

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.13

УДК 62-83

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

Дерець С.О., здобувач третього (доктори філософії) рівня вищої освіти

Патинка Д.І., 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

Derets Serhii, Postgraduate student

Patynka Denys, master's degree student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СПОСТЕРІГАЧІВ ПОХІДНИХ З РЕЛЕЙНИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ СТЕЖНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Актуальність роботи зумовлена вдосконаленням елементної бази сучасних систем керування електроприводами, що сприяє розширенню можливостей впровадження нових принципів їх побудови і спонукає до розвитку методів теорії оптимального керування. Метою дослідження є підвищення швидкодії спостерігачів похідних похибки регулювання, призначених для застосування у складі стежних електроприводів. Запропоноване розв'язання задачі ґрунтується на методі $N-i$ перемикань як у частині модифікації структури спостерігача, так і в способі визначення його додаткових параметрів. Використання викладеного способу визначення похідних забезпечує оптимальне керування стежним електроприводом на всіх стадіях перехідного процесу. Перспектива застосування результатів роботи полягає в їх інтеграції до прикладного програмного забезпечення, призначеного для оптимізації електромеханічних систем.

Ключові слова: стежний електропривод; спостерігач похідних; оптимальність за швидкодією; метод $N-i$ перемикань.

The relevance of the work is due to the improvement of the elemental base of modern electric drive control systems, which helps expand the possibilities for introducing new principles of their construction and encourages the development of methods of optimal control theory. The purpose of the study is to improve the performance of control error derivative observers intended for use as part of servo electric drives. The proposed solution to the problem is based on the $N-i$ switching method both in terms of modifying the structure of the observer and in the method of determining its additional parameters. The use of the described method for determining derivatives ensures optimal control of the servo drive at all stages of the transient. Integration of work results into application software designed for optimization of electromechanical systems is a promising direction of their implementation.

Keywords: servo drive; derivative observer; optimality in speed; $N-i$ switching method.

Постановка проблеми

До стежних електроприводів, які функціонують в режимах захоплення й супроводу складних траєкторій, висуваються комплексні вимоги стосовно їх точності й швидкодії [1]. Крім того, стежні електроприводи, як будь-які електромеханічні системи, є нестационарними динамічними об'єктами [2]. Тому одним з найефективніших підходів до побудови їхніх систем оптимального керування [3] є застосування принципу розривного керування. Релейні автоматичні системи із гнучкими зворотними зв'язками за $N-1$ старшими похідними похибки керування забезпечують астатизм при відтворенні задавальних впливів будь-якої форми й інваріантність до координатних і параметричних збурень [4], а застосування методу $N-i$ переми-

кань [5] дозволяє наблизити їх швидкодію до оптимальної при заданих обмеженнях. Для захищеного від перешкод диференціювання вимірюваних сигналів на практиці застосовуються спостережні пристрої [4], які при використанні в їхній структурі релейних регуляторів, що мають нескінченний коефіцієнт підсилення [6, 7], здатні забезпечити найбільш високу точність обчислення похідних [8]. Разом із тим, власні перехідні процеси спостерігачів повинні бути вкрай обмеженими у часі, але для диференціаторів повного порядку таку властивість неможливо забезпечити простим збільшенням амплітуди сигналу керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Рівняння динаміки стежного електропривода, побудованого на базі електричного двигуна постійного струму, можна записати у формі [5]

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

де $\varepsilon, \omega, \varphi$ — відповідно кутові прискорення, швидкість та положення робочого органу, u — напруга силового перетворювача, якій пропорційний кутовий ривок a ; $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ — параметри електропривода, i — струм якорного кола, i_c — статичний струм, $\omega / k_p = \omega_m$ — кутова швидкість валу електричної машини.

Ефективним засобом синтезу систем відтворення складних траєкторій є метод $N-i$ перемикань [5]. Згідно з ідеєю цього методу, оптимальне за швидкодією керування електроприводом (1) дозволяє виконати каскад релейних регуляторів

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

де $K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}, K_{\omega\varepsilon}$ — коефіцієнти зворотних зв'язків; задані значення змінних мають позначку "*", як у випадку вхідного сигналу системи, так і у випадках сформованих регуляторами завдань для підпорядкованих їм контурів; рівні обмеження координат стану, які за змістом є максимально допустимими значеннями, позначено індексами «max».

Параметричний синтез каскадно-з'єднаних релейних регуляторів (2) методом $N-i$ перемикань [9, 10] приводить до отримання виразів для коефіцієнтів зворотних зв'язків, які є функціями рівнів обмеження координат $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, a_{max}$

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

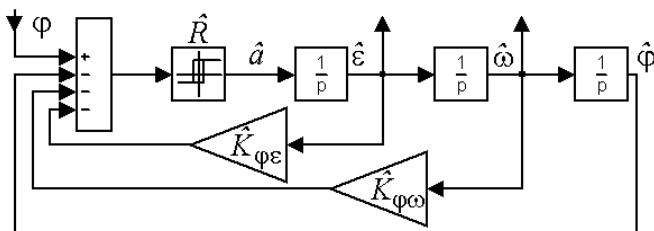


Рис. 1. Структурна схема спостерігача похідних 1-го та 2-го порядків

Релейні спостерігачі похідних положення повного порядку являють собою стежну релейну систему керування [6, 7], заданим значенням для якої є поточне положення робочого органу електропривода $\varphi^* = \varphi$. Об'єктом керування, як і в лінійних спостерігачах стану, служить каскад з N інтегруючих ланок, координати яких у порядку від виходу до входу позначимо $\hat{\varphi}, \hat{\omega}, \hat{\varepsilon}$ (рис. 1), дотримуючись аналогії з прийнятою вище системою символів. По-

значення " \wedge " вказує на приналежність величин і параметрів до спостерігача. Алгоритм системи керування диференціатором має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} p\hat{\varphi} &= \hat{\omega}, p\hat{\omega} = \hat{\varepsilon}, p\hat{\varepsilon} = \hat{a} \\ \hat{s} &= \varphi - \hat{\varphi} - \hat{K}_{\varphi\omega}\hat{\omega} - \hat{K}_{\varphi\varepsilon}\hat{\varepsilon}, \\ \hat{a} &= \hat{a}_{max} \cdot \text{sign}(\hat{s}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де \hat{s} — функція перемикавання регулятора \hat{R} , N — порядок об'єкта керування, \hat{a}, \hat{a}_{max} — миттєве значення й амплітуда сигналу керування спостережного пристрою, $\hat{K}_{\varphi\omega}, \hat{K}_{\varphi\varepsilon}$ — коефіцієнти зворотних зв'язків.

Релейний регулятор \hat{R} такого спостерігача в ковзному режимі підтримує рівність реальної й обчисленої координат φ і $\hat{\varphi}$. При цьому величини $\hat{\omega}$, $\hat{\varepsilon}$ дорівнюють відповідним похідним $p\varphi$, $p^2\varphi$ вихідної координати й можуть бути використані в системі керування електроприводом (2) як сигнали гнучких зворотних зв'язків ω , ε .

Формулювання мети дослідження

Ковзний режим релейної системи керування за своєю природою є автоколивальним, але інерційність об'єктів керування спричиняє придушення високочастотних пульсацій координат. Це дозволяє вважати ковзний режим квазіусталеним і здійснювати як аналіз релейних систем, так і синтез їх з бажаними властивостями на основі рівнянь ковзання зниженого порядку [5]. Але швидкодія таких систем визначається характером входження регуляторів у ковзний режим і мало пов'язана з перебігом самого ковзного режиму. Задача оптимізації за швидкодією на основі врахування обмежень успішно розв'язана для релейних систем керування електроприводами зі створенням методу $N-i$ перемикань. Метою дослідження є адаптація цього методу до задачі оптимізації за швидкодією спостерігачів похідних, які не мають природних обмежень координат, але допускають безпосередній вплив на структуру об'єкта керування для максимального прискорення виникнення ковзного режиму.

Виклад основного матеріалу

Спостерігачі похідних керованої координати є достатньо ефективними в системах стабілізації вихідної координати електромеханічної системи, де навіть для досягнення максимальних показників якості регулювання припустима заміна похідних $p(\Delta\varphi)$, $p^2(\Delta\varphi)$ похибки регулювання $\Delta\varphi = \varphi^* - \varphi$ на похідні вихідної координати $p\varphi$, $p^2\varphi$, оскільки при $\varphi^* = \text{const}$ похідні заданого положення будь-якого порядку дорівнюють нулю $p^{(i)}\varphi^* = 0$ [6, 7]. Похідні координати φ до $N-1$ -го порядку включно є неперервними функціями, завдяки чому релейний регулятор системи керування диференціатором \hat{R} постійно функціонує в ковзному режимі, забезпечуючи достатньо високу точність ідентифікації стану системи керування.

У більш загальному випадку досягнення найвищих показників якості регулювання можливе в системі керування положенням, замкнутій за похибкою $\Delta\varphi = \varphi - \varphi^*$ та її старшими похідними $p(\Delta\varphi)$, $p^2(\Delta\varphi)$. У стежних електроприводах похідні сигналу завдання φ^* в загальному випадку відмінні від нуля $p^{(i)}\varphi^* \neq 0$, що вимагає включення їхніх величин в алгоритм керування (2) шляхом відповідного врахування сигналами зворотних зв'язків ω , ε [8]. Отже, у системах керування стежних електроприводів у ролі задавального впливу $\hat{\varphi}^*$ для системи керування диференціатором повинна виступати похибка регулювання положення $\Delta\varphi = \varphi - \varphi^*$. Релейний регулятор \hat{R} у ковзному режимі забезпечить рівність координат $\Delta\varphi$ і $\hat{\varphi}$. При цьому величини $\hat{\omega}$, $\hat{\varepsilon}$ повинні дорівнювати відповідним похідним $p(\Delta\varphi)$, $p^2(\Delta\varphi)$ похибки спостереження, і за цієї умови вони можуть використовуватися в системі керування електроприводом як сигнали гнучких зворотних зв'язків ω , ε .

Однак функція $\Delta\varphi(t)$ є розривною при східчастих змінах задавального впливу $\varphi^*(t)$. Ця обставина призводить до виникнення власних перехідних процесів у системі керування диференціатором, під час яких ковзний режим регулятора \hat{R} порушується внаслідок обмеженості максимальної швидкості зміни $\hat{\varphi}(t)$, зумовленої насиченням інтеграторів та скінченною амплітудою керуючого сигналу \hat{a}_{max} . При цьому рівність координат $\Delta\varphi$ і $\hat{\varphi}$ порушується, як і рівність їхніх похідних, що робить систему керування розімкнутою за сигналами проміжних зворотних зв'язків до моменту входження \hat{R} в ковзний режим, коли досягається необхідна точність диференціювання. Тому до системи керування диференціатором висувається вимога забезпечення часу збіжності, меншого від найменшої сталої часу основної системи керування. Іншими словами, при відпрацюванні системою керування електроприводом стрибка задавального впливу ковзний режим \hat{R} регулятора повинен відновлюватися до початку входження в ковзний режим регуляторів $R_\varphi, R_\omega, R_\varepsilon$, замкнених за обчисленими похідними.

Для параметричної оптимізації за швидкодією релейних систем з лінійними функціями перемикачів було створено метод $N-i$ перемикачів. Безпосереднє застосування цього методу для синтезу спостерігачів похідних ускладнено їхньою відмінністю від систем керування електроприводом у частині структури й динамічних властивостей. Однак основною перешкодою для чисто параметричного розв'язання задачі підвищення швидкодії диференціаторів є необхідність збільшення амплітуди керуючого сигналу \hat{a}_{max} , яке при викладених вище вимогах щодо часу збіжності спостерігача повинне дорівнювати декільком порядкам. Такий прийом сполучений з відповідним підвищенням частоти ковзного режиму регулятора \hat{R} , що вкрай ускладнює його технічну реалізацію. Отже, необхідне структурне розв'язання задачі підвищення швидкодії систем керування спостерігачами похідних.

На рис. 2 наведена структурна схема системи керування електроприводом із гнучкими зворотними зв'язками. У її складі можна виділити: N -контурну керуючу частину, побудовану за принципом каскадно-підпорядкованого з'єднання регуляторів; електромеханічну систему, вихідною координатою φ в якій є положення робочого органа; обчислювач першої й другої похідних похибки керування $\hat{\omega}, \hat{\varepsilon}$ з форсувальним колом, яке побудоване на основі релейного елемента, що має зону нечутливості $\pm\delta$.

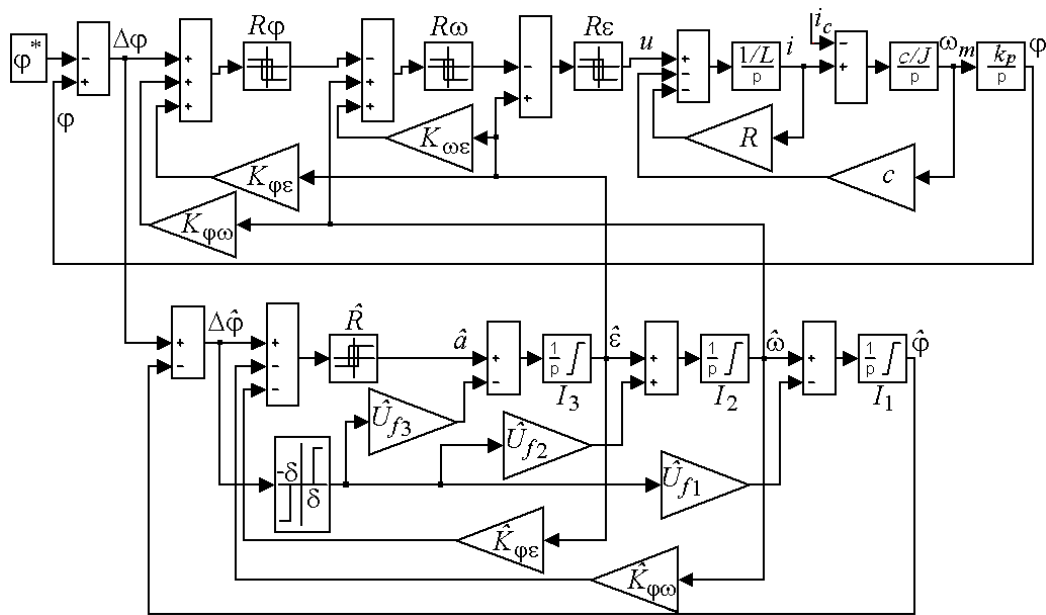


Рис. 2. Структура системи керування стежним електроприводом з форсованим обчислювачем похідних

Введення у структуру спостерігача форсувального кола повинне забезпечити радикальне зменшення часу збіжності перехідних процесів. На входи інтеграторів релейним елементом подаються сигнали $\bar{u}f_i = (-1)^i \cdot \bar{U}f_i$, де i — номер інтегратора починаючи з вихідного. Вони прискорюють протікання перехідних процесів спостерігача (ділянка а—b, рис. 3), а потім повністю відключаються перед входженням регулятора \bar{R} у ковзний режим, коли неузгодженість вимірної похибки регулювання $\Delta\varphi$ та її обчисленого еквівалента $\hat{\varphi}$ входить в межі $\pm\delta$ (ділянка b—0, рис. 3), тобто коли починається власний перехідний процес спостерігача. При такому підході відпадає необхідність надмірного підвищення амплітуди керування й частоти ковзання спостерігача.

Метод $N-i$ перемикачів [5], орієнтований на оптимізацію релейних систем підпорядкованого регулювання, органічно адаптується для застосування до структури спостерігача, наведеної на рис. 2 у складі системи керування електроприводом. У контексті даного методу форсувальне коло є засобом прискореного переносу зображувальної точки системи керування спостерігачем в початок останнього інтервалу сталості керуючого впливу на розрахунковій оптимальній за швидкодією траєкторії, тобто в останню характерну точку перемикачів регулятора

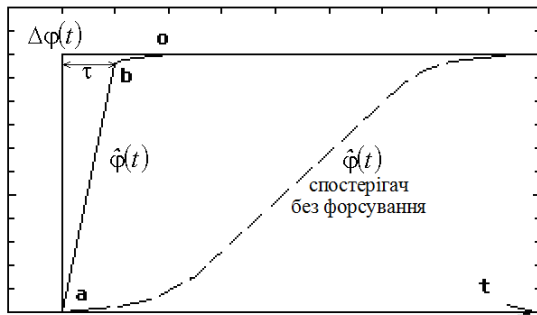


Рис. 3. Дія форсувального кола

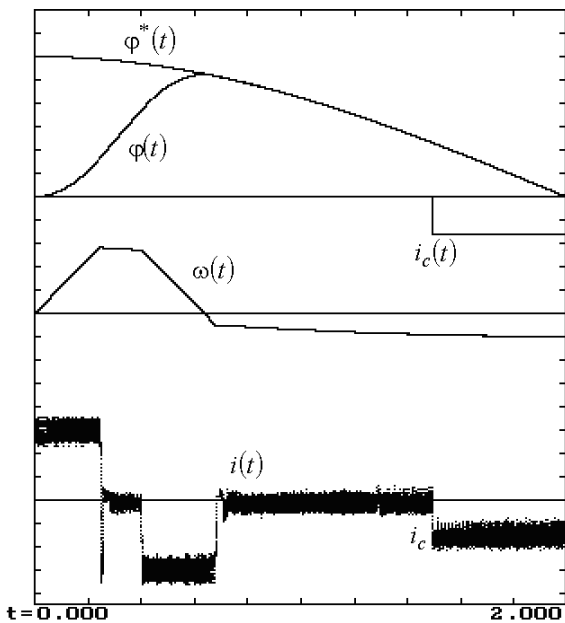


Рис. 4. Перехідні процеси системи керування стежним електроприводом

\bar{R} . Для втілення цієї ідеї процедура синтезу системи керування диференціатором доповнюється визначенням рівнів насичення інтеграторів, ширини зони нечутливості δ релейного елемента, а також амплітуд форсувальних сигналів $\bar{U}f_i$. Рівні насичення інтеграторів повинні дорівнювати відповідним координатам розрахункової точки перемикачів \bar{R} , ширина зони нечутливості — координаті $\hat{\varphi}$ у точці перемикачів, а форсувальні сигнали можна розрахувати, поділивши рівні насичення на бажаний час дії форсувального кола τ . Сумарний час збіжності спостерігача складається з величини τ та тривалості переходу від розрахункової характерної точки b до початку координат o (рис. 3), він не перевищує мінімальну тривалість регулювання координат електропривода, що є запорукою вчасного виникнення ковзного режиму спостерігача.

Зауважимо, що координати розрахункових характерних точок перемикачів є проміжними результатами методу $N-i$ перемикачів, отже, їх обчислення не вимагає розширення математичного апарату [5, 9, 10].

Розглянемо приклад застосування форсованого диференціатора в складі релейної системи оптимального керування стежним електроприводом. Синтезована методом $N-i$ перемикачів система підпорядкованого керування, структура якої наведена на рис. 2, забезпечує оптимальний за швидкодією процес захоплення траєкторії $\varphi^*(t)$ (рис. 4) в умовах обмеження проміжних координат. Результати дослідження свідчать, що замикання контурів системи гнуч-

кими зворотними зв'язками надає їй астатизм при відпрацьовуванні задавального сигналу, що змінюється в часі, завдяки прискореному входженню регулятора \hat{R} в ковзний режим. Досягнення високої якості регулювання координат системи є можливим саме завдяки форсуванню перехідного процесу диференціатора, що дозволяє гранично скоротити час збіжності обчислених і реальних похідних похибки регулювання.

Висновки

Структурне розв'язання задачі мінімізації часу збіжності перехідних процесів спостерігачів похідних за допомогою форсувального кола повною мірою базується на методі $N-i$ перемикань. Це забезпечує узгодження динаміки спостережних пристроїв і електропривода шляхом розділення в часі моментів виникнення ковзних режимів регуляторів основної та допоміжної систем керування. Результати дослідження форсованих диференціаторів у складі стежних електроприводів підтверджують високу ефективність запропонованого структурного підходу до оптимізації за швидкістю спостережних пристроїв з релейним керуванням. Перспективним напрямком його розвитку є розробка методів інтеграції до алгоритмів синтезу [9, 10] оптимальних налаштувань контролерів цифрових систем керування стежними електроприводами.

Список використаної літератури

1. Crowder R. Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control. Butterworth-Heinemann, 2019. 307 p.
2. Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. High-speed precision motion control. CRC press, 2017. 324 pp.
3. Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. Optimization and Optimal Control in Automotive Systems. Springer, 2014. 326 p.
4. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding Mode Control and Observation. Control Engineering. Birkhäuser, New York, 2014. 353 p.
5. Дерещ О. Л., Садовой О. В. Метод $N-i$ перемикань у задачах оптимізації за швидкістю : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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.*
9. Derets O., Sadovoi O., Derets H. Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2021*. P.1–4.
10. Derets O., Derets H. Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020*. P.1–4.

STRUCTURAL OPTIMIZATION IN SPEED OF DERIVATIVE OBSERVERS WITH SLIDING MODE CONTROL FOR SERVO DRIVES

Abstract

The relevance of the work is determined by the improvement of the element base of modern electric drive control systems, which contributes to the expansion of the possibilities of introducing new principles of their construction and encourages the development of optimal control theory methods. The increase in productivity of controllers opens up ways to implement derivative observers

with discontinuous control, in which the frequency of sliding modes is an order of magnitude higher than the frequency of the power converter of the electric drive.

The purpose of the study is to increase the speed of derivative observers of the control error, intended for use as part of electric servo drives. Such observers are tracking systems that must combine high tracking accuracy with high speed when tracking control error that may have discontinuities.

The solution of this complex problem carried out in the work is structural, and obtained due to the possibility of direct influence on the internal coordinates of the observer. It is based on the method of $N-i$ switching both in the part of modifying the structure of the observer and in the method of determining its additional parameters. The use of a forcing circuit based on a relay, which has a dead zone and does not affect the steady modes of the observer, is proposed. This solution avoids an excessive increase in the sliding frequency of the relay controller in the observation device.

The use of the described method of determining the derivatives provides optimal control of the electric servo drive at all stages of the transient process, which is confirmed by the results of modeling the dynamics of the control system. Integration of work results into application software designed for optimization of electromechanical systems is a promising direction of their implementation.

References

- [1] Crowder R. (2019). *Electric Drives and Electromechanical Systems : Applications and Control*. Butterworth-Heinemann.
- [2] Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. (2017). *High-speed precision motion control*. CRC press.
- [3] Waschl H., Kolmanovsky I., Steinbuch M., Re L. (2014). *Optimization and Optimal Control in Automotive Systems*. Springer.
- [4] Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. (2014). *Sliding Mode Control and Observation. Control Engineering*. Birkhäuser, New York.
- [5] 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].
- [6] 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*.
- [7] 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*.
- [8] Derets O.L., Sadovoi O.V., Derets H.O. (2023). Pobudova matematychnoyi modeli ta strukturnyy syntez astatychnoyi releynoyi systemy keruvannya elektropryvodom. [Development of a mathematical model and structural synthesis of an astatic relay control system for electric drive]. *Matematychni modelyuvannya – Mathematical modeling*, 2/2023 (49). P.173–181. Kamianske: DSTU [in Ukrainian].
- [9] Derets O., Sadovoi O., Derets H. (2021). Performance Optimization Algorithm for Electric Drive Control Systems Based on Acceleration Constraint. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine*.
- [10] Derets O., Derets H. (2020). Adaptive Algorithm for optimization in Speed of Third Order Sliding Mode Control Systems. *2020 IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine*.