

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.11

УДК 62-83:681.513.5

Дерець О.Л., к.т.н., доцент, ORCID:0000-0001-6432-2592, e-mail: ald_dstu@i.ua
Костенко В.І., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Карачковський П.П., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Derets Oleksandr, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics
Kostenko Volodymyr, Postgraduate student
Karachkovskiy Petro, Postgraduate student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ПРОГНОЗУВАННЯ ВЕЛИЧИНИ РИВКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА У ЗАДАЧАХ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розвитку теорії оптимального керування з урахуванням сучасного рівня технічних систем. Метою цієї роботи є вдосконалення методу N -і перемикань, спрямованого на підвищення швидкодії релейних систем керування електроприводом, синтезованих з його застосуванням. Для досягнення мети виконано формування перехідної траєкторії, її еквівалентне перетворення, усереднення ривка на окремих часових інтервалах, синтез уточнених параметрів та порівняльний аналіз функціонування позиційних систем керування за різних налаштувань. Результатом стало розширення математичного апарату методу N -і перемикань, орієнтованого на задачі оптимізації систем третього порядку, що сприяє підвищенню ефективності керування електроприводами. Поєднання отриманих формул з алгоритмами синтезу релейних систем оптимального та модального керування є перспективним напрямком впровадження результатів дослідження.

Ключові слова: метод N -і перемикань; система керування положенням; оптимальність за швидкістю; уточнене прогнозування ривка.

The relevance of the study is due to the need to develop the theory of optimal control taking into account the level of modern development of technical systems. The purpose of this work is to refine N -i switching method, aimed at increasing the speed of the relay control systems synthesized with its application. To achieve this goal, the study involved the formation of the transition trajectory, its equivalent transformation, the averaging of the jerk at separate time intervals, synthesis of refined parameters and a comparative analysis of the functioning of the positional electric drive control systems at various settings. The result of the work is the expansion of the mathematical apparatus of the N -i switching method, focused on the optimization problems of third-order systems, which contributes to increasing the efficiency of control of electromechanical systems. The combination of the obtained formulas with the algorithms for the synthesis of relay systems for optimal and modal control of the electric drive is a promising implementation of the research results.

Keywords: method N -i switching; system control position; optimality for speed; refined prediction of jerk.

Постановка проблеми

Притаманні електроприводам обмеження проміжних координат роблять нелінійними системи керування [1], що ускладнює застосування варіаційних методів для їх оптимізації [2]. Разом з тим, стабілізація координат стану на певних часових інтервалах відкриває шлях до порівняно простого прогнозування часових діаграм перехідних процесів [3], які протікають з максимальною швидкістю, і подальшого синтезу на їх основі систем оптимального керування [4]. Проблема полягає в неможливості або недоцільності стабілізації окремих координат електропривода [1], що зумовлює використання усереднених або наближених їх значень при формуванні оптимальних траєкторій [3] і знижує ефективність оптимізації систем керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Нелінійність властива системам з обмеженнями незалежно від типу застосованих регуляторів [2]. У випадку релейних систем [5] підпорядкованого керування електроприводами вона зумовлена одночасно розривними характеристиками регуляторів [6], обмеженнями проміжних координат, завдяки роботі внутрішніх контурів керування [7], [8] та нелінійностями електромеханічної системи [4]. Останні успішно нівелюються шляхом лінеаризації математичного опису об'єкта керування [1], [9], а врахування розривного характеру сигналів релейних регуляторів в ustalених режимах можна уникнути, завдяки їх ковзанню відповідно до лінійних функцій перемикання [6], в технічній реалізації яких вирішальну роль відіграють спостерігачі стану [7], [10]. Проте розриви та насичення характеристик регуляторів, що проявляються в перехідних режимах, неможливо виключити з розгляду при оптимізації за швидкодією [3], [11] оскільки саме моменти розриву керуючих впливів та рівні їх обмеження визначають вигляд часових діаграм координат стану [5]. Отже, суто нелінійний характер руху таких систем [12] унеможливує застосування класичних варіаційних методів [2], [3] і спонукає до виконання параметричного синтезу регуляторів методами, в основі яких лежить дизайн перехідної траєкторії, що є оптимальною за певних обмежень [11]. Такі методи поєднують певні алгоритми побудови перехідних траєкторій з теоретичним обґрунтуванням їх форми [4], тобто займають проміжне положення між аналітичними та чисельними [12]. Серед них слід відзначити метод $N-i$ перемикань, який не лише визначає вирази для координат точок перемикання релейних регуляторів на оптимальній траєкторії, але й дає аналітичне розв'язання задачі визначення параметрів каскаду цих регуляторів [11]. Одним з факторів, що зумовлюють високу ефективність цього методу, є припущення про сталість ривка електромеханічної системи у той час, коли напруга силового перетворювача незмінна [13]. Воно значно спрощує аналітичні викладки та дозволяє частково узагальнити їх на довільний порядок системи, проте в дійсності виконується лише для вкрай обмеженого кола механізмів, які вимагають примусової стабілізації ривка.

Формулювання мети дослідження

Невідповідність форм реальної та розрахункової діаграм ривка електропривода вимагає класифікувати системи, синтезовані методом $N-i$ перемикань як квазіоптимальні за швидкодією. Однак ця невідповідність може бути значною мірою скомпенсована ретельним прогнозуванням ривка на кожному інтервалі, де виконується підміна його реальної діаграми константою, з подальшим максимально точним визначенням цієї константи [14]. Мета дослідження полягає в оцінці ефективності застосування цього підходу при синтезі регуляторів релейної системи керування позиційним електроприводом з каскадною структурою.

Виклад основного матеріалу

Візьмемо за основу математичний опис позиційного електропривода, який є об'єктом керування, лінеаризованими диференціальними рівняннями [11], що мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon = \frac{1}{J} \cdot (c \cdot i - M_s) \\ p\varepsilon &= a = \frac{c}{J} \cdot \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де ε, ω — кутові прискорення та швидкість валу двигуна; φ — приведене до валу двигуна кутове положення робочого органу; $L, J, c = k\Phi, R$ — параметри електропривода, визначені на основі паспортних даних електричної машини; a — величина кутового ривка, яка є пропорційною напрузі u , прикладеній до якірного кола; M_s — статичний момент, i — струм якірного кола.

З'єднані у каскад регулятори обмежують проміжні координати на рівнях $\omega_{max}, \varepsilon_{max}$, керуюча частина системи описується рівняннями

$$\left. \begin{aligned} u_{R1} = u_{R\varphi} = \omega^* &= \omega_{max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R2} = u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R3} = u_{R\varepsilon} = u^* &= u_{max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де K_{ij} — коефіцієнти; u_{max} — рівень обмеження напруги; $R_1 = R\varphi$, $R_2 = R\omega$, $R_3 = R\varepsilon$ — регулятори, проіндексовані у відповідності до положення у каскаді та керованої координати; u_{Ri} — сигнал i -го регулятора, що формує завдання (позначене символом «*») для $i+1$ -го контуру.

Формули коефіцієнтів зворотних зв'язків системи керування (1), (2) третього порядку ($N=3$), отримані методом $N-i$ перемикачів для R_2 та R_1 відповідно, є такими:

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}, \quad (3)$$

$$K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{max}}{4 \cdot a_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}^2}{12 \cdot a_{max}^2}, \quad K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{max}}{2 \cdot \varepsilon_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}. \quad (4)$$

У базовому варіанті методу $N-i$ перемикачів [11] рівень ω_{max} визначається за швидкісними характеристиками електропривода, а граничне прискорення зумовлене обмеженням струму

$$\varepsilon_{max} = \frac{c}{J} \cdot i_{max}. \quad (5)$$

На відміну від ω_{max} , ε_{max} рівень обмеження ривка a_{max} визначається з врахуванням специфіки методу $N-i$ перемикачів. По-перше, реальний об'єкт керування у методі $N-i$ перемикачів заміняється нейтральним динамічним об'єктом

$$p\varphi = \omega, \quad p\omega = \varepsilon, \quad p\varepsilon = a, \quad (6)$$

прогнозовані діаграми його координат в оптимальному за швидкодією перехідному процесі наведені на рис. 1. Зауважимо, що оптимізація на основі прогнозування є типовою як в електромеханіці [1], так і в інших галузях технологій [15].

По-друге, рівень обмеження ривка a_{max} приймається однаковим за абсолютною величиною для всіх інтервалів сталості напруги, для яких ривок вважається константою

$$u(t) = const \Rightarrow a(t) = const, \quad (7)$$

і визначається з третього рівняння системи (1) без урахування збурень і глибини внутрішніх зворотних зв'язків електропривода за формулою

$$a_{max} = \frac{c}{JL} \cdot u_{max}. \quad (8)$$

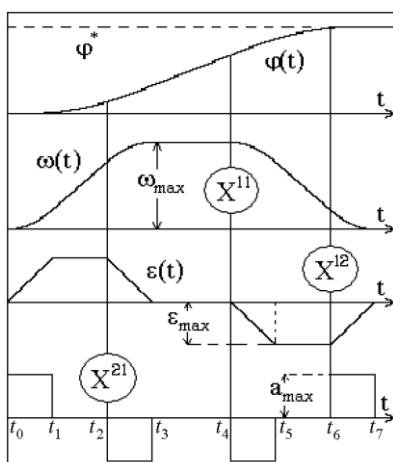


Рис. 1. Розрахункові діаграми процесу позионування

Припущення (6), (7) ігнорують реальну форму діаграм ривка та відмінності його середніх значень на різних інтервалах (рис. 2) від розрахованого за формулою (8). Завдяки цьому прийому, фрагменти розрахункових діаграм на усіх інтервалах сталості напруги набувають подібності, що дозволяє розповсюджувати результати прогнозування оптимальної перехідної траєкторії на довільний порядок системи та виконувати оптимізацію за швидкодією в аналітичній формі [11]. Перехідні процеси систем, синтезованих у такий спосіб, мало відрізняються від оптимальних, оскільки частка інтервалів сталості напруги у загальній тривалості динамічних режимів електроприводів є порівняно малою. Зауважимо, що на рис. 1 та рис. 2 ці інтервали штучно збільшені для підвищення інформативності діаграм.

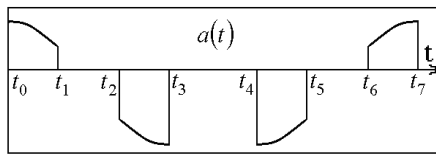


Рис. 2. Реальна форма діаграми ривка електропривода

не прогнозування ривка потрібне лише на окремих інтервалах. Крім того, уточнені середні значення мають відрізнитися для різних регуляторів.

В оптимальному за швидкодією перехідному процесі входження в ковзний режим регулятора R_2 відбувається в момент часу t_3 після одного ($N - i = 3 - 2 = 1$) одиничного перемикання, в момент t_3 (характерна точка \mathbf{X}^{21}), тому для його синтезу необхідне максимально точне значення ривка на інтервалі $t_2 - t_3$. Ця задача отримала вичерпне розв'язання в роботах [13], [14] для релейної системи керування швидкістю. Оскільки в позиційному електроприводі регулятори R_2, R_3 каскаду (2) утворюють з частиною об'єкта керування (1), описуваною другим та третім рівняннями, підсистему регулювання швидкості, результати робіт [13], [14] є застосовними до цієї підсистеми у незмінному вигляді для розрахунку коефіцієнта зворотного зв'язку за формулою (3). Лінійна апроксимація експоненціальної діаграми ривка та подальша її заміна еквівалентною сталою величиною (рис. 3) дозволяє обґрунтувати прогнозоване значення ривка

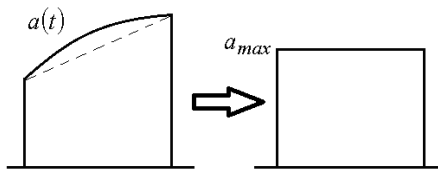


Рис. 3. Обґрунтування еквівалентної діаграми ривка

$$a_{max} = \frac{c}{2JL} \cdot (2u_{max} + R \cdot i_{max} + c(2\omega_{max} - \omega_1)), \quad (9)$$

в якому при обчисленні $\omega_1 = 0,5\epsilon_{max}^2 / a_{max}$ величина (8) використовується як перше наближення a_{max} . Слід зауважити, що використання при обчисленні (9) значень параметрів J, L, R, c , які отримані шляхом оцінювання в реальному часі, збільшує ефективність прогнозу порівняно з розрахунком, що ґрунтується на паспортних даних електропривода. Такий підхід стає можливим, завдяки застосуванню сучасних методів ідентифікації електромеханічних систем [16], що реалізуються у фоновому режимі, не впливаючи на швидкодію контролера.

Розглянемо застосування уточненого прогнозування ривка при синтезі регулятора положення R_1 , входження якого у ковзний режим відбувається в момент часу t_7 після двох ($N - i = 3 - 1 = 2$) одиничних перемикань в моменти t_4, t_6 . Роль двох коефіцієнтів зворотних зв'язків (4) у формуванні цих перемикань є різною. Перше перемикання відбувається в момент t_4 при нульовому значенні прискорення (характерна точка \mathbf{X}^{11}), отже його визначає лише значення $K_{\phi\omega}$. Оскільки до проміжку часу між цим перемиканням і виникненням ковзання $t_4 - t_7$ входять два інтервали сталості ривка $t_4 - t_5$ та $t_6 - t_7$, вони обидва повинні розглядатися при визначенні a_{max} , необхідного для розрахунку $K_{\phi\omega}$ згідно з (4). Друге перемикання в момент t_6 (характерна точка \mathbf{X}^{12}) формується більшою мірою під впливом зворотного зв'язку за прискоренням, яке в цей час є максимальним, отже для величини $K_{\phi\epsilon}$ в (4) визначальним є a_{max} , знайдене на інтервалі $t_6 - t_7$. При формуванні виразів для значень ривка в моменти t_4, t_5, t_6, t_7 слід спиратись на розрахункові діаграми (рис. 1), враховуючи чітку кореляцію між величинами i та ϵ , а також u та a . Беручи до уваги систему рівнянь (1), отримаємо

$$a_4 = \frac{c}{JL} \cdot (-u_{max} - 0 - c \cdot \omega_{max}), a_5 = \frac{c}{JL} \cdot (-u_{max} + R \cdot i_{max} - c \cdot \omega_{max} + c \cdot \omega_1),$$

$$a_6 = \frac{c}{JL} \cdot (u_{max} + R \cdot i_{max} - c \cdot \omega_1), a_7 = \frac{c}{JL} \cdot (u_{max} - 0 - 0).$$
(10)

Виконавши усереднення значень (10) на границях інтервалу $t_6 - t_7$, отримаємо прогнозований рівень обмеження ривка a_{max} для розрахунку $K_{\phi\epsilon}$

$$a_{max6-7} = \frac{c}{2JL} \cdot (2u_{max} + R \cdot i_{max} - c \cdot \omega_1).$$
(11)

Для розрахунку $K_{\phi\omega}$ слід виконати усереднення значень a_{max4-5} та a_{max6-7} , взятих за модулем, оскільки ривок на цих інтервалах має різні знаки. З врахуванням (10) маємо

$$a_{max4-5} = -\frac{c}{2JL} \cdot (2u_{max} - R \cdot i_{max} + c(2\omega_{max} - \omega_1)),$$

тоді

$$a_{max4-7} = \frac{c}{JL} \cdot (u_{max} + c(\omega_{max} - \omega_1)).$$
(12)

На рис. 4 наведені перехідні процеси в системі керування (1), (2), синтезованій методом $N-i$ перемикань. На рис. 4, а показано динаміку електропривода при базовому способі визначення ривка за формулою (4), а на рис. 4, б показано роботу системи, синтезованої при уточненому прогнозуванні ривка з використанням формул (9), (11), (12). Для порівняння на рис. 4, а виділені «проблемні» фрагменти діаграм, для яких на рис. 4, б спостерігається поліпшення форми внаслідок застосування результатів дослідження. Ефект від уточненого прогнозування ривка виражається у зменшенні дотягувань в контурах стабілізації швидкості та положення, що — в підсумку — призводить до скорочення тривалості позиціонування, тобто в наближенні швидкодії системи керування до оптимальної. В наведеному прикладі тривалість перехідного процесу скорочується більш як на 10 % виключно за рахунок параметричної корекції перебігу перехідних процесів.

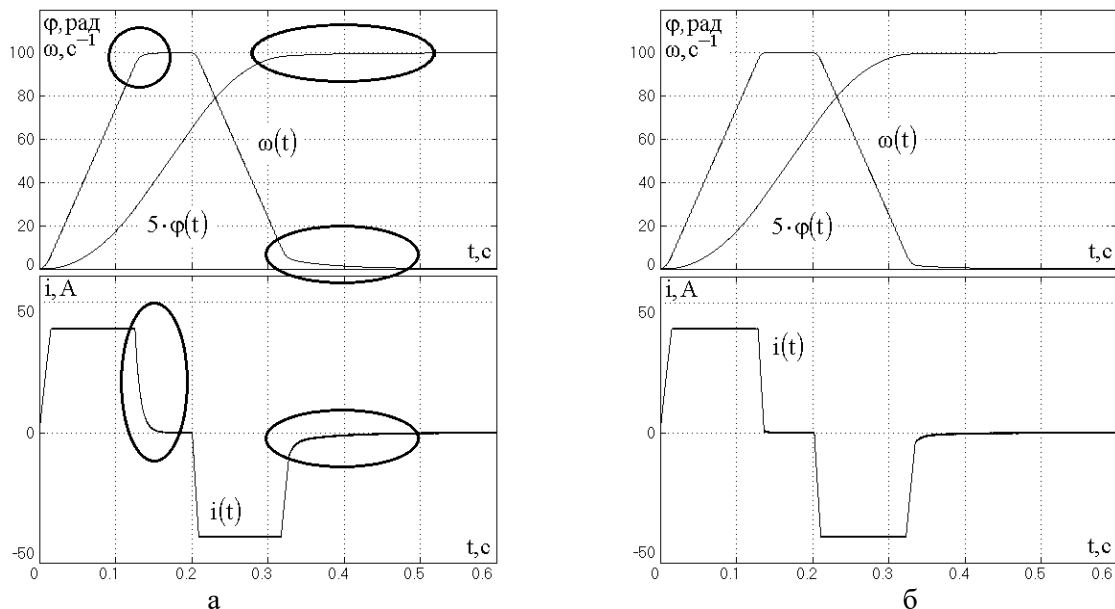


Рис. 4. Перехідні процеси позиційного електропривода

Висновки

Уточнений прогноз ривка дозволяє значною мірою компенсувати вплив невиконання спрощувальних допущень методу $N-i$ перемикачів на роботу позиційного електропривода та наблизити динаміку системи керування до оптимальної за швидкодією, не перевищуючи максимально допустимі рівні проміжних координат. Цей результат досягнуто шляхом обґрунтування додаткових формул для попереднього розрахунку рівнів обмеження, він не потребує модифікації аналітичної частини методу синтезу, яка стосується техніки прогнозу оптимальної траєкторії та виводу формул коефіцієнтів зворотних зв'язків. Інтеграція отриманих у ході дослідження розрахункових виразів до алгоритмів синтезу релейних систем оптимального та модального керування електроприводом відкриває перспективи практичного впровадження результатів роботи.

Список використаної літератури

1. Crowder R., *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*. Butterworth-Heinemann, 2019. ISBN: 9780081028841
2. Blondin M. *Controller Tuning Optimization Methods for Multi-Constraints and Nonlinear Systems*. Springer, 2021. 101 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64541-0>
3. Yamaguchi T., Hirata M. and Pang JCK. *High-speed precision motion control*. CRC press, 2017. ISBN: 9781138071605
4. Incremona G. P., Ferrara A. and Utkin V. I., "Sliding Mode Optimization in Robot Dynamics With LPV Controller Design," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6, 2022, pp. 1760–1765. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3133362>
5. Utkin V., Poznyak A., Orlov Y., Polyakov A. *Road Map for Sliding Mode Control Design*. Springer Nature, Switzerland, 2020. 127 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41709-3>
6. Voliansky R., Kuznetsov V., Pranolo A., Fatimah Y. A., Amri I. and Sinkevych O., "Sliding Mode Control for DC Generator with Uncertain Load," 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 313–316. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235446>
7. Lobur M., Shcherbovskykh S., Kozlowski K. and Pazderski D., "Experimental Analysis of Rotary Speed Observers for Electric Drive with Cascaded Control System," 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, Ukraine, 2018, pp. 125–128. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526615>
8. Sushchenko O., Bezkorovainyi Y. and Salyuk O., "Two-Contour System for Stabilization of Equipment for Moving Vehicles," 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 54–59. <https://doi.org/10.1109/MSNMC61017.2023.10328966>
9. Tytiuk V., Chorni O., Mrachkovskiy D., Tryputen M. and Kuznetsov V., "Mathematical model of the closed-loop system of excavator bucket positioning," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, (1), P. 107–114. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/107>
10. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L. and Levant A., *Sliding Mode Control and Observation*. Control Engineering. Birkhäuser, New York, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4893-0>
11. Дерещ О. Л., Садовой О. В. Метод $N-i$ перемикачів у задачах оптимізації за швидкодією : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с. ISBN: 978-966-175-215-2
12. Voliansky R., Kluev O., Sadovoi O., Shramko I., Sokhina Y. and Volianska N., "Anti-swing Control System for the One Class of Underactuated Dynamic Objects," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240849>
13. Дерещ О.Л., Садовой О.В., Міняйло Ю.О., Дерещ С.О. Підвищення точності прогнозування ривка при оптимізації за швидкодією системи керування електроприводом. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2023. № 1(42). С. 101–108. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.42.2023.12>

14. Derets O., Sadovoi O., Derets S. Synthesis of the electrical drive control system by the N–i switching method with refined jerk prediction. *Mathematical Modeling*. Kamianske, 2023. №1(48), pp.123–131. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(48\)2023.280781](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280781)
15. Zhulkovskii O.A., Panteikov S.P., Zhulkovskaya I.I. Information-modeling forecasting system for thermal mode of top converter lance. *Steel Transl.* 2022. Vol. 52. No. 5. P. 495–502. <https://doi.org/10.3103/S0967091222050138>
16. Zhulkovskiy O., Zhulkovska I., Kurliak P., Sadovoi A., Ulianovska Yu., Vokhmianin H. Using asynchronous programming to improve computer simulation performance in energy systems. *Energetika*. 2025. Vol. 71. No. 1. P. 23–33. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.2>

PREDICTING THE JERK VALUE OF AN ELECTRIC DRIVE IN OPTIMIZATION PROBLEMS FOR RELAY CONTROL SYSTEMS

Abstract

The relevance of the study is due to the need to develop the theory of optimal control taking into account the level of modern development of technical systems. In scientific and applied practice, a number of new approaches to the synthesis of control systems have been formed. One of them is the N–i switching method, which attracts attention due to its algorithmic simplicity and relatively simple implementation.

The generalization of the mathematical apparatus of the specified method for arbitrary order systems is based on the use of certain idealized assumptions, which lead to the limitation of the effectiveness of its use to real electromechanical control objects. Therefore, the purpose of this work is to refine the N–i switching method, aimed at increasing the performance of the relay control systems synthesized with its application.

To achieve this goal, the work involved the formation of a fragment of the transition trajectory, its equivalent transformation into a rectangular diagram, the averaging of the jerk at separate time intervals, which became the basis for calculating the refined parameters of relay controllers, and a comparative analysis of the functioning of the positional electric drive control systems at various settings. Numerical experiments confirmed the improvement of the dynamic characteristics of the system.

The result of the work is the expansion and refinement of the mathematical apparatus of the N–i switching method, focused on the optimization problems of third-order systems, which contributes to increasing the efficiency of control of electromechanical systems. The combination of the obtained formulas with the algorithms for the synthesis of relay systems for optimal and modal control of the electric drive is a promising implementation of the research results.

References

- [1] Crowder R. (2019). *Electric Drives and Electromechanical Systems: Applications and Control*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780081028841
- [2] Blondin M. (2021). *Controller Tuning Optimization Methods for Multi-Constraints and Nonlinear Systems*. Springer. 101. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64541-0>
- [3] Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. (2017). *High-speed precision motion control*. CRC press. ISBN: 9781138071605
- [4] Incremona G. P., Ferrara A. and Utkin V. I. (2022). "Sliding Mode Optimization in Robot Dynamics With LPV Controller Design," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6. 1760–1765. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2021.3133362>
- [5] Utkin V., Poznyak A., Orlov Y., Polyakov A. (2020). Road Map for Sliding Mode Control Design. Springer Nature, Switzerland. 127 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41709-3>
- [6] Voliansky R., Kuznetsov V., Pranolo A., Fatimah Y. A., Amri I. and Sinkevych O. (2020). "Sliding Mode Control for DC Generator with Uncertain Load," 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 313–316. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235446>

- [7] Lobur M., Shcherbovskykh S., Kozłowski K. and Pazderski D. (2018). "Experimental Analysis of Rotary Speed Observers for Electric Drive with Cascaded Control System," *2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, pp. 125–128. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526615>
- [8] Sushchenko O., Bezkorovainyi Y. and Salyuk O. (2023). "Two-Contour System for Stabilization of Equipment for Moving Vehicles," *2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, pp. 54–59. <https://doi.org/10.1109/MSNMC61017.2023.10328966>
- [9] Tytiuk V., Chornyi O., Mrachkovskiy D., Tryputen M. and Kuznetsov V. (2023). "Mathematical model of the closed-loop system of excavator bucket positioning," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), pp. 107–114. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/107>
- [10] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation*. Control Engineering. Birkhäuser, New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-8176-4893-0>
- [11] Derets O.L., Sadovoy O.V. (2021) *Metod N–i peremykan u zadachakh optymizatsiyi za shvydkodiyeyu [N–i switching method in speed optimization tasks]*. Kamyanske: DSTU [in Ukrainian]. ISBN: 978-966-175-215-2
- [12] Voliansky R., Kluev O., Sadovoi O., Shramko I., Sokhina Y. and Volianska N. (2020). "Anti-swing Control System for the One Class of Underactuated Dynamic Objects," *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240849>
- [13] Derets O., Sadovoi O., Miniailo Y., Derets S. (2023). Pidvyshchennya tochnosti prohnozuvannya ryvka pry optymizatsiyi za shvydkodiyeyu systemy keruvannya elektropryvodom [Increasing the accuracy of jerk prediction when optimizing the speed of the electric drive control system]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scientific works of DSTU*, 1 (42), 101–108. Kamyanske: DDTU [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.42.2023.12>
- [14] Derets O., Sadovoi O., Derets S. (2023). Synthesis of the electrical drive control system by the N–i switching method with refined jerk prediction. *Mathematical Modeling*. Kamianske. №1(48), pp.123–131. [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(48\)2023.280781](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280781)
- [15] Zhulkovskii O. A., Panteikov S. P., Zhulkovskaya I. I. (2022). Information-modeling forecasting system for thermal mode of top converter lance. *Steel Transl.* Vol. 52. No. 5. P. 495–502. <https://doi.org/10.3103/S0967091222050138>
- [16] Zhulkovskyi O., Zhulkovska I., Kurliak P., Sadovoi A., Ulianovska Yu., Vokhmianin H. (2025). Using asynchronous programming to improve computer simulation performance in energy systems. *Energetika*. Vol. 71. No. 1. P. 23–33. <https://doi.org/10.6001/energetika.2025.71.1.2>

Надійшла до редколегії 05.03.2026

Прийнята після рецензування 20.03.2026

Опублікована 26.03.2026