

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.12

УДК 62-83

Дерець О.Л.¹, к.т.н., доцент, ORCID:0000-0001-6432-2592, e-mail: ald_dstu@i.uaСадовой О.В.², д.т.н., професор, ORCID:0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.netМіняйло Ю.О.¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освітиДерець С.О.¹, здобувач третього (доктори філософії) рівня вищої освіти¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське²Національний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро**Derets Oleksandr**¹, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics**Sadovoi Oleksandr**², Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electric Drive**Miniailo Yulian**¹, master degree student**Derets Serhiy**¹, graduate student¹Dniprovsky State Technical University, Kamianske²Dnipro Polytechnic National University, Dnipro

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РИВКА ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Актуальність роботи зумовлена необхідністю адаптації методів теорії оптимального керування до можливостей їх сучасної технічної реалізації. Метою дослідження є підвищення якості перехідних процесів релейних систем керування швидкістю електропривода, синтезованих методом N–i перемикачів. Деталізація діаграм оптимальних за швидкодією перехідних процесів електропривода забезпечила підвищення точності прогнозування ривка. Використання запропонованого способу визначення обмежень координат дозволяє синтезувати систему керування швидкістю, яка здійснює рух за оптимальною траєкторією. Перспектива практичного застосування результатів роботи полягає в їх інтеграції в адаптивні алгоритми параметричного синтезу цифрових контролерів.

Ключові слова: релейна система керування; метод N–i перемикачів; перехідний процес; оптимальність за швидкодією.

The relevance of the work is due to the need to adapt the methods of the optimal control theory to the possibilities of their modern technical implementation. The purpose of the study is to improve the quality of transients of relay velocity control systems of an electric drives, synthesized by the N–i switching method. The detailing of the diagrams of the speed-optimized transient of the electric drive ensured an increase in the accuracy of jerk prediction. The use of the proposed method of determining coordinate constraints allows synthesizing the velocity control system that adjusts the transient according to the optimal trajectory. The prospect of practical application of the results of the work lies in their integration into adaptive algorithms for parametric synthesis of digital controllers.

Keywords: sliding mode control system; N–i switching method; transient; optimality in speed.

Постановка проблеми

Оптимальність за швидкодією є однією з основних технічних характеристик, які повинні бути реалізовані при проектуванні сучасних систем керування електроприводами. Ця вимога висувається навіть до найпростіших конфігурацій електромеханічних систем, до яких належать системи регулювання швидкості електроприводів з жорстким кінематичним ланцюгом [1]. Причому вона може бути продиктована як умовами функціонування самого механізму, так і бажаними технічними характеристиками зовнішніх контурів регулювання багатоконтурних систем, яким підпорядкована підсистема регулювання швидкості [2]. Оптимізація за швидкодією ґрунтується на прогнозі траєкторій руху при застосуванні будь-яких відомих методів [3, 4, 5], тому вкрай актуальним є гарантування достовірності такого прогнозування. З цієї точки зору

системи підпорядкованого регулювання виглядають зручним об'єктом для оптимізації, оскільки стабілізація проміжних координат на відомих рівнях, забезпечувана внутрішніми контурами, є вагомою передумовою відтворюваності розрахункового руху, що у свою чергу робить його прогнозованим з високою точністю [6]. Але ривок належить до величин, стабілізація яких для більшості механізмів не застосовується через порівняно слабкий вплив характеру його зміни на перехідні процеси в цілому [7]. Такий підхід до структурної реалізації прецизійних систем вимагає окремих заходів з уточнення розрахункових значень ривка в задачах оптимізації за швидкодією [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Автоматизовані електроприводи функціонують в умовах широкого спектру параметричних та координатних збурень [1], низька чутливість до яких є структурною властивістю релейних систем [2]. Більше того, структура систем розривного керування повною мірою сприяє їх оптимізації за точністю та швидкодією [3, 4]. Основним режимом роботи релейних регуляторів є ковзний режим, який і надає системам розривного керування названі вище переваги [5]. Цей режим реалізується сучасними силовими перетворювачами навіть в електроприводах великих потужностей, що спонукає до застосування релейних регуляторів і вдосконалення методів їх синтезу. Ковзний режим відповідає квазіусталеному стану систем, тоді як перехідні процеси відбуваються при виникненні одиничних перемикачів [6—8]. Узгодження таких перемикачів в каскадно-з'єднаних регуляторах шляхом прив'язки до характерних точок прогнозованої оптимальної за швидкодією перехідної траєкторії є основною ідеєю методу N-і перемикачів [9]. Цей метод забезпечує синтез систем оптимального керування в умовах обмеження проміжних координат без застосування нелінійних функцій перемикачів. Йому властива простота математичного апарату [10, 11], ґрунтована на низці спрощувальних допущень, але невиконання окремих з них унеможливує реалізацію перехідних процесів із заданими показниками якості [12], що спонукає до подальшого вдосконалення цього методу [13, 14].

Формулювання мети дослідження

До фундаментальних допущень методу N-і перемикачів [6] належить сталість ривка на інтервалах сталості напруги силового перетворювача під час наростання та спадання струму. Воно є обґрунтованим для переважної більшості режимів функціонування електромеханічних систем завдяки малості частки інтервалів сталості напруги у загальній тривалості перехідних процесів [7, 8]. Це дозволяє вважати повторюваними ділянки розрахункових траєкторій, узагальнити процедуру синтезу параметрів [10, 11] та отримати його результати в аналітичній формі [9]. Але таке допущення абсолютно справедливе лише для нейтрально-стійких динамічних об'єктів. В режимах з трикутними діаграмами прискорення електропривода [13, 14] воно не виконується на жодному проміжку часу через дію внутрішніх зворотних зв'язків об'єкта керування. Даний факт зменшує ефективність застосування методу N-і перемикачів [12—14]. В низці робіт було запропоновано заходи з компенсації відхилень реальних траєкторій синтезованих систем від розрахункових, але їх ефект є частковим [9, 13, 14]. Тому метою даного дослідження є створення методики уточнення прогнозованого значення ривка електропривода та виконання чисельних експериментів для перевірки її дієвості у контексті методу N-і перемикачів.

Виклад основного матеріалу

Система диференціальних рівнянь динаміки електропривода постійного струму зі швидкодіючим транзисторним інвертором в якості силового перетворювача [1] має вигляд

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

де i — струм якоря, i_c — статичний струм, u — напруга живлення якорного кола, ω — кутова швидкість обертання вала двигуна, L , R — індуктивність та активний опір якорного кола, $c = k\Phi$ — коефіцієнт, який є константою при сталості магнітного потоку, J — момент інерції електромеханічної системи, який визначається сумою моментів інерції якоря та приведених до

вала двигуна моментів інерції редуктора й робочого органа, $p = \frac{d}{dt}$ — оператор диференціювання за часом.

Відповідно до методу N-ї перемикачів для побудови оптимальної за швидкодією системи керування динамічним об'єктом (1) необхідно застосувати [9] каскад релейних регуляторів

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

де $u_{R\omega}, u_{R\varepsilon}$ — сигнали регуляторів швидкості та прискорення, ω, ε — відповідно кутові швидкість та прискорення вала двигуна, $K_{\omega\varepsilon}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку регулятора швидкості за прискоренням; індексами «max» позначено рівні обмеження координат стану; символом «*» позначено задані значення відповідних координат, як формованих регуляторами для підпорядкованих їм контурів, так і прикладеного до входу системи.

Результатом аналітичного розв'язання методом N-ї перемикачів [9] задачі синтезу параметрів релейних систем другого порядку є вираз коефіцієнта зворотного зв'язку

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

Процедура параметричного синтезу регуляторів (2) вимагає попереднього розрахунку рівнів обмежень прискорення ε_{max} та ривка a_{max} шляхом підстановки максимальних значень струму i_{max} та напруги u_{max} до рівнянь

$$\left. \begin{aligned} p\omega &= \varepsilon = \frac{c}{J} \cdot i \\ p\varepsilon &= a = \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot (u - R \cdot i - c \cdot \omega) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

незбуреного руху об'єкта керування (1). В базовому варіанті метода така підстановка передбачається при нульових рівнях внутрішніх зворотних зв'язків, що призводить до отримання розрахункових виразів

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

$$a_{max} = \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot u_{max}. \quad (6)$$

Формули (3), (5), (6) належать до уніфікованих, тобто можуть бути використані при синтезі систем більш високих порядків [9]. Застосування формули (5) є обґрунтованим для систем з регуляторами (2) не лише в умовах

ідеального вільного ходу, оскільки система зі зворотним зв'язком за прискоренням є нечутливою до збурень. Але для формули (6) уніфікація досягається за рахунок наближеного її характеру, оскільки в ній закладено ігнорування внутрішніх зворотних зв'язків. Іншими словами, вона обґрунтована розповсюдженням перехідних діаграм (рис. 1, а) системи з нейтрально-стійким об'єктом на електромеханічні системи з будь-якою структурою. Тому для електроприводів зі структурою (1), (2), крім порушення допущення

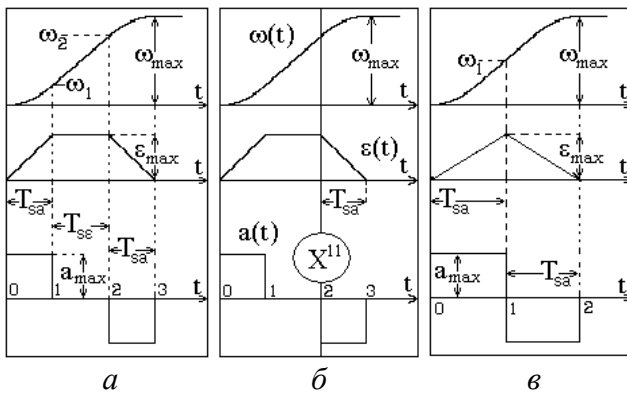


Рис. 1. Розрахункові діаграми системи другого порядку з нейтральним об'єктом керування

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

на будь-якому інтервалі сталості $u(t)$, не виконується також рівність

$$|a(t)| = a_{\max}. \quad (8)$$

Внаслідок таких розбіжностей реальної та прогнозованої (рис. 1) діаграм $a(t)$ на інтервалі 2—3 (рис. 1, *a, б*), тобто у проміжку часу між прогнозованим одиничним перемиканням регулятора R_{ω} в точці $X^{1,1}$ (рис. 1, *б*) і початком ковзного режиму в точці 3, прирости швидкості та прискорення у прогнозованому та реальному перехідних процесах дещо відрізняться. Але саме за співвідношенням цих приростів визначається [9] оптимальний параметр (3) регулятора R_{ω} . Тому в результаті налаштування системи керування електроприводом (1), (2) за формулами (5), (6), (3) формується перехідний процес, дещо відмінний від оптимального за швидкодією [12, 13]. Такий приклад наведено на рис. 2, *a*, де представлені результати моделювання для системи з параметрами й рівнями обмежень

$$R = 1 \text{ Ом}, c = 4 \text{ В} \cdot \text{с}, L = 0,1 \text{ Гн}, J = 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \omega_n = 50 \text{ с}^{-1}, i_n = 20 \text{ А}, u_n = 220 \text{ В}. \quad (9)$$

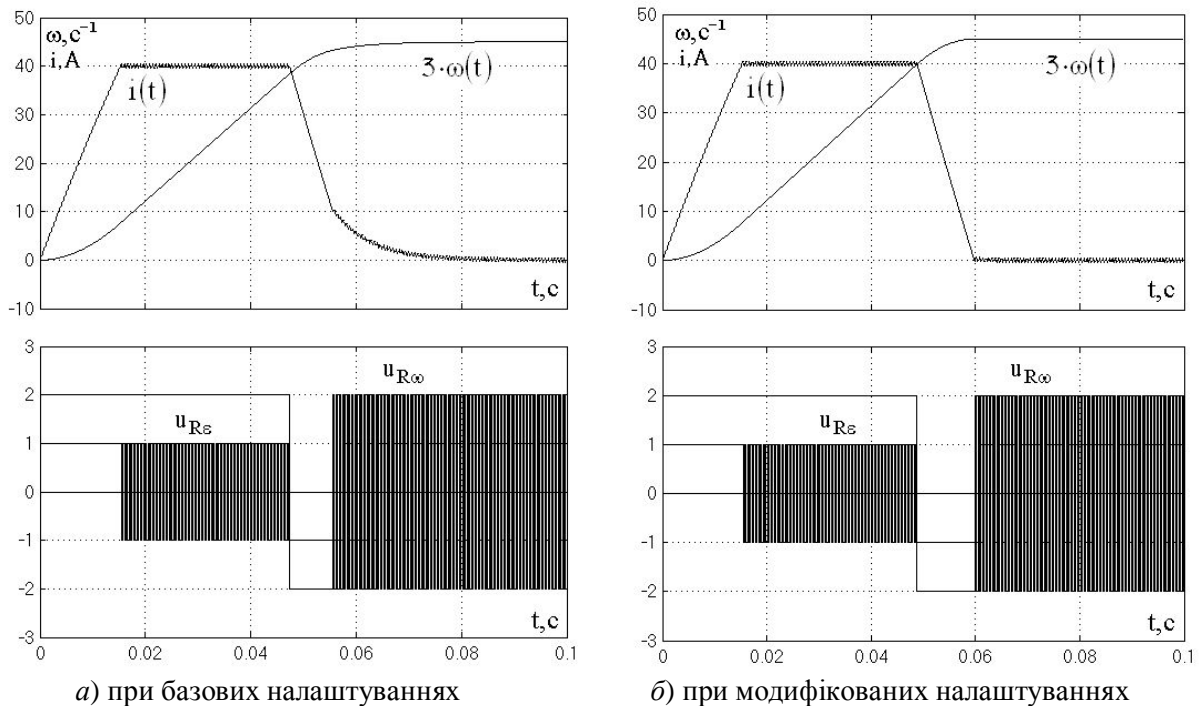


Рис. 2. Перехідні процеси релейної системи керування електроприводом

$$i_{\max} = 2 \cdot i_n, u_{\max} = 1,3 \cdot u_n, \quad (10)$$

для яких згідно з формулами (5), (6), (3) було отримано

$$\varepsilon_{\max} = 320 \text{ с}^{-2}, a_{\max} = 22880 \text{ с}^{-3}, \quad (11)$$

$$K_{\omega\varepsilon} = 0,007 \text{ с}. \quad (12)$$

Діаграми на рис. 2, *a* при заданій швидкості $\omega^* = \omega_{\max} = 0,3 \cdot \omega_n = 15 \text{ с}^{-1}$ явно демонструють дотягування при завершенні розгону через передчасне виникнення ковзного режиму R_{ω} .

Очевидною є неможливість вичерпного розв'язання проблеми невиконання допущення (7) в рамках структури регуляторів (2) методами параметричного синтезу. Але в математичному апараті метода N-ї перемикань можна наблизитися до виконання допущення (8) достатньо простим шляхом. Він полягає, по-перше, у врахуванні формулою розрахунку ривка всіх членів (рис. 3, *a*) другого рівняння системи (4), і, по друге, в усередненні розрахункових значень рив-

ка, отриманих на межах часового інтервалу $t_2 — t_3$ (рис. 3, б). В результаті замість формули (6) отримаємо вираз

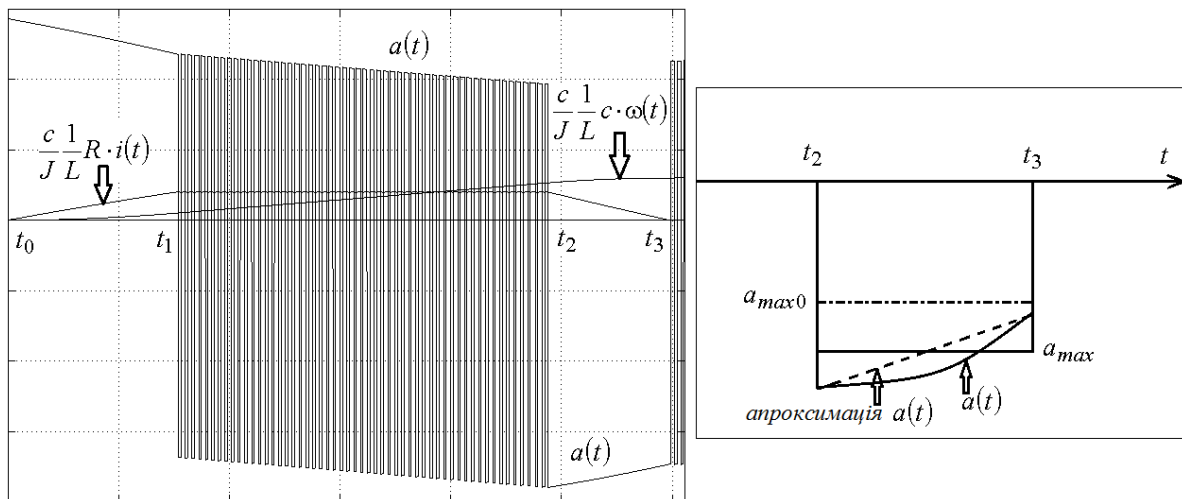
$$a_{max} = \left| \frac{a_{max}(t_2) + a_{max}(t_3)}{2} \right| = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot |u(t_2) - R \cdot i(t_2) - c \cdot \omega(t_2) + u(t_3) - R \cdot i(t_3) - c \cdot \omega(t_3)|. \quad (13)$$

Такий підхід відображає заміну форми діаграми $a(t)$ з криволінійної, якою вона є насправді (рис. 3) у системах керування (1), (2), на прямолінійну, як передбачено методом N-ї перемикачів. Визначення a_{max} згідно з виразом (13) передбачає еквівалентність заміни за величиною інтегралу від $a(t)$ на інтервалі сталості напруги, тобто рівність площ криволінійної трапеції та прямокутника під реальною та розрахунковою діаграмами ривка (рис. 3, б). Відзначимо, що ця заміна не є строго еквівалентною, оскільки усереднення в формулі (13) передбачає лінійну інтерполяцію криволінійної сторони трапеції (пунктир на рис. 3, б).

Знайдемо з врахуванням рис. 1 та рис. 3 значення

$$\begin{aligned} u(t_2) &= -u_{max}, i(t_2) = i_{max}, \omega(t_2) = \omega_2 = \omega_{max} - \omega_1, \\ u(t_3) &= -u_{max}, i(t_3) = 0, \omega(t_3) = \omega_{max}, \end{aligned} \quad (14)$$

де $\omega_1 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{max}^2}{a_{max}}$ — приріст швидкості (рис. 1, а) на інтервалах зміни прискорення [9].



а) реальний ривок та його невраховані складові

б) розрахункові діаграми ривка

Рис. 3. Часові діаграми ривка в оптимальній за швидкодією релейній системі керування електроприводом

Для визначення a_{max} за формулою (13) необхідно знати ω_1 , залежну від a_{max} згідно з виразом (14). Це логічне коло можна розірвати, використавши для розрахунку ω_1 попередньо знайдене згідно з формулою (6) значення a_{max} , яке позначимо a_{max0} :

$$a_{max0} = \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot u_{max}. \quad (15)$$

Підставою для цього є наближений характер обох формул (6), (13), серед яких формулу (6) можна вважати першим наближенням формули (13). Тому приймемо

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{max}^2}{a_{max0}}. \quad (16)$$

Виконавши підстановки формул (15) до (16) та (14) до (13), отримаємо уточнений вираз для визначення розрахункового ривка a_{max}

$$a_{max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{J} \cdot \frac{1}{L} \cdot (2u_{max} + R \cdot i_{max} + c(2\omega_{max} - \omega_1)). \quad (17)$$

Для режимів розгону з трикутною діаграмою прискорення (рис. 1, в) замість формул (15), (16) слід застосовувати розрахунковий вираз

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_{max}. \quad (18)$$

Зауважимо, що викладена методика уточненого прогнозування розрахункового ривка дозволяє врахувати статичне навантаження за рахунок підстановки відповідних значень $i(t_2)$, $i(t_3)$ у вираз (13), але таке вдосконалення вимагає введення до структури системи керування спостерігачів стану [15], здатних обчислювати статичний струм.

Застосувавши до системи керування електроприводом (1), (2) з даними (8), (9) розрахункові вирази (5), (17), (3), отримаємо модифіковані налаштування

$$\varepsilon_{max} = 320 c^{-2}, \quad a_{max} = 28922 c^{-3}, \quad (19)$$

$$K_{\omega\varepsilon} = 0,0055 c. \quad (20)$$

Діаграми такої системи на рис. 2, б при заданій швидкості $\omega^* = \omega_{max} = 0,3 \cdot \omega_n = 15 c^{-1}$ демонструють відсутність дотягування або перерегулювання при виникненні ковзного режиму регулятора швидкості R_ω . У розглянутому прикладі модифікація налаштувань на основі уточнення прогнозованого ривка дозволяє зменшити тривалість процесу розгону на 25 % порівняно з системою (рис. 2, а), яка має базові налаштування згідно з методом N-і перемикачів. Дана чисельна оцінка не є універсальною, скорочення тривалості регулювання корелюється з часткою інтервалів стабілізації ривка в загальній тривалості розгону.

Висновки

Запропонований спосіб підвищення точності розрахунку прогнозованого рівня ривка дозволяє підвищити ефективність застосування метода N-і перемикачів при оптимізації за швидкодією системи керування електроприводом. Його використання в складі математичного апарату цього метода синтезу зумовлює суттєве зменшення тривалості перехідного процесу, усуваючи необхідність застосування з даною метою додаткових калібрувальних діаграм [13]. Отриманий результат ґрунтується на деталізації прогнозованої ділянки оптимальної траєкторії системи керування електроприводом, тому не може бути безпосередньо розповсюджений на системи більш високого порядку. Викладена методика синтезу зв'яже налаштування регуляторів з величиною стрибка задавального впливу, тому перспективним напрямком її подальшого розвитку є інтеграція до алгоритмів [10, 11] адаптивних цифрових систем керування.

Список використаної літератури

1. Leonhard W. Control of Electric Drives. New York : Springer-Verlag, 2001. 460 p.
2. Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. High-speed precision motion control. CRC press, 2017. 324 p.
3. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматгиз, 1961. 392 с.
4. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. 624 с.
5. Емельянов С.В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
6. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В., Дерез А.Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами : монография. Днепропетровск : ДГТУ, 2011. 337 с.
7. Садовой А.В., Дерез А.Л. Ограничение рывка в системе управляемой преобразователь-двигатель при оптимизации по быстродействию. *Электромашиностроение и электрооборудование. Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Киев : Техника, 2006. С.64–65.

8. Садовой А.В., Дерез А.Л. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N–i переключений. *Вестник КГПУ*. Кременчуг, 2006. Вып. 3/2006 (38). С. 21–22.
9. Дерезь О.Л., Садовой О.В. Метод N–i перемикач у задачах оптимізації за швидкодією : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
10. Derets O., Derets H. Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240832.
11. Derets O., Sadovoi O., Derets H. Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems MEES 2021*, 2021. P.1–4.
12. Дерезь А.Л., Садовой А.В., Дерезь А.А. Моделирование режимов позиционирования оптимизированной по быстродействию релейной системы управления при изменении расчётной амплитуды напряжения. *Сборник научных трудов ДГТУ*. Каменское, 2019. Вып. 2 (35). С.55–59.
13. Дерезь О.Л., Садовой О.В., Дерезь Г.О. Дослідження динамічних режимів оптимізованої за швидкодією системи керування електроприводом в умовах зміни розрахункової амплітуди напруги. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2021. Вып.2 (39) С. 65–73.
14. Дерезь А.Л., Садовой А.В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстродействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N–i переключений. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика»*. Харків, 2019. № 9 (1334). С. 20–23.
15. Derets O., Sadovoi O. Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240852.

INCREASING THE ACCURACY OF JERK PREDICTION WHEN OPTIMIZING THE SPEED OF THE ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM

Abstract

The relevance of the work is due to the need to adapt the methods of the theory of optimal control to modern technical capabilities. The complexity of variational methods led to the creation of alternative means of optimization, which includes the N–i switching method. It differs in extreme simplicity, however, the generalization of the mathematical apparatus to an arbitrary order is implemented on the basis of simplifying assumptions, which reduces the effectiveness of the method applied to low-order systems. The purpose of this study is to improve the mathematical apparatus of the N–i switching method by bringing the settings of the controllers closer to the optimal ones on the basis of a refined calculation of the predicted transition trajectory. To achieve this goal, the following tasks were solved in the work: the construction of a fragment of the transition trajectory taking into account the action of the internal feedbacks of the electromechanical system is carried out; for the detailed diagram of the transient, which has the shape of a curvilinear trapezoid, a rectangular diagram equivalent in magnitude of the first integral over time is performed; the average value of the jerk on the interval of constancy of the voltage of the power converter is determined, and on this basis, the modified value of the feedback factor of the relay velocity controller is found; a comparative study of electric drive control systems with basic and modified settings was performed, confirming the effectiveness of the proposed solution. The result of the work is the supplement to the mathematical apparatus of the N–i switched method, focused on the optimization of second-order systems. Its implementation does not require the involvement of large additional resources and provides an improvement in the quality of transient processes. A promising direction for this study is the implementation of the proposed methodology in adaptive algorithms for setting up relay optimal control systems.

References

- [1] Leonhard W. (2001). *Control of Electric Drives*. New York : Springer-Verlag.
- [2] Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. (2017). *High-speed precision motion control*. CRC press.
- [3] Pontryagin, L.S., Boltyansky, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F. (1961). *Mate maticheskaya teoriya optimalnykh protsessov [Mathematical theory of optimal processes]*. Moscow: Fizmatgiz [in Russian].
- [4] Feldbaum, A.A. (1966). *Osnovy teorii optimalnykh avtomaticheskikh sistem [Foundations of the theory of optimal automatic systems]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- [5] Emelyanov, S.V. (1967). *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy [Automatic control system with a variable structure]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- [6] Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V., Sokhina, Yu. V., Derets A.L. (2011). *Releynyye sistemy optimal'nogo upravleniya elektroprivodami [Relay systems of optimal control of electric drives]*. Dneprodzerzhinsk: DSTU [in Russian].
- [7] Sadovoy, A.V., Derets, A.L. (2006). Ogranicheniye ryvka v sisteme upravlyayemyy preobrazovatel-dvigatel pri optimizatsii po bystrodeystviyu. [Restriction of the jerk in the voltage converter – motor control system when optimizing speed]. *Elektromashinostroyeniye i elektrooborudovaniye. Seriya: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Electric machine industry and electrical equipment. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice*, P. 64–65. Kiev: Tekhnika [in Russian].
- [8] Sadovoy, A.V., Derets, A.L. (2006). Ratsionalnoye ogranicheniye uskoreniya elektroprivodov, sinteziruyemykh metodom N–i pereklyucheniya [Rational limitation of acceleration of electric drives synthesized by the method of N–i switching]. *Vestnik KGPU – Bulletin of the KSPU*, 3/2006 (38), 21–22. Kremenchug: KGPU [in Russian].
- [9] Derets, O.L., Sadovoy, O.V. (2021) *Metod N–i peremykan u zadachakh optimizatsiyi za shvydkodiyeyu [N–i switching method in speed optimization tasks]*. Kamyanske: DSTU [in Ukrainian].
- [10] Derets, O., Derets, H. (2020). Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. P.1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240832.
- [11] Derets O., Sadovoi O., Derets H. (2021). Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems MEES 2021*. P.1–4.
- [12] Derets, A.L., Sadovoy, A.V., Derets, A.A. (2019). Modelirovaniye rezhimov pozitsionirovaniya optimizirovannoy po bystrodeystviyu releynoy sistemy upravleniya pri izmenenii raschetnoy amplitudy napryazheniya [Positioning modes simulation of optimized in time domain sliding mode control system when changing the calculated voltage amplitude]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scholarly papers of DSTU*, 2 (35), P. 55–59. Kamyanske: DSTU [in Russian].
- [13] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets H.O. (2021). Doslidzhennya dynamichnykh rezhymiv optimizovanoi za shvydkodiyeyu systemy keruvannya elektroprivodom v umovakh zminy rozrakhunkovoyi amplitudy napruhy [Study of dynamic modes of the speed-optimized electric drive control system under conditions of alter the design voltage amplitude]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scientific works of DDTU*, 2 (39), P. 65–73. Kamyanske: DDTU [in Ukrainian].
- [14] Derets, O.L., Sadovoy, O.V. (2019). Korrektsiya parametrov kvazioptimal'nykh po bystro-deystviyu releynykh sistem tret'yego poryadka, sintezirovannykh metodom N–i pereklyucheniya [Parameters correction of quasi-optimal in speed third-order sliding mode control systems synthesized by the N–i switching method]. *Vestnik NTU “KHPI”. Seriya: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of an automated electric drive. Theory and practice*, 9 (1334), P. 71–73. Kharkiv: NTU “KhPI” [in Russian].
- [15] Derets O., Sadovoi O. (2020). Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. P. 1–4. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240852.