VI визначається чисельним способом з наступного рівняння:

$$\begin{aligned}[\frac{\alpha_i - m_n}{2\beta_m}(\tau_a - T_4)^2 - \frac{\alpha_{i'}}{6\beta_m}T_4^3](\alpha_i - m_n + \alpha_{i'}T_4) - \frac{2\beta_m}{3}[K + \frac{1}{\beta_m}(\alpha_i - m_n + \\ + \frac{1}{2}\alpha_{i'}T_4)T_4]^2 = [\phi_k - \frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_1^2(\frac{1}{3}T_1 + \tau_a)](\alpha_i - m_n + \alpha_{i'}T_4).,\end{aligned} \tag{15}$$

Тривалість інтервалів II і III визначається за формулами відповідно:

$$T_3 = \frac{\alpha_i - m_n + \alpha_{i'}T_4}{\gamma_{i'}}, \tag{16}$$

$$T_2 = \tau_a - T_3 - T_4. \tag{17}$$

Тепер витрати енергії на інтервалі енергозаощадження визначаються залежністю:

$$q_3 = \alpha_i^2 T_3 - \alpha_i\alpha_{i'}T_3^2 + \frac{1}{3}{\gamma_{i'}}^2 T_3^3 \tag{18}$$

У разі досягнення струмом анкера свого максимального від'ємного значення, алгоритм керування доповнюється ще одним інтервалом, на якому утримується постійне від'ємне значення струму анкера. Таким чином, слід розглядати п'ятиінтервальний алгоритм керування (рис. 1б).

Тривалість інтервалів III і V визначають за формулами:

$$T_3 = \frac{2\alpha_i}{\alpha_{i'}}; \tag{19}$$

$$T_5 = \frac{\alpha_i + m_n}{\alpha_{i'}}. \tag{20}$$

Нагадаємо, що інтервал III є інтервалом особливого керування, а кут нахилу струмової діаграми на цьому інтервалі визначає енергозбереження під час перехідного процесу. Вираз (19) для Т3 отримано для максимально допустимого значення швидкості наростання струму анкера, водночас тривалість інтервалу мінімальна, тобто отримаємо розв'язання задачі квазішвидкодії.

Для обчислення тривалості інтервалу IV слід розв'язати квадратне рівняння:

$$a_1 T_4^2 + a_2 T_4 - a_3 = 0, \tag{21}$$

де

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{1}{2\beta_m}(\alpha_i + m_n)(\frac{\alpha_i + m_n}{\alpha_i - m_n} + 1), \\ a_2 &= (\frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_1^2 + \frac{\alpha_i - m_n}{\beta_m}T_3)\frac{\alpha_i + m_n}{\alpha_i - m_n} + \frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_5^2 + \frac{1}{\beta_m}\frac{4m_n\alpha_i(\alpha_i + m_n)}{\alpha_{i'}(\alpha_i - m_n)}, \\ a_3 &= \phi_k - \frac{1}{6\beta_m}\frac{(\alpha_i - m_n)^3 + (\alpha_i + m_n)^3}{\alpha_{i'}^2} - \frac{T_3}{2\beta_m}\left[\frac{(\alpha_i - m_n)^2}{\alpha_{i'}} + (\frac{\alpha_{i'}}{3} - m_n)T_3\right] - \\ &-(\frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_1^2 + \frac{\alpha_i - m_n}{\beta_m}T_3)\frac{4m_n\alpha_i}{\alpha_{i'}(\alpha_i - m_n)}\frac{16{m_n}^2{\alpha_i}^2}{2\beta_m{\alpha_{i'}}^2(\alpha_i - m_n)}.\end{aligned} \tag{22}$$

Тривалість інтервалу II визначається зі співвідношення

$$T_2 = \frac{4m_n\alpha_i}{\alpha_{i'}(\alpha_i - m_n)} + \frac{\alpha_i + m_n}{\alpha_i - m_n}T_4 \tag{23}$$

Знаючи тривалості всіх інтервалів управління, можна розрахувати загальний час перехідного процесу, що буде мінімально можливим для даної системи, за вказаних обмежень

$$\tau_k^0 = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5. \tag{24}$$

Вирази для витрат енергії на інтервалах I, II і III відповідають наведеним для попереднього випадку. Для інтервалів IV і V витрати енергії розраховуються за формулами (вони виведені для так званого зворотного руху):

$$q_4 = {\alpha_{i'}}^2 T_4; \tag{25}$$

$$q_5 = \frac{1}{3}\alpha_i^2{T_5}^3 + \alpha_i\alpha_{i'}T_5^2 + {\alpha_i}^2 T_5. \tag{26}$$

Задаючись тривалістю перехідного процесу τ_k, для якого дотримується нерівність $\tau_k > \tau_k^o$, витрати енергії можуть бути зменшені. При цьому зростає тривалість T_3 інтервалу особливого керування і змінюються тривалості інтервалів обмеження струму T_2 та T_4. Тривалість T_1 та T_5 не змінюються. Кут нахилу струмової діаграми на III інтервалі зменшується і визначається зі співвідношення:

$$\gamma_{i'} = \sqrt{\frac{K1}{K2}} \tag{27}$$

де

$$K1 = -\frac{\alpha_i^3}{3\beta_m}, \tag{28}$$

$$K2 = -\phi_k + \frac{\alpha_{i'}}{6\beta_m}(T_5^3 + T_1^3) + (\frac{m_n\alpha_i}{\beta_m\alpha_{i'}} - \frac{\alpha_i - m_n}{2\beta_m}\tau_a) \times (\frac{m_n\alpha_i}{\alpha_{i'}} + \frac{\alpha_i - m_n}{2}\tau_a)\frac{1}{\alpha_i} + \\ + \frac{1}{2\beta_m}\alpha_{i'}T_2^2\tau_a + \frac{\alpha_i - m_n}{2\beta_m}{\tau_a}^2, \tag{29}$$

$$\tau_a = \tau_k - T_1 - T_5. \tag{30}$$

Тривалість інтервалу енергозаощадження визначається за формулою

$$T_3 = \frac{2\alpha_i}{\gamma_{i'}}. \tag{31}$$

Тривалість інтервалів утримання струму на максимальному рівні:

$$T_4 = \frac{m_n}{\alpha_{i'}} + \frac{\alpha_i - m_n}{2\alpha_i}\tau_a - \frac{\alpha_i}{\gamma_{i'}}; \tag{32}$$

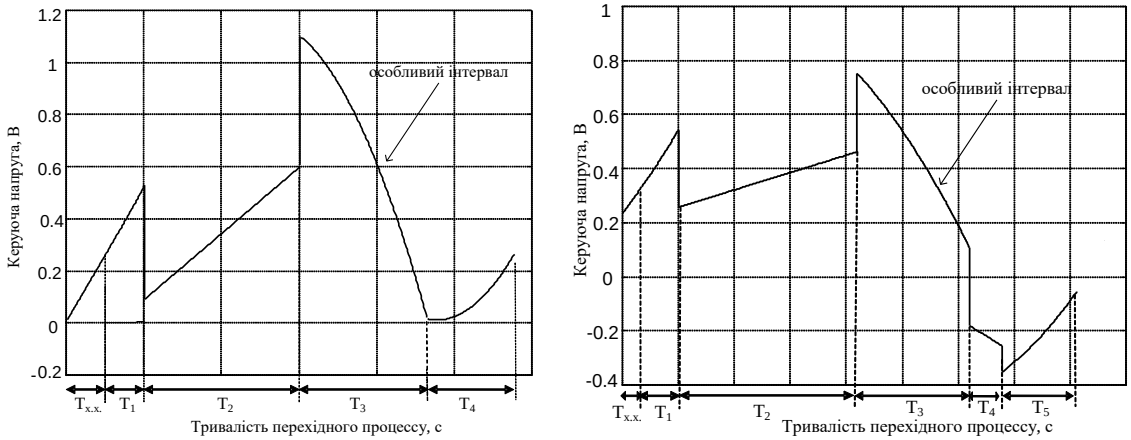
$$T_2 = \tau_a - T_3 - T_4. \tag{33}$$

Підставивши в (33) вирази (29), (31) та (32), отримаємо рівняння для T_2, яке розв'язують чисельними методами.

У підсумку, витрати на енергозберігаючому інтервалі III

$$q_3 = \alpha_i^2 T_3 - \alpha_i\gamma_{i'}T_3^2 + \frac{1}{3}{\gamma_{i'}}^2 T_3^3 \tag{34}$$

Графічне представлення законів оптимального керування для обох випадків наведено на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Вигляд оптимальної керуючої дії (напруга): а) – при досягненні обмеження на ділянці розгону; б) – при досягненні обмеження на ділянці гальмування

Оптимальні керівні впливи мають розриви по краях інтервалів підтримання максимального допустимого значення струму: для 4-інтервального процесу (рис. 2а) це інтервал II, для 5-інтервального процесу (рис. 2б) це інтервали II і IV. Позбутися розривів керуючого впливу можна шляхом введення у функціонал (3) доданка у вигляді квадрата від напруги. Однак, такий підхід виходить за рамки цієї статті.

За результатами обчислень було проведено моделювання в системі MATLAB [12]. На рис. 3 наведено графік зменшення енерговитрат у разі використання різних алгоритмів керування. Область застосування 4-х і 5-и інтервальних алгоритмів на рисунку виділено. Графік має суттєву крутизну, яка свідчить, що незначному збільшенню тривалості перехідного процесу відповідає суттєве зменшення енерговитрат.

При кутах повороту φ_k від 1 до 2,2 в відносних одиницях, завдання квазішвидкодії вирішується за допомогою 5-ти інтервального алгоритму. При збільшенні тривалості перехідного процесу на 9% рішення досягається при використанні 4-інтервального алгоритму. У цьому разі витрати енергії знижуються на 37%. Якщо збільшити тривалість перехідного процесу на 27%, то слід використовувати 3-інтервальний алгоритм. При цьому енерговитрати скорочуються на 60% порівняно з вихідними. Слід зазначити, що отримані чисельні значення доволі абстрактні й мають суто теоретичне значення.

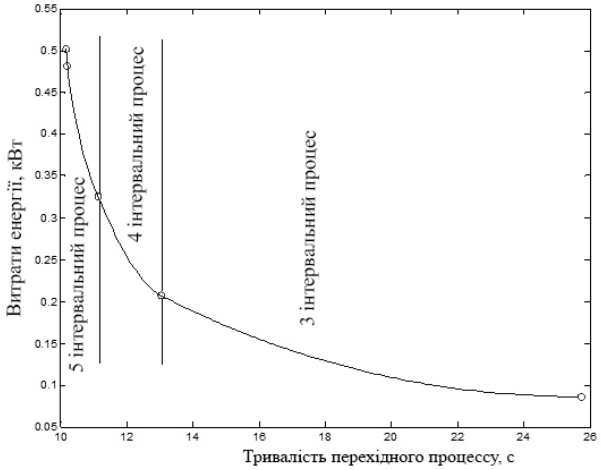


Рис. 3. Зменшення витрат енергії при використанні 4- та 5-інтервальної керуючої дії

Висновки

На основі проведеного аналізу можна зробити ряд висновків. Введення обмеження на величину струму анкера зумовлює появу додаткових інтервалів у законах оптимального керування. При цьому закон оптимального керуючого впливу для напруги анкера має розриви на межах ділянок утримання струму анкера на рівні заданого обмеження. Виявлено, що діапазон тривалостей перехідних процесів, у межах якого існують 5- і 4-інтервальні закони керування, є досить вузьким, однак забезпечує значне зниження енерговитрат завдяки високій крутизні енергетичної оптимізації. Також встановлено, що в деяких випадках для розрахунків тривалостей інтервалів керування необхідно застосовувати чисельні методи, що ускладнює вирішення задачі оптимального керування в реальному часі.

Література

1. Ford P. J., Amiri E., Mendrela E. Electric elevator drive with position control /P. J. Ford, E. Amiri, E. Mendrela //Springer Electrical Engineering. – 2016. – Volume 98. – P. 307–319. – DOI: https://doi.org/10.1007/s00202-016-0368-3.

2. Gaiceanu M., Rosu E., Paduraru R., Dache C. Optimal control development system for electrical drives. / M. Gaiceanu, E. Rosu, R. Paduraru, C. Dache // The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati Fascicle III Electrotechnics Electronics Automatic Control and Informatics. –2008. – Volume 31, No. 1. – P. 5-10. – ISSN 1221-454X.

3. De Doncker R. W., Pulle D. W. J., Veltman A. Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control / R. W. De Doncker, D. W. J. Pulle, A. Veltman // 2nd Ed. Springer Cham. – 2020. – 419 p. – ISBN 978-3-030-48977-9. –DOI: 10.1007/978-3-030-48977-9.

4.Yong-xiu Wang, Zhi-qian Mei, Rui Wang. The stability analysis of the position control system with disturbance observer for induction machine drive/ Wang Yong-xiu, Mei Zhi-qian, Wang Rui // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge. – 2008. – P. 478-484. – DOI: 10.1109/ISIE.2008.4677018.

5.Liske A. Hofmeir P., Braun M. Extended Straightforward Current Control for Permanent Magnet Synchronous Machines/A. Liske, P. Hofmeir, M. Braun M. // In Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 3–5 September 2013. – P. 1-10. – DOI: 10.1109/EPE.2013.6634690.

6. Zhongjing Ma, Suli Zou. Optimal Control Theory: The Variational Method / Ma Zhongjing, Zou Suli // School of Automation. Institute of Electrical Engineering, IEEE. – 2021. – DOI: 10.1007/978-981-33-6292-5.

7. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer/ S. Mirjalili , S.M. Mirjalili , A. Lewis // In Advances in Engineering Software. –2014. – Volume 69. – P. 46-61. – DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

8. Денисенко М. А., Зуєв А. О., Євсіна Н. О., Лещенко В. М. Оптимізація системи сушіння з застосуванням прогнозуючої моделі/ М. А . Денисенко, А.О. Зуєв А, Н.О. Євсіна , В.М. Лещенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – № 4(70) . –2022.– С. 32-35. – DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.028.

9. Лапшин Д. Р., Дудник О. В. Енергозберігаюче керування позиційним електроприводом постійного струму/ Д. Р. Лапшин, О. В . Дудник // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, Харків : НТУ "ХПІ", 19-22 листопада 2024. – С. 287-288.

10. Astrom K. I. Advanced PID Control / K. I. Astrom, T. Hagglund//The Instrumentation Systems And Automation Society, USA – 2006. – P. 460. – DOI:10.1109/MCS.2006.1580160

11.O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer// Imperial College Press, London. –2003. – 564 P. – DOI:10.1016/j.jprocont.2004.01.007.

12. Control System Toolbox. User's Guide, Version R2024b //The MathWorks, Inc., 2024. – Режим доступу: https://www.mathworks.com/help/control/index.html.

References

1. Ford P. J., Amiri E., Mendrela E. Electric elevator drive with position control /P. J. Ford, E. Amiri, E. Mendrela //Springer Electrical Engineering. – 2016. – Volume 98. – P. 307–319. – DOI: https://doi.org/10.1007/s00202-016-0368-3.

2. Gaiceanu M., Rosu E., Paduraru R., Dache C. Optimal control development system for electrical drives. / M. Gaiceanu, E. Rosu, R. Paduraru, C. Dache // The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati Fascicle III Electrotechnics Electronics Automatic Control and Informatics. –2008. – Volume 31, No. 1. – P. 5-10. – ISSN 1221-454X.

3. De Doncker R. W., Pulle D. W. J., Veltman A. Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control / R. W. De Doncker, D. W. J. Pulle, A. Veltman // 2nd Ed. Springer Cham. – 2020. – 419 p. – ISBN 978-3-030-48977-9. –DOI: 10.1007/978-3-030-48977-9.

4.Yong-xiu Wang, Zhi-qian Mei, Rui Wang. The stability analysis of the position control system with disturbance observer for induction machine drive/ Wang Yong-xiu, Mei Zhi-qian, Wang Rui // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Cambridge. – 2008. – P. 478-484. – DOI: 10.1109/ISIE.2008.4677018.

5.Liske A. Hofmeir P., Braun M. Extended Straightforward Current Control for Permanent Magnet Synchronous Machines/A. Liske, P. Hofmeir, M. Braun M. // In Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, 3–5 September 2013. – P. 1-10. – DOI: 10.1109/EPE.2013.6634690.

6. Zhongjing Ma, Suli Zou. Optimal Control Theory: The Variational Method/ Ma Zhongjing, Zou Suli // School of Automation. Institute of Electrical Engineering, IEEE. – 2021. – DOI: 10.1007/978-981-33-6292-5.

7. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer/ S. Mirjalili , S.M. Mirjalili , A. Lewis // In Advances in Engineering Software. –2014. – Volume 69. – P. 46-61. – DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.

8. Denysenko M. A., Zuiev A. O., Yevsina N. O., Leshchenko V. M. Optymizatsiia systemy sushinnia z zastosuvanniam prohnozuiuchoi modeli/ M. A. Denysenko, A.O. Zuiev A, N.O. Yevsina , V.M. Leshchenko // Systemy upravlinnia, naviha-tsii ta zviazku. – № 4(70). –2022. – C. 32-35. – DOI: 10.26906/SUNZ.2022.4.028.

9. Lapshyn D. R., Dudnyk O. V. Enerhozberihaiuche keruvannia pozytsiinym elektropryvodom postiinoho strumu// D. R. Lapshyn, O. V. Dudnyk / Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh : zb. tez dop. 18-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. mahistrantiv ta aspirantiv, Kharkiv: NTU "KhPI", 19-22 lystopada 2024. – S. 287-288.

10. Astrom K. I. Advanced PID Control / K. I. Astrom, T. Hagglund//The Instrumentation Systems And Automation Society, USA – 2006. – P. 460. – DOI:10.1109/MCS.2006.1580160

11.O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / A. O'Dwyer// Imperial College Press, London. –2003. – 564 P. – DOI:10.1016/j.jprocont.2004.01.007.

12. Control System Toolbox. User's Guide, Version R2024b // The MathWorks, Inc., 2024. – Rezhym dostupu: https://www.mathworks.com/help/control/index.html.