

DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.11

УДК 62-83:681.513.5.

Дерець О.Л., к.т.н., доцент, ORCID:0000-0001-6432-2592, e-mail: ald_dstu@i.ua

Садовой О.В., д.т.н., професор, ORCID:0000-0001-9739-3661, e-mail: sadovoyav@ukr.net

Костенко В.І., здобувач третього (доктори філософії) рівня вищої освіти

Лобко Я.І., здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Білько Д.С., здобувач другого (магістерського) 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

Sadovoi Oleksandr, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics

Kostenko Volodymyr, postgraduate student

Lobko Yaroslav, master's degree student

Bilko Dmytro, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ВПЛИВ СТРУКТУРНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РЕЛЕЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЗА ШВИДКОДІЄЮ

Актуальність роботи зумовлена необхідністю визначення рекомендацій щодо вибору ефективних структурних рішень для релейних систем оптимального за швидкодією керування. Метою дослідження є оцінка спроможності різних структур електроприводів, що відрізняються складністю технічної реалізації за умов неповноти інформаційно-датчикової частини, до формування проектних оптимальних траєкторій системи керування положенням. Імплементация ковзних режимів релейних регуляторів та їх параметричний синтез методом N–i перемикань при застосуванні різних комбінацій спостерігачів похідних для обчислення канонічних координат надають системі керування позиційним електроприводом виключно високих експлуатаційних характеристик. Досліджені структури є придатними для програмної реалізації.

Ключові слова: система керування положенням; релейний регулятор; ковзний режим; спостерігач похідних; метод N–i перемикань.

The relevance of the work is due to the need to determine recommendations for the selection of effective structural solutions for relay systems of optimal speed control. The purpose of the study is to assess the ability of various structures of electric drives, which differ in the complexity of technical implementation under conditions of incompleteness of the information and sensor part, to form design optimal trajectories of the position control system. Implementation of sliding modes of relay controllers and their parametric synthesis by the N–i switching method when using various combinations of derivative observers for calculating canonical coordinates, provide the positional electric drive control system with exceptionally high operating characteristics. The studied structures are suitable for software implementation.

Keywords: position control system; relay controller; sliding mode; derivatives observer; N–i switching method.

Постановка проблеми

Типовою виконавчою ланкою систем керування положенням є електроприводи [1], яким притаманні несталість параметрів та дія навантажень з непередбачуваним характером зміни. Дієвим засобом компенсації параметричних і координатних збурень є застосування релейних регуляторів [2], які також здатні забезпечити електроприводам граничну швидкодію. Крім того, релейні регулятори ефективно обмежують проміжні координати в динамічних режимах, оскільки вкрай просто поєднуються в каскад, в якому одночасно існує ковзний режим

лише в одному контурі керування. Ця обставина допускає значне спрощення параметричного синтезу каскадних систем завдяки його декомпозиції. Для релейних систем керування названі властивості є структурними, тобто такими, що найбільшою мірою визначаються саме розривним характером керуючого впливу регуляторів [3]. Проте вагомим факторами імплементації цих властивостей є методи параметричної оптимізації систем та структурної реалізації алгоритмів оптимального керування [4]. Нелінійний характер оптимальних за швидкодією траєкторій [5] унеможливує аналітичні оцінки ефективності поєднання цих методів, що робить актуальним пошук таких оцінок емпіричним шляхом.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Метод $N-i$ перемикачів, призначений для синтезу каскадно-підпорядкованих релейних систем керування, забезпечує їх параметричну оптимізацію за швидкодією при заданих обмеженнях канонічних координат [6], тобто розв'язує цю задачу в її типовій постановці [4]. При цьому досягнення граничної точності покладається на структурні рішення [7], які забезпечують максимальне наближення сигналів зворотних зв'язків за проміжними координатами до похідних похибки керування [8, 9]. Для позиційних електроприводів з безінерційним силовим перетворювачем, які описуються системою диференціальних рівнянь третього порядку ($N=3$), такими координатами є швидкість та прискорення робочого органу [10]. Їх обчислення вимагає побудови спостерігачів першої та другої похідних [9, 11], які, по-перше, за складністю реалізації сумірні із керуючою частиною системи, тобто каскадом регуляторів, по-друге, збільшують порядок системи керування, чим загострюють проблему забезпечення їх стійкості [3], і, по-третє, вносять в динаміку системи власні похибки, які є критичними для релейних систем через специфіку ковзних режимів [12]. Названі обставини спонукають до уникнення побудови систем керування електроприводами зі спостерігачами повного порядку у випадках, коли вимоги до їхніх статичних властивостей можна забезпечити за більш простих способів обчислення сигналів зворотних зв'язків [13]. До таких способів належать безпосереднє вимірювання координат електромеханічної системи та їх одноразове диференціювання з використанням спостерігачів неповного порядку [14]. Недоліки таких компромісних структурних рішень в частині впливу на величину похибок регулювання, а також обмеження на їх застосування в складі високоточних систем керування добре відомі, оскільки піддаються аналізу [6] на основі рівнянь, що описують статичні та квазістатичні режими.

Формулювання мети дослідження

Системи керування, всі або частина регуляторів яких є релейними, формують динамічні режими з обмеженнями проміжних координат не лише завдяки ковзним режимам [5]. На перебіг перехідних процесів найбільш вагомий вплив чинять одиничні перемикання регуляторів, які чергуються з інтервалами насичення, і саме ці стани підлягають точному розрахунку при оптимізації за швидкодією [6]. Але відмінності варіантів структурної реалізації електроприводів вносять в їх реальний рух певні відхилення від прогнозованих станів [11]. Метою дослідження є оцінка впливу способів обчислення сигналів зворотних зв'язків на спроможність систем керування положенням до відтворення розрахункових оптимальних за швидкодією траєкторій.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо позиційний електропривод, об'єкт керування якого описано системою диференціальних рівнянь [5]

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

де $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ — параметри електропривода, побудованого на основі двигуна постійного струму, φ — кутове положення робочого органу, ε, ω — його кутові прискорення та швидкість,

a — величина кутового ривка, що є пропорційною напрузі якірного кола u , i — струм якірного кола, $i_c = M_c / c$ — струм, пропорційний моменту статичного навантаження M_c .

Застосування методу $N-i$ перемикачів [6], створеного для параметричної оптимізації каскадно-підпорядкованих релейних систем, передбачає застосування регуляторів, взаємодія яких описується системою рівнянь

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

де $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, u_{max}$ — амплітуди керуючих впливів регуляторів, що дорівнюють рівням обмеження відповідних координат, $K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}, K_{\omega\varepsilon}$ — параметри, які є метою синтезу.

Подвійне маркування регуляторів вказує на регульовану координату або на номер в порядку від входу системи. Позначка «*» в системі рівнянь (2) і далі вказує на те, що величини є заданими значеннями відповідних змінних. Вона застосовується як для сформованих регуляторами завдань, о надходять до підпорядкованих їм контурів керування, так і для вхідного задавального впливу.

Результатом параметричної оптимізації за швидкодією системи (2) методом $N-i$ перемикачів [5, 6] є вирази для коефіцієнтів зворотних зв'язків

$$K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{max}}{2 \cdot \varepsilon_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{max}}{4 \cdot a_{max}} + \frac{\varepsilon_{max}^2}{12 \cdot a_{max}^2}, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{max}}{2 \cdot a_{max}}. \quad (3)$$

Вони мають вигляд аналітичних функцій рівнів обмеження координат $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, a_{max}$ і дозволяють розрахувати такі значення параметрів каскаду (2), які забезпечать узгоджену роботу його регуляторів в режимі одиночних перемикачів, що передують виникненню ковзного режиму. В оптимальному за швидкодією перехідному процесі відбувається $N-i$ таких перемикачів, де i — номер регулятора.

Виконаємо дослідження перехідних процесів на прикладі електромеханічної системи з параметрами

$$i_H = 18,47 \text{ А}, u_H = 220 \text{ В}, \omega_H = 46,44 \text{ с}^{-1}, L = 0,023 \text{ Гн}, J = 0,159 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, R = 0,89 \text{ Ом}, c = 4,37 \text{ В} \cdot \text{с}, k_p = 1 \quad (4)$$

та рівнями обмеження координат

$$\omega_{max} = \omega_H, i_{max} = 2 \cdot i_H, u_{max} = 1,3 \cdot u_H. \quad (5)$$

Підставивши значення (5) у рівняння незбуреного руху об'єкта керування (1), в яких не взяті до уваги внутрішні зворотні зв'язки

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

отримаємо рівні обмеження канонічних координат системи

$$\omega_{max} = 46,44 \text{ с}^{-1}, \varepsilon_{max} = 1000,6 \text{ с}^{-2}, a_{max} = 406060 \text{ с}^{-3}. \quad (7)$$

Застосувавши формули (3) до величин (7), отримаємо значення коефіцієнтів

$$K_{\varphi\omega} = 0,024468 \text{ с}, K_{\varphi\varepsilon} = 0,00002914 \text{ с}^2, K_{\omega\varepsilon} = 0,0008801 \text{ с}, \quad (8)$$

які з врахуванням окремих значень рівнів обмеження з (5) та (7) належать до параметрів каскаду (2). На цьому параметричний синтез системи керування (1), (2) є завершеним.

Оцінимо здатність системи керування (1), (2) до формування оптимальних за швидкодією процесів. Технічно найпростіший варіант її структурної реалізації полягає в замиканні так званих жорсткими зворотними зв'язками за безпосередньо вимірюваними координатами електродвигуна i, ω [5]. Для цього в рівняннях (2) здійснюється заміна змінної

$$\varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} i. \quad (9)$$

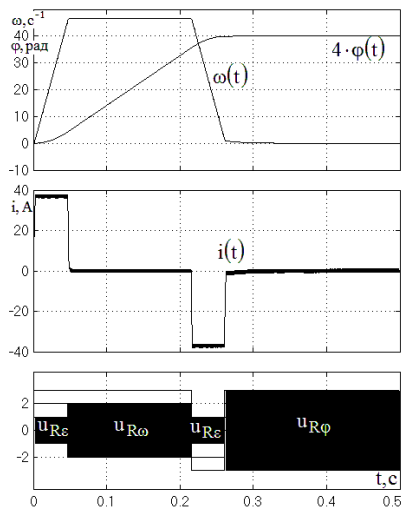


Рис. 1. Динаміка позиційного електропривода з жорсткими зворотними зв'язками

В умовах незбуреного руху система керування (1), (2), (9) формує оптимальний за швидкодією перехідний процес, часові діаграми якого наведені на рис. 1. Зауважимо, що у цьому дослідженні регулятори (2) мають гістерезисні характеристики, які формують пульсації струму з амплітудою $0,02i_{max}$, обмежуючи частоту ковзних режимів. Тим не менш, діаграми сигналів регуляторів зливаються через високу кількість перемикачів.

З прикладенням постійно діючого моменту опору система керування з жорсткими зворотними зв'язками стає неспроможною відтворити розрахункові траєкторії (рис. 2, а). Зміна знаку статичного моменту не впливає принципово на втрату оптимальності за швидкодією, хоча викривлені відносно оптимальних перехідні діаграми мають дещо іншу форму (рис. 2, б). Зокрема, замість дотягування система позиціонується з перерегулюванням. Так само руйнівним щодо оптимальності за швидкодією є вплив параметричних збурень. Діаграми позиціонування при збільшенні моменту інерції електропривода у 1,5 рази наведені на рис. 2, в. Сигнали регуляторів на рис. 2 демонструють зсув моментів їх перемикачів відносно оптимального процесу.

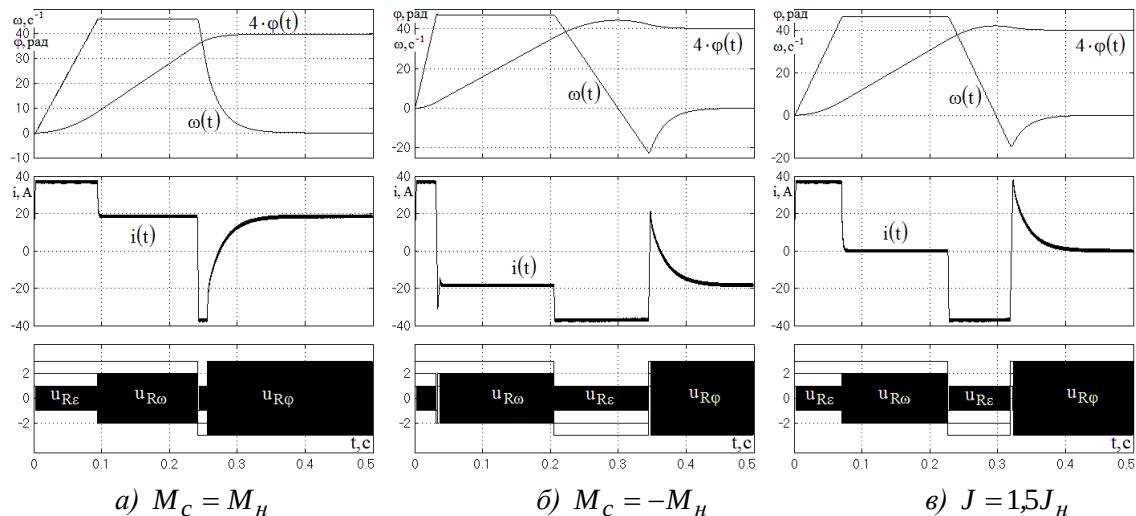


Рис. 2. Динаміка позиційного електропривода з жорсткими зворотними зв'язками в умовах дії координатних та параметричних збурень

Недостатність структурного рішення з жорсткими зворотними зв'язками для задач забезпечення високої точності можна легко обґрунтувати аналітично [5, 6, 9] у випадку релейних систем, розглянувши рівняння ковзання регулятора положення

$$\varphi - \varphi^* + K_{\varphi\omega} \cdot \omega + K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon = 0 \quad (10)$$

з врахуванням підстановок (9) та умов існування усталеного режиму, отриманих з (1)

$$p\varphi = \omega = 0, \quad p\omega = \varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot (i - i_c) = 0. \quad (11)$$

Знайдена у такий спосіб аналітична оцінка статичної похибки не має прямого стосунку

до проблеми втрати оптимальності за швидкодією, але першопричина виникнення статичної похибки й викривлення перехідних траєкторій є однією, хоча її вплив на поведінку системи у статичних та динамічних режимах принципово відрізняється. Ця причина полягає у відхиленні сигналів зворотних зв'язків (9) від істинних значень канонічних координат системи [6] в умовах дії збурень будь якої природи, від сил опору до похибок давачів.

Формування ненульової статичної похибки відбувається через прагнення регулятора R_ϕ збалансувати рівняння рівноваги (10) при ненульових прискоренні або швидкості, визначених згідно з (9) за умов (11). Так, у розглянутому прикладі використовується зворотний зв'язок

$$\varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} i, \text{ але з умов (11) маємо } i - i_c \neq 0, \text{ отже } \phi - \phi^* \neq 0 \text{ згідно з (10).}$$

Формування системою (1), (2) оптимального за швидкодією перехідного процесу відбувається за рахунок забезпечення перемикачів регуляторів (2) в характерних точках оптимальної траєкторії, яка є прогнозованою в просторі канонічних координат. Цей результат досягається завдяки застосуванню методу $N-i$ перемикачів для розрахунку коефіцієнтів зворотних зв'язків. Але у випадку відмінності величин зворотних зв'язків від відповідних канонічних координат не відбуваються перемикачів регуляторів у характерних точках [6]. Навіть якщо реальна траєкторія системи не оминає окремі з цих точок, викривлені сигнали зворотних зв'язків не дозволяють регуляторам отримати об'єктивну інформацію і виконати своєчасні перемикачів, після чого відхилення руху від розрахункової траєкторії стає незворотним. Це не призводить до втрати системою стійкості, але зумовлює втрату оптимальності за швидкодією. Об'єктивним свідченням цього факту є невідповідність правилу $N-i$ перемикачів кількості одиничних перемикачів регуляторів (2) у досліджених перехідних процесах. Зауважимо, що на відміну від величини статичної похибки, ступінь відхилення від оптимальної траєкторії дуже складно оцінити аналітично через нелінійний характер перехідних траєкторій в умовах обмеження координат. Разом з тим, можна зробити окремі узагальнення щодо умов їх виникнення. Так, розбіжність реальної та розрахункової величини магнітного потоку чинить на динаміку системи вплив, аналогічний варіативності моменту інерції, оскільки так само впливає на значення параметричного коефіцієнта c/J в (9). Тоді як параметри якорного кола не впливають на результати застосування заміни змінних (9) в системі рівнянь (2), як і амплітуда напруги силового перетворювача.

Отже, в контексті забезпечення ефективності оптимізації за швидкодією практична рекомендація полягає в необхідності точного обчислення канонічних координат або, щонайменше, максимально точного наближення до них сигналів зворотних зв'язків. З ретельним врахуванням умов функціонування електропривода навіть розглянута вище структура з жорсткими зворотними зв'язками не може вважатися цілком безперспективною. Так, при стабільних параметрах двигуна дія сталого моменту опору з відомою наперед величиною може бути врахована при синтезі параметрів, що забезпечить для цього окремого випадку актуальність заміни (9). На рис. 3 наведені діаграми оптимального за швидкодією позиціонування системи керування (1), (2), (9), у якій рівень i_{max} збільшено порівняно з (5) на величину статичного струму $i_c = i_n$, яка враховує дію моменту опору, що дорівнює номінальному.

Структурне рішення системи (1), (2) з обчислювачем прискорення [8—9] забезпечує формування оптимального перехідного процесу при синтезі методом $N-i$ перемикачів без необхідності виконання великої кількості додаткових умов, вимагаючи одноразового диференціювання виміряної координати ω для імплементації заміни змінної

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon}, \quad (12)$$

де $\dot{\varepsilon}$ — прискорення, обчислене спостерігачем першого порядку.

Для задач стабілізації положення таку структуру можна вважати вичерпним розв'язком. На рис. 4, а та рис. 4, б наведені перехідні процеси системи (1), (2), (12) в умовах дії параметричного та координатного збурень відповідно, отримані при застосуванні ідеального диференціатора. В обох випадках часові діаграми свідчать про оптимальність системи за швидкодією. Зауважимо, що врахування динаміки спостерігача прискорення докладно розглянуто в роботах [9—10, 13]. Слід підкреслити, що динамічні властивості, аналогічні продемонстрованим на

рис. 4, забезпечують системі також зворотні зв'язки, отримані шляхом дворазового диференціювання [11, 12, 14] вимірної координати φ

$$\omega = \dot{\omega}, \quad \varepsilon = \ddot{\varepsilon}, \quad (13)$$

де $\dot{\omega}$, $\ddot{\varepsilon}$ — швидкість та прискорення, обчислені спостерігачем повного порядку.

Структурна реалізація (1), (2), (13) не потребує окремого вимірювання швидкості, але вимагає застосування більш складного спостерігача [11].

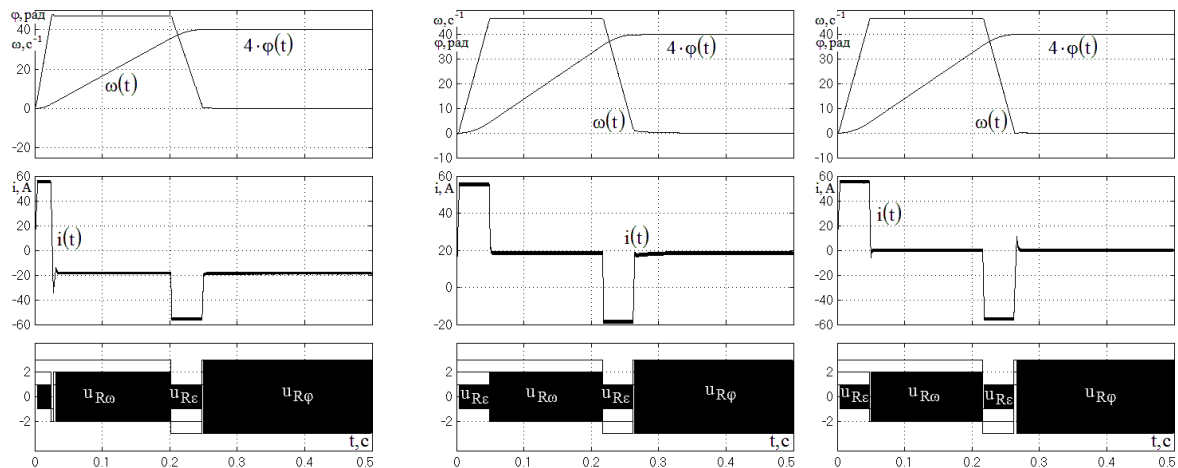


Рис. 3. Результат параметричної корекції динаміки при жорстких зворотних зв'язках

а) $M_c = M_n$ б) $J = 1,5J_n$
Рис. 4. Динаміка позиційного електропривода із гнучкими зворотними зв'язками

Висновки

Порівняльне дослідження різних варіантів структурної реалізації позиційних електроприводів з релейним керуванням дозволяє зробити висновок про вкрай обмежену спроможність систем з жорсткими зворотними зв'язками до формування оптимальних за швидкістю перехідних процесів. Цей факт зумовлений не стільки статизмом таких систем, скільки їх високою чутливістю до будь-яких збурень, яка спричиняє незворотні відхилення від розрахункової траєкторії. Про точну чисельну оцінку таких відхилень не йдеться, оскільки їх прояв носить якісний характер, що полягає у втраті оптимальності за швидкістю, коли виникнення похибки сигналу зворотного зв'язку в межах одного відсотка спричиняє збільшення тривалості позиціонування в масштабі десятків відсотків від оптимальної. Результати дослідження свідчать про необхідність застосування в системах керування положенням гнучких зворотних зв'язків не лише для забезпечення астатичних властивостей, але й для набуття здатності адаптувати перехідну траєкторію до специфіки поточного режиму позиціонування зі збереженням оптимальності за швидкістю.

Список використаної літератури

1. Crowder R. Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control. Butterworth-Heinemann, 2019. 307 pp.
2. Utkin V., Poznyak A., Orlov Y., Polyakov A. Road Map for Sliding Mode Control Design. Springer Nature, Switzerland, 2020. 127 pp.
3. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding Mode Control and Observation. Control Engineering. Birkhäuser, New York, 2014. 353 pp.
4. Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. Optimization and Optimal Control in Automotive Systems. Springer, 2014. 326 pp.
5. Садовой О. В., Дерещ О. Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. 206 с.

6. Дерещ О. Л., Садовой О. В. Метод N–i перемикачів у задачах оптимізації за швидкістю : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
7. Дерещ О.Л., Садовой О.В., Дерещ Г.О. Двухзонное регулирование скорости асинхронных электроприводов в условиях стабилизации ускорения. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2023. №2(43) С.76–83.
8. Derets O., Sadovoi O. Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020*. P.1–4.
9. Дерещ О.Л., Садовой О.В., Дерещ Г.О. Побудова математичної моделі та структурний синтез астатичної релейної системи керування електроприводом. *Математичне моделювання*. Кам'янське, 2023. №2 (49) С.173–181.
10. Derets O., Sadovoi O., Derets S. Application of Sliding Modes in Internal Subsystems of Electric Drive with a Parabolic Position Controller, *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2023, 2023*.
11. Derets, O., Sadovoi, O., Derets, H. Synthesis and Study of Derivatives Observer with Sliding Mode Control for Servo Drive. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021, 2021*.
12. Дерещ О.Л., Садовой О.В., Дерещ С.О., Патинка Д.І. Структурна оптимізація за швидкістю спостережачів похідних з релейним керуванням для стежних електроприводів. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2024. №1(44) С.109–115.
13. Дерещ О. Л., Садовой О. В., Дерещ С. О. Позиційний асинхронний електропривод із релейним керуванням і зворотним зв'язком за неповним вектором стану. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2024. №2(45). С.98–105.
14. Derets O., Sadovoi O., Derets S. Simplified Implementation of a Proximate Time-Optimal Electric Drive with an Elastic Link, *7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE-2024), September 24 - 26, 2024, Kyiv, Ukraine*.

INFLUENCE OF STRUCTURAL IMPLEMENTATION OF A RELAY POSITION CONTROL SYSTEM ON THE EFFICIENCY OF ITS SPEED OPTIMIZATION

Abstract

The relevance of the work is due to the need to determine recommendations for the selection of effective structural solutions for relay systems of optimal speed control. Operating conditions have a significant impact on the technical aspects of implementing optimal position control algorithms. The purpose of the study is to empirically and analytically study various structures of positional electric drives, which differ in the complexity of technical implementation under conditions of incompleteness of the information and sensor part, and to assess their ability to form design optimal speed trajectories of the position control system. Implementation of sliding modes of relay regulators under the conditions of performing their parametric synthesis by the N–i switching method can be carried out in practice when using different methods of calculating feedback signals. In particular, both direct measurement of state coordinates and various combinations of derivative observers can be used. The use of state filters for calculating canonical coordinates provides the positional electric drive control system with exceptionally high operational characteristics. Their evaluation was performed in a series of preliminary studies using the N-i switching method. The considered variants of the structures demonstrate differences not only in static accuracy, but also in the form of transition functions. The materials of the work are based on a long-term series of previous publications devoted to the popularization of the H-switching method as a progressive means of algorithmic synthesis of relay systems. The obtained conclusions regarding the functionality of electric drives allow making effective design decisions. The relay systems studied in the work are suitable for implementation on a modern hardware.

References

- [1] Crowder R. (2019). *Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control*. Butterworth-Heinemann.
- [2] Utkin V., Poznyak A., Orlov Y., Polyakov A. (2020). *Road Map for Sliding Mode Control Design*. Springer Nature, Switzerland.
- [3] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation. Control Engineering*. Birkhäuser, New York.
- [4] Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. (2014). *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems*. Springer.
- [5] Sadovoy O.V., Derets O.L. (2014). *Spetsialni pytannya matematychnoho opysu i modelyuvannya dynamiky skladnykh system [Special issues of mathematical description and modeling of the dynamics of complex systems]*. Dniprodzerzhynsk: DSTU [in Ukrainian].
- [6] Derets O.L., Sadovoy O.V. (2021) *Metod N-i peremykan u zadachakh optymizatsiyi za shvydkodiyeyu [N-i switching method in speed optimization tasks]*. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [7] Derets O.L., Sadovoi O.V., Derets H.O. (2023). Dvozonne rehulyuvannya shvydkosti asynkhronnykh elektropriyvodiv v umovakh stabilizatsiyi pryskorennia. [Dual-zone velocity control of asynchronous electric drives under acceleration stabilization conditions.] *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 2/2023 (43). P. 76–83. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [8] Derets O., Sadovoi O. (2020). Structural Synthesis of an Acceleration Observer with Sliding Mode Control for Precision Electric Drives. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine*.
- [9] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets H.O. (2023). Pobudova matematychnoyi modeli ta strukturnyy syntez astatychnoyi releynoyi systemy keruvannya elektropriyodom. [Development of a mathematical model and structural synthesis of an astatic relay control system for electric drive.] *Matematychni modelyuvannya - Mathematical modeling*. Kamianske, 2/2023 (49). P.173–181.
- [10] Derets O., Sadovoi O., Derets S. (2023). Application of Sliding Modes in Internal Subsystems of Electric Drive with a Parabolic Position Controller, *Proceedings of the 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2023*.
- [11] Derets, O., Sadovoi, O., Derets, H., (2021). Synthesis and Study of Derivatives Observer with Sliding Mode Control for Servo Drive. *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021*.
- [12] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets S.O., Patynka D.I. (2024). Strukturna optymizatsiya za shvydkodiyeyu sposterihachiv pokhidnykh z releynym keruvannyam dlya stezhnykh elektropriyodiv. [Structural optimization in speed of derivative observers with sliding mode control for servo drives.] *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 1/2024 (44). P. 109–115. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [13] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets S.O. (2024). Pozytsiynyy asynkhronnyy elektropriyvod iz releynym keruvannyam i zvorotnym zv'yazkom za nepovnym vektorom stanu. [Positioning asynchronous electric drive with relay control and feedback on an incomplete state vector.] *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scholarly papers of DSTU*. 2/2024 (45). P. 98–105. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [14] Derets O., Sadovoi O., Derets S. (2024). Simplified Implementation of a Proximate Time-Optimal Electric Drive with an Elastic Link, *7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE-2024)*, September 24 - 26, 2024, Kyiv, Ukraine.

Надійшла до редколегії 14.04.2025