

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.6

УДК 62-83

**О.Л. Дерезь**, к.т.н., доцент, ald\_dstu@i.ua

**О.В. Садовой**, д.т.н., професор, sadovoyav@ukr.net

**Г.О. Дерезь**, студентка, hanna.derets@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ КВАЗІОПТИМАЛЬНИХ ЗА ШВИДКОДІЄЮ СИСТЕМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ ІЗ АПЕРІОДИЧНИМ КОВЗНИМ РЕЖИМОМ

*Актуальність роботи зумовлена зростаючим рівнем вимог до динамічних характеристик електроприводів. Метою дослідження є поєднання засобів оптимізації за швидкодією релейних систем керування із методиками забезпечення аперіодичного характеру перехідних процесів. На основі методу N-і перемикачів створений алгоритм синтезу параметрів релейної системи підпорядкованого керування з неколивальним входженням у ковзний режим при різних режимах позиціонування. Розроблена блок-схема орієнтована на практичне втілення алгоритму програмним забезпеченням контролерів прецизійних електроприводів.*

**Ключові слова:** релейна система керування; оптимальність за швидкодією; метод N-і перемикачів; аперіодичний перехідний процес.

*The relevance of the work is due to the growing requirements for the dynamic characteristics of electric drives. The aim of the study is to combine the means of optimization in speed of sliding mode control systems with methods for ensuring the aperiodic nature of transient processes. On the basis of the N-i switching method, an algorithm for synthesizing the parameters of a relay control system with cascade-subordinated structure, ensures non-oscillatory initiation of a sliding mode at various positioning modes has been created. The developed block diagram is focused on the practical implementation of the algorithm by the software of controllers of precision electric drives.*

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

### Постановка проблеми

До електромеханічних систем третього порядку належать позиційні електроприводи з транзисторними інверторами та системи керування швидкістю з інерційними силовими перетворювачами, які разом становлять значну частку від загального числа прецизійних електроприводів. Механізми, які потребують керування швидкістю, у своїй більшості є невибагливими щодо форми перехідних діаграм, але до позиційних електроприводів висуваються достатньо жорсткі вимоги не лише стосовно точності відтворення заданого положення, але й до якості перехідних процесів [1]. Зокрема, разом з вимогами забезпечення високої точності та максимальної при заданих обмеженнях швидкодії [2], типовою задачею проектування таких систем є обов'язкове формування перехідних процесів з аперіодичним характером.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Поєднання властивостей оптимальності за точністю та швидкодією вимагає виконання багатокритеріальної оптимізації шляхом застосування складних чисельних методів [3, 4]. Метод N-і перемикачів [5] дозволяє без розв'язання варіаційних задач здійснити структурно-алгоритмічний синтез релейних систем підпорядкованого керування [6], які забезпечують спільну реалізацію названих властивостей за рахунок використання як параметричних, так і структурних рішень [5]. Разом із тим, на основі математичного апарату даного методу розроблені засоби формування гранично-аперіодичних перехідних процесів шляхом модифікації рівнянь ковзання релейних регуляторів систем третього порядку з орієнтацією на вимоги до позиційних електроприводів [1]. У попередніх роботах [7—11] дану задачу розв'язано окремо для різних

випадків типових розрахункових діаграм, що не дозволяє застосовувати згадані результати як єдиний інструмент синтезу параметрів для усього діапазону можливих переміщень.

### Формулювання мети дослідження

Видозміна форми оптимальної за швидкістю перехідної траєкторії, яка залежить від величини задаючого впливу [6, 7, 12, 13], вимагає адаптації налаштувань системи керування електроприводом до особливостей поточного режиму позиціонування [14, 15]. Розробка адаптивного алгоритму синтезу релейних систем підпорядкованого керування третього порядку, який забезпечить аперіодизацію ковзних режимів при усіх формах перехідних траєкторій, застосовуваних в рамках методу N-ї перемикачів, є метою даного дослідження.

### Виклад основного матеріалу

Система диференціальних рівнянь динаміки позиційного електропривода постійного струму має вигляд

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

де  $\varphi, \omega, \varepsilon, a$  — відповідно кутові положення, швидкість, прискорення та ривок виконавчого валу,  $u$  — напруга перетворювача;  $k_p, R, L, J, c = k\Phi$  — параметри електропривода.

Застосування методу N-ї перемикачів [5] дозволяє виконати для електромеханічної системи (1) параметричний синтез каскаду релейних регуляторів

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

де  $K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}, K_{\omega\varepsilon}$  — коефіцієнти зворотних зв'язків; символом \* позначено задані значення відповідних змінних, як вхідної, так і формованих регуляторами для підпорядкованих їм контурів; індексами «max» позначено рівні обмеження координат стану.

Аналітичне розв'язання [5, 6] задачі синтезу параметрів релейних систем третього порядку методом N-ї перемикачів дозволило отримати вирази для коефіцієнтів зворотних зв'язків у вигляді функцій рівнів обмеження канонічних координат  $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, a_{max}$

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

Формули (3) є актуальними для налаштувань на усі режими позиціонування. До їх використання разом з алгоритмом корекції рівнів обмежень [14] зводиться математичний апарат даного методу.

Одна зі структурних властивостей релейних систем полягає у зменшенні на одиницю порядку їх характеристичних рівнянь при виникненні ковзних режимів. У випадку систем третього порядку це дозволило звести опис ковзного руху регулятора  $R_\varphi$  до квадратного рівняння

$$K_{\varphi\varepsilon} \cdot p^2 + K_{\varphi\omega} \cdot p + 1 = 0. \quad (4)$$

У результаті аналізу [8] коренів

$$p_{1,2} = \frac{-K_{\varphi\omega}}{2 \cdot K_{\varphi\varepsilon}} \pm \frac{\sqrt{K_{\varphi\omega}^2 - 4 \cdot K_{\varphi\varepsilon}}}{2 \cdot K_{\varphi\varepsilon}} \quad (5)$$

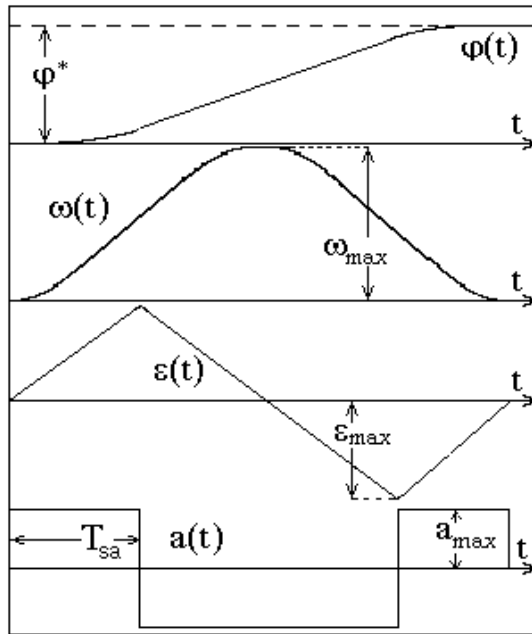


Рис. 1. Режим малого трикутника

ням, яке є неприпустимим. Названі обставини роблять актуальною модифікацію процедури синтезу [14] алгоритмів керування (2) в контексті використаного методу в напрямку забезпечення чисто дійсних значень коренів (5) рівняння ковзання (4) регулятора положення [15].

Мінімальне переміщення, яке відпрацьовується з аперіодичним входженням у ковзний режим, дорівнює [8]

$$\varphi_a = \frac{10 + 6\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{max}^3}{a_{max}^2}, \quad (6)$$

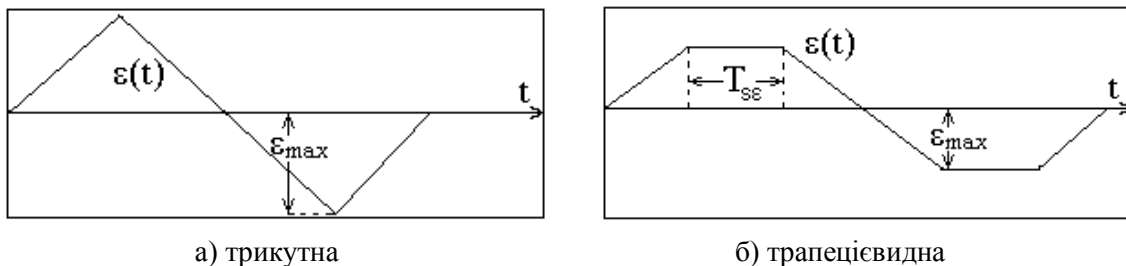
але зауважимо, що передумови коливальності ковзних режимів закладають не лише співвідношення наперед заданих рівнів обмежень координат стану. Фундаментальна і обов'язкова корекція розрахункової траєкторії полягає у забезпеченні її відтворюваності [7] шляхом обмеження максимального прискорення

$$\varepsilon_{max} \leq \varepsilon_{trg} \quad (7)$$

величиною

$$\varepsilon_{trg} = \sqrt{\omega_{max} \cdot a_{max}}. \quad (8)$$

Це зумовлює формування оптимальної за швидкістю траєкторії з трикутною діаграмою прискорення (рис. 2, а), налаштування на яку спричиняє коливальне входження системи (1), (2) в ковзний режим [13].



а) трикутна

б) трапецієвидна

Рис. 2. До порівняння форми розрахункових діаграм прискорення

характеристичного рівняння (4) системи, синтезованою методом N-і перемикачів, доведено [13], що при налаштуванні на режим малих переміщень (рис. 1) корені (5) з коефіцієнтами (3) обов'язково мають комплексно-сполучені значення. Крім того, загальний вигляд виразів коренів (5) допускає комплексно-сполучені їх значення для решти режимів позиціонування. Підставою для таких висновків є однозначний аналітичний зв'язок [6, 12, 13] між величиною заданого переміщення  $\varphi^*$ , формою оптимальної за швидкістю траєкторії та параметрами (3) налаштованої на її відтворення системи (1), (2), встановленої в рамках методу N-і перемикачів.

Комплексно-сполучені значення коренів рівняння ковзання релейної системи керування зумовлюють коливальність її руху в малому околі точки рівноваги як у самому ковзному режимі, так і при входженні до нього на кінцевій стадії перехідного процесу [9]. Такий характер руху спричиняє перерегулювання за положен-

Завдяки закладеному у методі N-ї перемикачів зв'язку коефіцієнтів (3) з формою перехідної траєкторії можна гарантувати аперіодичне входження систем у ковзний режим за рахунок деформації розрахункової траєкторії відносно оптимальної за швидкістю форми (рис. 2, б). Така корекція виконується [9] без зміни аналітичних виразів коефіцієнтів зворотних зв'язків. Для її здійснення вводиться понижуючий коефіцієнт

$$k_a = \sqrt{2\sqrt{3} - 3}. \tag{9}$$

З врахуванням (9) нерівність (7) набуває вигляду

$$\varepsilon_{max} \leq k_a \cdot \varepsilon_{trg}. \tag{10}$$

Для позиціонування на ту саму величину  $\varphi^*$  в більш тривалому перехідному процесі необхідно одночасно знизити рівень обмеження швидкості  $\omega_{max}$  до значення.

$$\omega_{max} = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{3}}{8} a_{max} |\varphi^*|^2}. \tag{11}$$

Рівні обмеження, розраховані за формулами (9)—(11) забезпечують аперіодизацію ковзного режиму  $R_\varphi$  ціною збільшення тривалості позиціонування на 8 % у порівнянні з оптимальним за швидкістю процесом [9]. Оскільки розглянутий спосіб корекції спричиняє втрату швидкодії, викладений у роботі [15] алгоритм налаштування системи, що його реалізує, не можна вважати вичерпним розв'язком задачі.

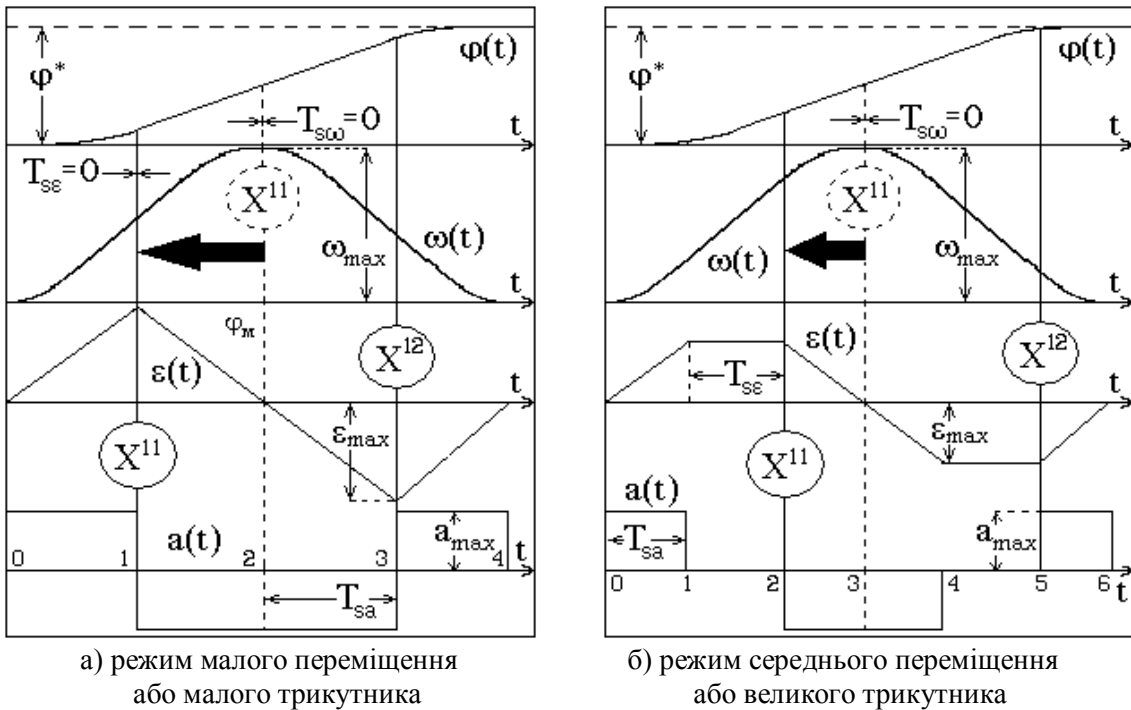


Рис. 3. Перенесення характерних точок перемикачів регулятора положення

Перенесення характерних точок перемикачів регуляторів  $X^{i,j}$ , передбачуваних методом N-ї перемикачів, виконане на підставі теореми про N інтервалів, дозволяє отримати систему з аперіодичним входженням у ковзний режим без втрати швидкодії в режимах малого (рис. 3, а) та середнього (рис. 3, б), переміщень, але його реалізація вимагає зміни формул розрахунку параметрів (3) на отримані відповідно в роботах [10] та [11] варіанти (12), (13)

$$K_{\varphi\omega} = 2T_{sa}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{5}{6}T_{sa}^2, \tag{12}$$

$$K_{\varphi\omega} = 2T_{sa} + \frac{1}{2}T_{se}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{5}{6}T_{sa}^2 + \frac{1}{4}T_{sa} \cdot T_{se}, \quad (13)$$

де  $T_{sa}, T_{se}$  — розрахункові інтервали стабілізації ривка та прискорення, позначені на рис. 1—3.

Поєднання усіх наведених вище методів узагальненим алгоритмом синтезу забезпечить аперіодизацію руху системи у ковзному режимі зі збереженням оптимальності за швидкодією у максимально широкому діапазоні задавальних впливів. Виконаємо побудову такого алгоритму (рис. 4) на основі розрахункових виразів (3)—(13) з врахуванням змісту робіт [6—14].

Вихідними даними для параметричного синтезу регуляторів (2) разом з величиною заданого переміщення  $\varphi^*$  служать початкові рівні обмежень  $\omega_{max}^*, \varepsilon_{max}^*, a_{max}^*$ , продиктовані міркуваннями електричної й механічної міцності електромеханічної системи (1). Їх присвоєння поточним значенням  $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, a_{max}$  здійснюється у блоці 1 пропонованого алгоритму. Першим кроком є взаємне узгодження рівнів обмеження  $\omega_{max}, \varepsilon_{max}, a_{max}$  із застосуванням формули (8), що забезпечує [7] задоволення умови відтворюваності розрахункової траєкторії (7). Подальша реалізація алгоритму (рис.4) полягає у визначенні граничних переміщень  $\varphi_{lrg}, \varphi_{tpc}$  для режимів трикутника та трапеції [13, 12] у блоці 4 та у використанні їх як селекторів варіантів при виборі поточного режиму у блоках 5, 7. Блок 6 підготовляє оптимізацію режиму малого трикутника, а блок 8 — великого шляхом визначення максимумів швидкості та прискорення, а також розрахункових інтервалів стабілізації. Порівняння виразів (12) та (13) для параметрів системи, синтезованих за допомогою перенесення характерної точки перемикавання [10, 11], свідчить про можливість отримання налаштувань (12) на режим малого переміщення (рис. 3, а), як окремого випадку налаштувань на режим середнього переміщення (рис. 3, б) при підстановці  $T_{se}=0$  до формул (13). Тому після визначення рівнів обмежень та інтервалів стабілізації проміжних координат за окремими виразами у блоках 6 та 8, коефіцієнти зворотних зв'язків обох режимів трикутника розраховуються за спільними формулами у блоці 9. Виявлена спорідненість результатів оптимізації [10, 11] режимів малого й великого трикутників (12), (13) не дає підстав для розповсюдження прийому перенесення характерної точки на випадок режиму трапеції незважаючи на той факт, що форма розрахункових траєкторій цього режиму є більш загальною.

На частині діапазону великих переміщень, яка лежить нижче граничного рівня  $\varphi_a$ , система третього порядку при синтезі методом N-ї перемикань не може бути оптимізована за швидкодією одночасно із отриманням дійсних коренів рівняння ковзання [8]. Тому, віддаючи перевагу забезпеченню аперіодичного характеру ковзного режиму, необхідно звернутись до корегування максимального прискорення [9] поправочним коефіцієнтом  $k_a$ . Зауважимо, що за певних співвідношень параметрів, які зумовлюють трикутну діаграму другої похідної регульованої координати при трапецієподібній діаграмі першої похідної, застосування такого заходу необхідне в усьому діапазоні зміни задавального впливу. У такому випадку, тобто при невиконанні обмежень (10), що перевіряється блоком 10, корегується максимальне прискорення у блоці 11. Після такого оновлення рівнів обмеження визначається нижня границя (б) переміщення з аперіодичним ковзним режимом (блок 12), на співвідношення з якою задане переміщення перевіряється у блоці 13. Після виконання корекції прискорення блоком 11 згідно (10) виникає збіг нижніх границь  $\varphi_a = \varphi_{tpc}$  діапазонів аперіодичного процесу та режиму трапеції. Вище цієї границі коефіцієнти зворотних зв'язків синтезуються без додаткових поправок (блок 15). В іншому разі у блоці 14 здійснюється узгоджена корекція рівнів швидкості і прискорення (9)—(11) з подальшим зверненням до блоку 15, у якому синтезуються параметри регуляторів для випадків стандартного розташування точок перемикавання регуляторів каскаду [6].

Сукупність блоків 1—15 реалізує інтеграцію окремо розроблених засобів аперіодизації ковзних режимів системи третього порядку єдиним обчислювальним алгоритмом, що створює передумови для практичного втілення результатів робіт [8—11] програмним забезпеченням контролерів прецизійних електроприводів.

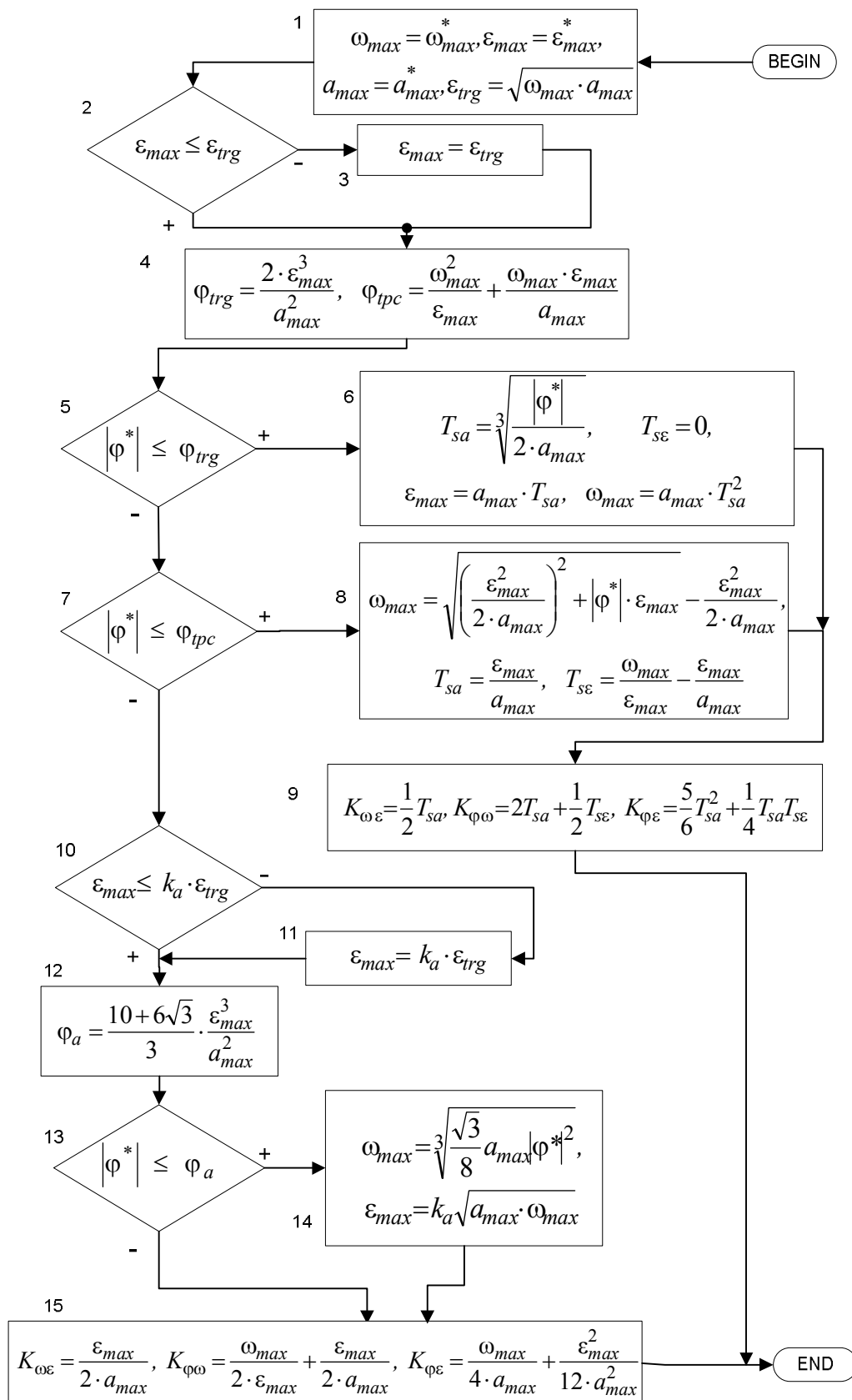


Рис. 4. Блок-схема узагальненого алгоритму

### Висновки

Розроблений алгоритм синтезу систем третього порядку формально не можна вважати інструментом їх оптимізації через не повну сумісність цієї задачі з узятим за мету забезпеченням аперіодичного характеру ковзного режиму. Але така несумісність притаманна математичному апарату методу N-і перемикачів при співвідношеннях параметрів, властивих більшості систем лише на частині діапазону зміни регульованої координати, на якій аперіодизація ковзного режиму спричиняє несуттєву втрату швидкодії відносно оптимальної. Отже, результатом застосування даного алгоритму у більшості практично значущих випадків є оптимальна за швидкістю система третього порядку із аперіодичним входженням у ковзний режим.

### Список використаної літератури

1. Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. High-speed precision motion control. CRC press, 2017. 324 pp.
2. Электротехнический справочник: в 3 т. М.: Энергоатомиздат, 1988. Т.3: в 2 кн. Кн.2 : Использование электрической энергии / под общ ред. Н. И. Орлова и др. 616 с.
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. Садовой А. В., Сухинин Б. В., Сохина Ю. В., Дерез А. Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами : монография. Днепропетровск : ДГТУ, 2011. 337 с.
6. Садовой А. В., Дерез А. Л. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N-і переключений. *Вестник НТУ ХПИ. Электротехника, электроника, электропривод. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* Харьков, 2005. № 45. С. 71–73.
7. Садовой А. В., Дерез А. Л. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N-і переключений. *Вестник КПТУ.* Кременчуг, 2006. Вып. 3/2006 (38). С. 21–22.
8. Садовой А. В., Дерез А. Л. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепропетровск, 2007. Вып. 8. С. 140–144.
9. Дерез А. Л. Синтез квазиоптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП с аперіодическим входжением в скользящий режим. *Научные труды ДонТУ. Электротехника и энергетика.* Донецк, 2007. Вып. 7 (128). С. 72–75
10. Дерез А. Л., Садовой А. В. Оптимизация по быстродействию позиционного электропривода методом N-і переключений в контексте теоремы об N интервалах. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепропетровск, 2013. Вып. 3 (23). С. 93–97.
11. Дерез А. Л., Садовой А. В., Сохина Ю.В. Обеспечение аперіодического скользящего режима системы подчиненного регулирования положения переносом точек переключения релейных регуляторов. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепропетровск, 2015. Вып. 1 (26). С. 97–102.
12. Садовой А. В., Дерез А. Л. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N-і переключений. *Сборник научных трудов ДГТУ. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* Днепропетровск, 2007. С. 420–422.
13. Садовой А. В., Дерез А. Л. Оптимизация по быстродействию методом N-і переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода. *Вестник КПТУ.* Кременчуг 2007. Выпуск 3/2007 (44). С. 15–17.
14. Дерез А.Л., Садовой А.В. Адаптация системы оптимального по быстродействию управления позиционным электроприводом к изменению формы переходной траектории. *Электротехнические и компьютерные системы.* Київ : Техника, 2014. № 15 (91). С. 72–74.

15. Дерет А. Л., Садовой А. В. Алгоритм самонастройки релейной системы подчинённого регулирования положения на формирование предельно-апериодического переходного процесса. *Сборник научных трудов ДГТУ. Днепродзержинск, 2014. Вып. 2 (25). С. 116–121.*

## ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF QUASI-OPTIMAL IN SPEED THIRD-ORDER SYSTEMS WITH APERIODIC SLIDING MODE

Derets O., Sadovoi O., Derets H.

### Abstract

The relevance of the work is due to the growing requirements for the dynamic characteristics of electric drives. In particular, together with the requirements of ensuring high accuracy and maximum at given speed limits, a typical task of designing such systems is the mandatory formation of transition diagrams in the form of monotonic time functions.

The purpose of this study is to develop an adaptive algorithm for the synthesis of the third-order sliding mode control systems based on the method of N-i switching. Changing the shape of transient trajectory depends on the magnitude of the movement, which requires adaptation of the settings of the control system of the electric drive to the features of the current positioning mode.

On the basis of the N-i switching method, an algorithm for synthesizing the parameters of a relay control system with cascade-subordinated structure, ensures non-oscillatory initiation of a sliding mode at various positioning modes, has been created. It is constructed by integrating the results of a number of previous works, in which the synthesis of relay control systems based on the analysis of the roots of the sliding equation of the position regulator is performed. This algorithm cannot be formally considered as an optimization tool due to the incompatibility of this problem with the aperiodization taken as the purpose, which comes about for certain forms of transient trajectories. But for such cases, the loss of performance relatively optimal one is negligible. Thus, the result of the application of the proposed algorithm in most practically significant cases is an optimal third-order system with aperiodic entry into the sliding mode. When controlling the electric drive, such a system will ensure the monotonous nature of the movement of the working body of the electromechanical system. The developed block diagram is focused on the practical implementation of the algorithm by the software of controllers of precision electric drives.

### References

- [1] Yamaguchi T., Hirata M., Pang JCK. (2017). *High-speed precision motion control*. CRC press.
- [2] *Elektrotekhnicheskii spravochnik: v 3 t. [Electrotechnical reference book: in 3 volumes]*. (1988). V.3: in 2 books. Book 2: The use of electrical energy. Orlova, N.I. and others. (Eds.). Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
- [3] Pontryagin, L.S., Boltyansky, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F. (1961) *Matematicheskaya 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] 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]*. Dneprodzержинsk: DSTU [in Russian].
- [6] Sadovoy, A.V., Derets, A.L. (2005). Parametricheskii sintez pozitsionnykh releynykh sistem podchinennogo regulirovaniya metodom N-i pereklyucheniy [Parametric synthesis of positional subordinated relay systems control by the method of N-i switching]. *Vestnik NTU KhPI. Elektrotehnika, elektronika, elektroprivod. Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Bulletin of NTU KhPI. Electrical engineering, electronics, electric drive. Problems of an automated electric drive. Theory and practice, 45, 71–73*. Kharkov: KhPI [in Russian].



- [7] 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].
- [8] Sadovoy, A.V., Derets, A. L. (2007). Analiz kharaktera skolzyashchego rezhima optimalnoy po bystrodeystviyu pozitsionnoy releynoy SUEP [Analysis of the nature of the sliding mode of the optimal in speed positional relay SUEP]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 8, 140–144. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [9] Derets, A.L. (2007). Sintez kvazioptimalnoy po bystrodeystviyu pozitsionnoy releynoy SUEP s aperiodicheskim vkhozhdeniem v skolzyashchiy rezhim [Synthesis of a positional relay SUEP, quasi-optimal in speed, with aperiodic entry into a sliding mode]. *Nauchnyye trudy DonTU. Elektrotehnika i energetika – Scientific works of DonTU. Electrical engineering and power engineering*, 7 (128), 72–75. Donetsk: DonTU [in Russian].
- [10] Derets, A.L., Sadovoy, A.V. (2013). Optimizatsiya po bystrodeystviyu pozitsionnogo elektroprivoda metodom N-i pereklyucheniya v kontekste teoremy ob N intervalakh [Optimization in speed of a positional electric drive by the method of N-i switching in the context of the theorem on N intervals]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 3 (23), 93–97. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [11] Derets, A.L., Sadovoy, A.V., Sokhina, Yu.V. (2015). Obespecheniye aperiodicheskogo skolzyashchego rezhima sistemy podchinonnoy regulirovaniya polozheniya perenosom tochek pereklyucheniya releynykh regulyatorov [Providing aperiodic sliding mode of the subordinated position control system by transferring switching points of relay controllers]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 1 (26), 97–102. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [12] Sadovoy, A.V., Derets A.L. (2007). Optimizatsiya po bystrodeystviyu rezhimov srednikh peremeshcheniy pozitsionnykh releynykh SUEP metodom N-i pereklyucheniya [Optimization in speed of the modes of middle displacements of positional relay EDCS by the method of N-i switching]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU. Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika – Collection of scientific works of DSTU. Problems of an automated electric drive. Theory and practice*, 420–422. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [13] Sadovoy, A.V., Derets, A.L. (2007). Optimizatsiya po bystrodeystviyu metodom N-i pereklyucheniya rezhimov malyykh peremeshcheniy pozitsionnogo elektroprivoda [Optimization in speed by method of N-i switching of small displacements modes of a positional electric drive]. *Vestnik KGPU – Bulletin of KSPU*, 3/2007 (44), 15–17. Kremenchug: KGPU [in Russian].
- [14] Derets, A.L., Sadovoy, A.V. (2014). Adaptatsiya sistemy optimalnogo po bystrodeystviyu upravleniya pozitsionnym elektroprivodom k izmeneniyu formy perekhodnoy trayektorii [Adaptation of the system of optimal speed control of a positional electric drive to a change in the shape of the transition trajectory]. *Elektrotekhnicheskiye i komp'yuternyye sistemy – Electrical and computer systems*, 15 (91), 72–74. Kiev: Tekhnika [in Russian].
- [15] Derets, A.L., Sadovoy, A.V. (2014). Algoritm samonastroyki releynoy sistemy podchinonnoy regulirovaniya polozheniya na formirovaniye predelno-aperiodicheskogo perekhodnogo protsessa [Algorithm of self-tuning of the relay system of the subordinate position control for the formation of a maximum-aperiodic transient process]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 2 (25), 116–121. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].