

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.13

УДК 62-83

О.Л. Дерець¹, к.т.н., доцент, ald_dstu@i.ua

Г.О. Дерець¹, студентка, hanna.derets@gmail.com

О.В. Садовой², д.т.н., професор, sadovoyav@ukr.net

¹ Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

² Національний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ, СИНТЕЗОВАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АПЕРІОДИЧНОГО КОВЗНОГО РЕЖИМУ

Актуальність роботи продиктована невідомим зростанням вимог до динамічних характеристик електроприводів. Метою дослідження є експериментальне підтвердження ефективності розроблених засобів оптимізації за швидкодією релейних систем керування з властивістю аперіодичного входження в ковзний режим. З використанням створеного на основі методу N–i перемикачів чисельного алгоритму здійснено серію дослідів із синтезу параметрів та дослідження динамічних режимів релейних систем підпорядкованого керування. Результати досліджень засвідчують неколивальний характер руху синтезованих релейних систем при входженні у ковзний режим при різних режимах позиціонування.

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

The relevance of the work is dictated by the continuous increase in the requirements for the dynamic characteristics of electric drives. The purpose of the study is to experimental confirmation of the effectiveness of the developed optimization tools for the speed of relay control systems with the act of aperiodic entry into the sliding mode. Using the numerical algorithm created on the basis of the N-i switching method, a series of experiments on the synthesis of parameters and the study of dynamic modes of relay subordinate control systems was carried out. The results of studies indicate the unoscillative nature of the movement of synthesized relay systems when entering sliding mode with various positioning modes.

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

Постановка проблеми

До електромеханічних систем регулювання положення висуваються жорсткі вимоги [1] не лише стосовно точності відтворення заданого положення, але й до форми перехідних процесів. Типовою задачею [2] проектування позиційних електроприводів є неодмінне забезпечення аперіодичного характеру руху виконавчого органу, здійснюваного з граничною при заданих обмеженнях швидкодією. Ці вимоги є суперечливими і більшість відомих методів структурно-алгоритмічного синтезу [3, 4] не забезпечують їх одночасного виконання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Одним з ефективних розв'язків даної проблеми є застосування систем розривного керування [3, 4]. Завдяки ковзним режимам релейних регуляторів такі системи здобувають низку вкрай важливих структурних властивостей, а саме граничність та швидкодію при низькій чутливості до збурюючих дій [2]. За своєю природою ковзні режими є автоколивальними, але така риса притаманна руху систем лише при малих відхиленнях від стану рівноваги [4], тоді як перехідним процесам в цілому можна надавати бажаного характеру, зокрема аперіодичного, завдяки застосуванню спеціальних засобів синтезу. До них належить метод N–i перемикачів [2, 5], який дозволяє без розв'язання варіаційних задач здійснити одночасну оптимізацію за точністю та швидкодією за рахунок використання як параметричних, так і структурних рішень [5–9]. На основі його математичного апарату [10–13] розроблені [14, 15] засоби формування гранично-аперіодичних перехідних процесів шляхом модифікації рівнянь ковзання релейних регуляторів систем третього порядку для різних випадків розрахункових діаграм.

Формулювання мети дослідження

Створення єдиного інструменту синтезу систем з бажаною формою часових діаграм на основі робіт [5—13] у формі узагальненого чисельного алгоритму [14] дозволяє визначати налаштування регуляторів для усього діапазону можливих переміщень. Метою даного дослідження є експериментальна перевірка ефективності створеної методики аперіодизації перехідних процесів релейних систем.

Виклад основного матеріалу

Згідно з методом N-ї перемикачів, при оптимізації системи керування за швидкодією будь-який об'єкт керування третього порядку представляється у формі нейтрально-стійкого динамічного об'єкта, утвореного ланцюгом з трьох інтеграторів

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon \\ p\varepsilon &= a \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Використання для позначення координат в узагальненому описі системи керування символів φ , ω , ε , a , які традиційно вживаються для кутових положення, швидкості, прискорення та ривка виконавчого валу позиційного електропривода дає можливість прямого запозичення результатів синтезу параметрів системи регулювання положення та спрощує посилання на результати відповідних робіт, присвячених розвитку даного метода синтезу.

Для оптимального керування динамічним об'єктом (1) застосовується каскад з трьох регуляторів, що описується системою рівнянь

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

де φ^* — вхідний задавальний вплив, ω^* , ε^* , a^* — сформовані регуляторами завдання проміжних координат, $K_{\varphi\omega}$, $K_{\varphi\varepsilon}$ — коефіцієнти зворотних зв'язків регулятора R_φ за швидкістю й прискоренням, $K_{\omega\varepsilon}$ — коефіцієнт зворотного зв'язку регулятора R_ω за прискоренням.

Подвійна індексація регуляторів $R_1 = R_\varphi$, $R_2 = R_\omega$, $R_3 = R_\varepsilon$ вказує номером на положення їх в каскаді (2) або символом на регульовану ними координату залежно від контексту. У такій системі вихідна величина $u_{R\varphi}$ регулятора R_φ є задавальним впливом для регулятора R_ω . У свою чергу, вихідний сигнал $u_{R\omega}$ регулятора R_ω є заданим значенням координати ε . На виході регулятора R_ε формується керуючий вплив $u_{R\varepsilon}$. Амплітуди сигналів регуляторів ω_{max} , ε_{max} , a_{max} є рівнями обмеження похідних регульованої координати, які для реальних об'єктів керування визначаються за граничними характеристиками їх режимів функціонування.

Синтез параметрів $K_{\varphi\omega}$, $K_{\varphi\varepsilon}$, $K_{\omega\varepsilon}$ каскаду регуляторів (2) методом N-ї перемикачів у вигляді аналітичних функцій рівнів обмежень, виконаний для різних форм перехідних траєкторій системи третього порядку в роботах [5—13], уможливує забезпечення умов формування перехідних процесів з аперіодичним входженням системи у ковзний режим завдяки розробці узагальненого чисельного алгоритму, блок-схема якого наведена в роботі [14]. Розглянемо роботу цього алгоритму на прикладі синтезу систем керування нейтрально-стійким об'єктом керування (1), який не має від'ємних внутрішніх зв'язків на відміну від реальних електромеханічних систем. Це дозволяє найбільш переконливо продемонструвати ефективність створеного алгоритму аперіодизації на тлі відсутності власної збіжності перехідних процесів об'єкта керування. У наведених далі дослідях числові дані для задавального впливу та рівнів обмежень не прив'язані до конкретної технічної системи і підібрані з умов інформативності графіків перехідних процесів.

Виконаємо дослідження системи (1), (2) для випадку $\varphi^* = 0,04$; $\omega_{max} = 0,4 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon_{max} = 10 \text{ c}^{-2}$; $a_{max} = 500 \text{ c}^{-3}$. Таке співвідношення рівнів обмежень є несприятливим для формування гранично-аперіодичного перехідного процесу згідно з результатами роботи [10]. Для цих даних узагальненим алгоритмом синтезу [14] виконується послідовність блоків 1, 2, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 15. При цьому початковий рівень прискорення підлягає коригуванню у блоці 11 для забезпечення аперіодичного входження R_φ в ковзний режим, а решта обмежень лишаються незмінними. Даний випадок відповідає трапецієподібним часовим діаграмам швидкості та прискорення (рис. 1).

Зауважимо, що на всіх рисунках діаграми сигналів регуляторів наведені у відносних одиницях з масштабом, який відповідає положенню регуляторів у ієрархії каскаду (2). Темні прямокутні області цих діаграм відповідають інтервалам існування ковзних режимів, їх суцільне заповнення виникає внаслідок злиття зображень прямокутних імпульсів, які мають високу частоту. Крім того, у рамках показані збільшені у 10 разів за амплітудою фрагменти діаграм кінцевої стадії перехідних процесів зі збереженням їх прив'язки до осі часу.

У досліджуваному перехідному процесі регулятори каскаду (2) функціонують згідно з правилом N-ї перемикач [5], а вигляд кінцевих ділянок часових діаграм усіх координат свідчить про гранично-аперіодичний характер перехідного процесу. З урахуванням виконаної корекції рівня прискорення у бік зменшення можна стверджувати, що застосуванням пропонованого алгоритму синтезу досягається квазіоптимальність системи за швидкодією.

Далі дослідимо ситуації зменшення задавального впливу при збереженні допустимих рівнів обмежень проміжних координат. Це спричинятиме зміну форми перехідної траєкторії та потягне за собою автоматичну зміну алгоритмом синтезу [14] розрахункових максимумів проміжних координат при налаштуванні регуляторів на ці траєкторії.

Виконаємо дослідження системи (1), (2) для випадку $\varphi^* = 0,02$; $\omega_{max} = 0,4 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon_{max} = 10 \text{ c}^{-2}$; $a_{max} = 500 \text{ c}^{-3}$. Для цих даних узагальненим алгоритмом синтезу виконується послідовність блоків 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9. При цьому початковий рівень обмеження швидкості піддається корекції. Даний випадок відповідає режиму великого трикутника, якому притаманні трикутна діаграма швидкості та трапецієподібна часова діаграма прискорення, наведені на рис. 2. При використанні пропонованого обчислювального алгоритму [14] регулятор R_φ каскаду (2) функціонує згідно з теоремою про N інтервалів [4] завдяки перенесенню характерної точки перемикачання при його синтезі, що відображають формули, реалізовані блоком 9 алгоритму [14]. Завдяки зміні порядку взаємодії регуляторів вдається уникнути корекції максимального прискорення при забезпеченні дійсних коренів рівняння ковзання R_φ . Синтезовану в даному випадку систему слід характеризувати як оптимальну за швидкодією при заданих обмеженнях.

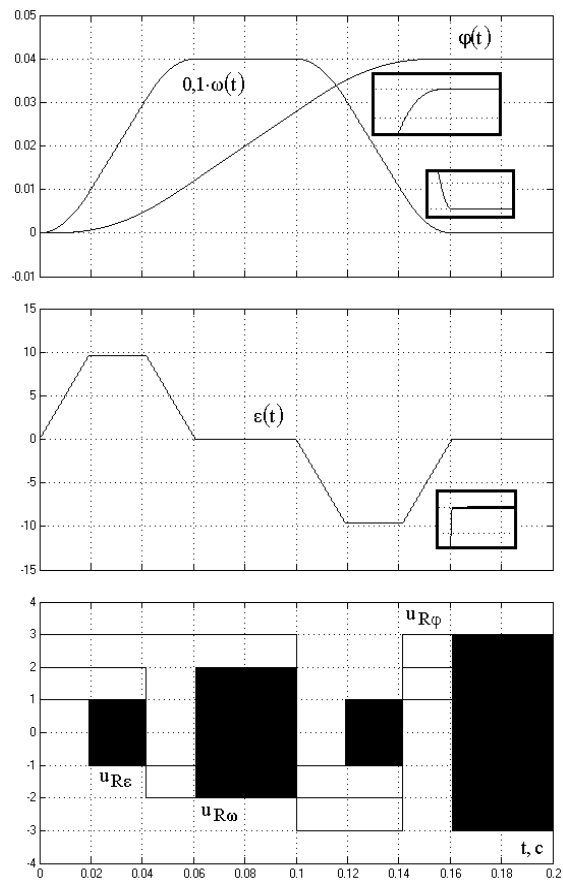


Рис. 1. Режим трапеції

У випадку $\varphi^* = 0,008$; $\omega_{max} = 0,4 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon_{max} = 10 \text{ c}^{-2}$; $a_{max} = 500 \text{ c}^{-3}$ узагальненим алгоритмом синтезу [14] виконується послідовність блоків 1, 2, 4, 5, 6, 9. При цьому початкові рівні обмежень як швидкості, так і прискорення піддаються корекції. Даний випадок відповідає режиму малого трикутника, тобто трикутним часовим діаграммам швидкості та прискорення, наведеним на рис. 3. Регулятори каскаду (2) функціонують згідно з теоремою про N інтервалів, реалізуючи оптимальний за швидкістю перехідний процес. Діаграми кінцевих стадій перехідних процесів наочно демонструють аперіодичний характер руху системи при входженні в ковзний режим регулятора вихідної координати R_φ .

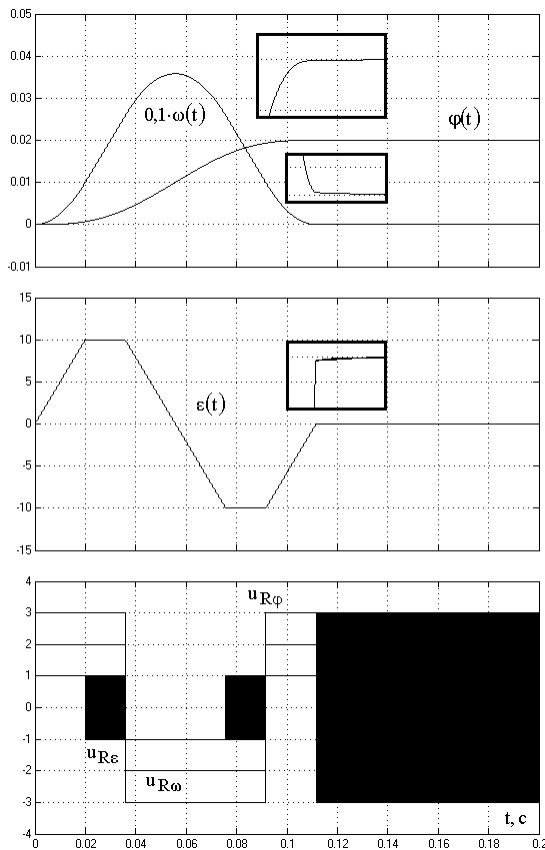


Рис. 2. Режим великого трикутника

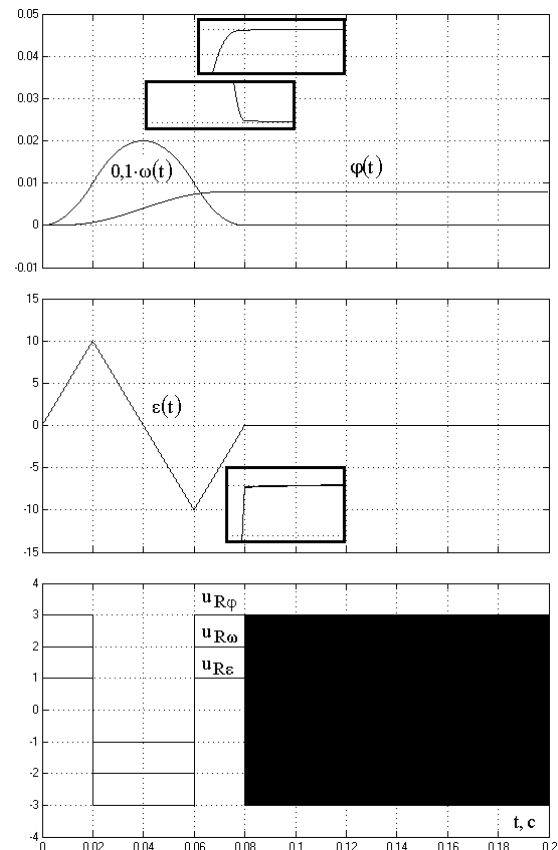


Рис. 3. Режим малого трикутника

На відміну від режиму трапеції, у двох останніх випадках (рис. 2, 3) аперіодичне входження R_φ в ковзний режим забезпечується без втрати швидкодії шляхом відмови від правила N -ї перемикач при виборі характерних точок перемикач каскадно-увімкнених регуляторів завдяки виродженню в нуль інтервалів стабілізації окремих координат в режимах великого та малого трикутників.

Виконаємо синтез і дослідження системи (1), (2) для випадку ще більш несприятливого поєднання початкових, тобто максимально допустимих рівнів обмежень $\omega_{max} = 0,4 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon_{max} = 10 \text{ c}^{-2}$; $a_{max} = 200 \text{ c}^{-3}$, які не можуть бути досягнуті на реальній траєкторії з $\varphi^* = 0,04$. При цьому послідовність виконуваних блоків алгоритму синтезу [14] має вигляд 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15. Співвідношення рівнів обмежень спершу спричиняє корекцію максимального прискорення з умови відтворюваності траєкторії в блоках 2, 3, що передбачає трикутну діаграму прискорення і створює передумову коливальності у ковзному режимі, тому відбувається подальше коригування максимального прискорення в блоках 10, 11 з метою аперіодизації ковзного режиму. Це викликає уповільнення перехідного процесу відносно оптималь-

ного за швидкодією. З урахуванням результатів корекції даний випадок відповідає трапецієподібним часовим діаграмам швидкості та прискорення, наведеним на рис. 4. Регулятори каскаду (2) функціонують згідно з правилом N-і перемикачів. З урахуванням виконаної подвійної корекції рівня прискорення у бік зменшення можна стверджувати, що застосуванням запропонованого алгоритму синтезу досягається квазіоптимальність системи за швидкодією при оновлених обмеженнях. Але підтверджуваний виглядом кінцевих ділянок часових діаграм аперіодичний характер перехідного процесу досягається ціною помітного зниження швидкодії.

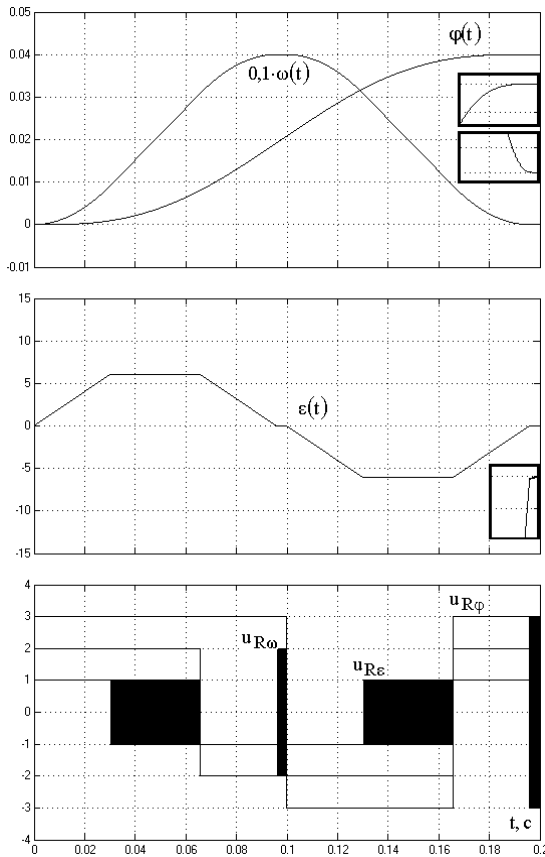


Рис. 4. Режим скоригованої трапеції

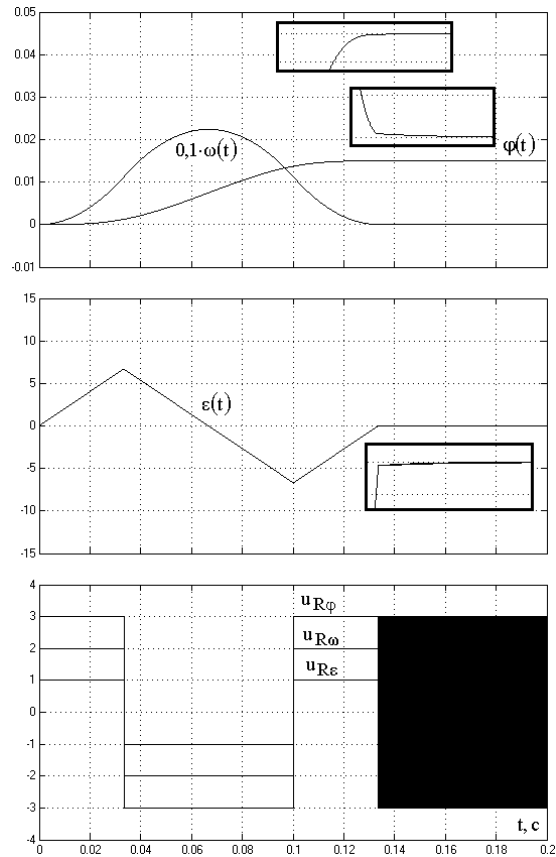


Рис. 5. Режим скоригованого трикутника

У випадку $\varphi^* = 0,015$; $\omega_{max} = 0,4 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon_{max} = 10 \text{ c}^{-2}$; $a_{max} = 200 \text{ c}^{-3}$ узагальненим алгоритмом синтезу [14] виконується послідовність блоків 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9. При цьому початкові рівні обмежень швидкості та прискорення піддаються корекції. Даний випадок відповідає трикутним часовим діаграмам швидкості та прискорення, наведеним на рис. 5. Діаграми кінцевих стадій перехідних процесів демонструють аперіодичний характер руху системи при входженні в ковзний режим регулятора вихідної координати R_φ . Регулятори каскаду (2) функціонують згідно з теоремою про N інтервалів завдяки відповідному розташуванню характерних точок, що дозволяє сформулювати трикутну діаграму прискорення без коливань в ковзному режимі.

Не обмежуючись ідеалізованим випадком, переконаємося в ефективності методу N-і перемикачів та алгоритму синтезу, який його реалізує, на прикладі системи керування реальним динамічним об'єктом третього порядку. Система диференціальних рівнянь динаміки позиційного електропривода [1, 5] постійного струму має вигляд

$$\left. \begin{aligned} p\varphi = \omega, \quad p\omega = \varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot (i - i_c) \\ p\varepsilon = a = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega / k_p}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

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, i, u — струм і напруга якірного кола. Сформований каскадом регуляторів (2) керуючий вплив, який для нейтрального об'єкта (1) має амплітуду a_{max} , до електромеханічної системи (3) прикладається з амплітудою u_{max} , яка визначається характеристиками силового перетворювача.

Виконаємо дослідження системи (3), (2), синтезованої для електродвигуна з параметрами та номінальними даними

$$R = 1 \text{ Ом}, c = 2 \text{ В} \cdot \text{с}, J = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, L = 0.1 \text{ Гн}, k_p = 1, i_n = 20 \text{ А}, \omega_n = 100 \text{ с}^{-1}, u_n = 220 \text{ В},$$

встановивши обмеження $i_{max} = 2i_n, \omega_{max} = \omega_n, u_{max} = 1.3u_n$, які відповідають максимумам канонічних координат $\omega_{max} = 100 \text{ с}^{-1}, \varepsilon_{max} = 800 \text{ с}^{-2}, a_{max} = 57200 \text{ с}^{-3}$. Виключимо з розгляду режими великих та середніх переміщень, звернувшись до режиму малого трикутника, у якому інтервали зміни струму є порівнянними із загальною тривалістю процесу позиціонування. При $\varphi^* = 0.3$, що відповідає режиму малого трикутника, узагальненим алгоритмом синтезу виконується послідовність блоків 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9.

При цьому початкові рівні обмежень швидкості та прискорення піддаються корекції. Загалом форма часових діаграм швидкості та прискорення на рис. 6 наближається до трикутної, типової для досліджуваного режиму позиціонування, хоча у деталях відрізняється від ідеальних трикутників, притаманних системі з нейтрально-стійким об'єктом керування, набуваючи на кінцевих ділянках форми криволінійних трикутників. Даний факт можна пояснити передчасним входженням R_φ у ковзний режим через дію внутрішніх зворотних зв'язків електромеханічної системи, засоби уникнення цього небажаного ефекту розглянуті в роботі [15]. Але основним спостереженням за результатами дослідження останнього варіанту системи керування є той факт, що діаграми кінцевих стадій перехідних процесів на рис. 6 засвідчують аперіодичний характер руху системи при малих відхиленнях від заданого положення, як і в попередніх випадках. Оскільки йдеться про рух системи у ковзному режимі R_φ , слід наголосити, що даний результат отримано не як бічний ефект [15] від дії внутрішніх зворотних зв'язків, а шляхом спрямованого синтезу [14] рівняння ковзання регулятора положення.

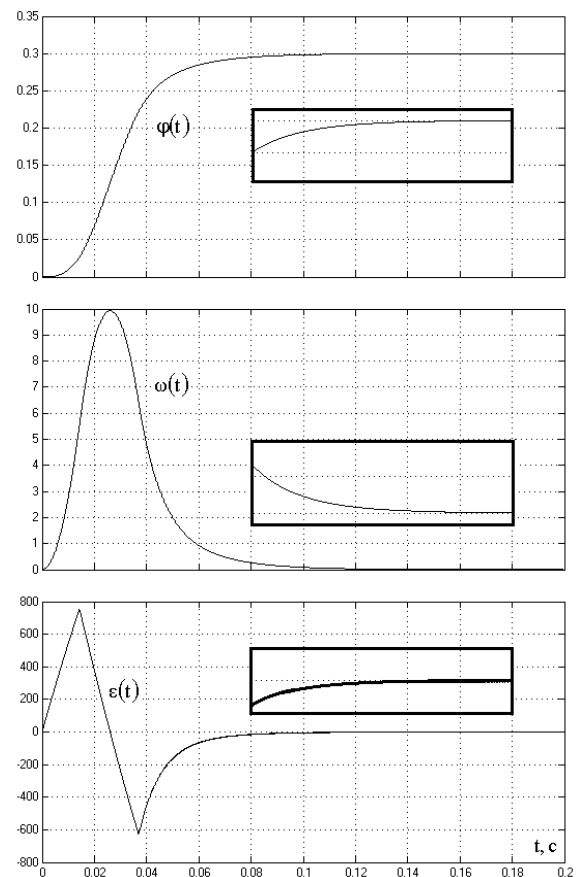


Рис. 6. Режим малого трикутника позиційного електропривода

Висновки

Виконане дослідження релейних систем третього порядку, синтезованих із використанням методу N -ї перемикань, охоплює усі можливі варіанти конфігурації перехідних траєкторій, створюваних шляхом корекції початкових обмежень канонічних координат систем з метою забезпечення аперіодичного ковзного режиму. Результати моделювання перехідних процесів підтверджують ефективність узагальненого алгоритму синтезу, викладеного у роботах [14, 15], якими поєднано окремі розв'язки [10 — 13] задачі формування гранично-аперіодичних перехідних процесів у системах, квазіоптимальних за швидкодією. Запорука універсальності методи-

ки синтезу, реалізованої створеним алгоритмом, полягає у формуванні бажаних характеристик саме ковзних режимів, у яких нівелюються особливості структури об'єктів керування.

Список використаної літератури

1. 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.
2. Садовой А. В., Сухинин Б. В., Сохина Ю. В., Дерез А. Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами : монография. Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. 337 с.
3. Понтягин 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., Дерез А. Л. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N–i переключений. *Вестник НТУ ХПИ. Электротехника, электроника, электропривод. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* Харьков, 2005. № 45. С. 71–73.
6. 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.
7. Садовой А. В., Дерез А. Л. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N–i переключений. *Сборник научных трудов ДГТУ. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика.* Днепродзержинск, 2007. С. 420–422.
8. Садовой А. В., Дерез А. Л. Оптимизация по быстродействию методом N–i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода. *Вестник КГПУ.* Кременчуг 2007. Выпуск 3/2007 (44). С. 15–17.
9. 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.
10. Садовой А. В., Дерез А. Л. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепродзержинск, 2007. Вып. 8. С. 140–144.
11. Дерез А. Л. Синтез квазиоптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП с апериодическим вхождением в скользящий режим. *Научные труды ДонТУ. Электротехника и энергетика.* Донецк, 2007. Вып. 7(128). С. 72–75
12. Дерез А. Л., Садовой А. В. Оптимизация по быстродействию позиционного электропривода методом N–i переключений в контексте теоремы об N интервалах. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепродзержинск, 2013. Вып. 3 (23). С. 93–97.
13. Дерез А. Л., Садовой А. В., Сохина Ю.В. Обеспечение апериодического скользящего режима системы подчиненного регулирования положения переносом точек переключения релейных регуляторов. *Сборник научных трудов ДГТУ.* Днепродзержинск, 2015. Вып. 1 (26). С. 97–102.
14. Дерезь О.Л., Садовой О.В. Дерезь Г.О. Алгоритм синтезу квазіоптимальних за швидкодією систем третього порядку із аперіодичним ковзним режимом. *Збірник наукових праць ДДТУ.* Кам'янське, 2021. Вип. 1 (38). С. 48–56.
15. Дерезь О. Л., Садовой О. В. Метод N–i перемикань у задачах оптимізації за швидкодією : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.

STUDY OF THIRD ORDER SYSTEMS SYNTHESISED USING THE ALGORITHM FOR PROVIDING APERIODIC SLIDING MODE**Derets O., Derets H., Sadovoi O.****Abstract**

The relevance of the work is dictated by the continuous growth of requirements for the dynamic characteristics of electric drives. A typical task of designing positional electric drives is the indispensable provision of the aperiodic nature of the movement of the executive body, which is carried out with a boundary speed for given restrictions. This requires the formation of transient diagrams by means of monotonic functions of time.

Creation of a single tool for the synthesis of systems with the desired form of timing diagrams based on the N-i switching method in the form of a generalized numerical algorithm allows you to determine the setting of the controllers for the entire range of displacements. It is obliged to ensure the aperiodic nature of transitional actions in third-order control systems. The aim of the study is to experimentally test the effectiveness of the developed technique for aperiodization of dynamic regimes.

Synthesis of the parameters for the sliding control system with a cascade structure, which has non-oscillatory entry into the sliding mode was performed for different positioning modes. This problem was solved by integrating the results of the previous works of the authors concerning the synthesis in the analytical form of settings for third-order systems for working out individual forms of trajectories. As a result, a complex tool for structural-algorithmic synthesis was created, which ensures the consistent application of partial solutions. The novelty of this work lies in obtaining the transient characteristics of typical dynamic modes as a result of a series of numerical experiments and in proving their limiting aperiodic nature.

An analysis of the experimental data for the cases of a neutrally stable control object and an electromechanical system has been carried out. The performed study of third-order relay systems synthesized using the N-i switching method covers all possible options for the configuration of transition trajectories created by correcting the initial constraints of the canonical coordinates of the systems in order to ensure aperiodic entry into the sliding mode. The studied optimal control systems form transient processes with the desired character, which indicates the effectiveness of the created algorithm.

References

- [1] *Elektrotekhnicheskiiy 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].
- [2] Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V., Sokhina, Yu. V., Derets A.L. (2011) *Releynnye sistemy optimal'nogo upravleniya elektroprivodami [Relay systems of optimal control of electric drives].* Dneprodzerzhinsk: DSTU [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., Derets, A. L. (2005). Parametricheskiiy 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].
- [6] Sadovoy, A. V., Derets, A. L. (2006). Ratsionalnoye ogranicheniye uskoreniya elektroprivodov, sinteziruyemykh metodom N-i pereklyucheniy [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].
- [7] 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].
- [8] Sadovoy, A. V., Derets, A. L. (2007). Optimizatsiya po bystrodeystviyu metodom N–i pereklyucheniya rezhimov malykh 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].
- [9] 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].
- [10] 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].
- [11] Derets, A.L. (2007). Sintez kvazioptimalnoy po bystrodeystviyu pozitsionnoy releynoy SUEP s aperiodicheskim vkhozheniyem v skolzyashchiy rezhim [Synthesis of a positional relay SUEP, quasi-optimal in speed, with aperiodic entry into a sliding mode]. *Nauchnyye trudy DonTU. Elektrotekhnika i energetika – Scientific works of DonTU. Electrical engineering and power engineering*, 7 (128), 72-75. Donetsk: DonTU [in Russian].
- [12] 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].
- [13] Derets, A. L., Sadovoy, A. V., Sokhina, Yu. V. (2015). Obespecheniye aperiodicheskogo skolzyashchego rezhima sistemy podchinonnoy regulirovaniya polozheniya perenosom toчек 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].
- [14] Derets, O. L., Sadovoy, O. V., Derets, H. O. (2021). Alhorytm syntezy kvazioptymalnykh za shvydkodiyeyu system tretioho poriyadku iz aperiodychnym kovznym rezhymom [Algorithm for the synthesis of quasi-optimal third-order systems with aperiodic sliding mode]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scientific works of DSTU*, 1 (38), 48-56. Kamyanske: DDTU [in Ukrainian].
- [15] Derets, O. L., Sadovoy, O. V. (2021) *Metod N–i peremykan u zadachakh optymizatsiyi za shvydkodiyeyu [N – i switching method in speed optimization problems]*. Kamyanske: DDTU [in Ukrainian].