

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.13

УДК 62-83

О.Л. Дерещ¹, к.т.н., доцент, ald_dstu@i.ua

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

Є.Ю. Нарушевич¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

М.А. Галькевич¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

Р.К. Куманьов¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

²Національний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ПРУЖНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

Системи модального керування мають задані перехідні характеристики, але не є оптимальними за будь-яким критерієм. Тому актуальним є розподіл коренів для синтезу релейно-модальних регуляторів з характеристиками, близькими до оптимальних за швидкодією, реалізований на основі методу $N-i$ перемикань. Метою роботи є оцінка досягнутих у такий спосіб показників якості перехідних процесів та корекція їх на основі емпіричних даних. Порівняльне дослідження динамічних режимів дозволяє знайти засоби для досягнення максимально високих характеристик у релейно-модальних системах керування четвертого порядку. Перспектива практичного застосування результатів роботи полягає в їх інтеграції в адаптивні алгоритми параметричного синтезу цифрових контролерів.

Ключові слова: релейно-модальна система керування; метод $N-i$ перемикань; перехідний процес; оптимальність за швидкодією.

Modal control systems have given transient characteristics, but are not optimal according to any criterion. Therefore, the pole placement for the synthesis of relay-modal controllers with characteristics close to optimal in terms of speed, implemented on the basis of the $N-i$ switching method, is relevant. The aim of the study is the estimation of achieved performance indexes and correction of the transients based on empirical data. A comparative study of dynamic modes allows finding means to achieve the highest possible performance in relay-modal fourth-order control systems. The prospect of practical application of the results of the work lies in their integration into adaptive algorithms for parametric synthesis of digital controllers.

Keywords: relay-modal control system; $N-i$ switching method; transient; optimality in speed.

Постановка проблеми

Модальне керування належить до методів [1, 2], які заміщають складні процедури строгої оптимізації [3—5] при проектуванні прецизійних електромеханічних систем. Такий підхід до задач синтезу особливо актуальний для систем із пружними кінематичними ланками [1], які мають порівняно високий порядок і за своєю природою схильні до коливальності [1, 6]. Однак значне спрощення обчислювальних процедур у сполученні з визначенням характером руху модальних систем [1, 2] досягаються ціною значного відхилення від оптимальних перехідних характеристик через опосередкованість взаємозв'язку бажаних показників якості керування й призначуваних коренів характеристичних рівнянь. В умовах обмеження проміжних координат, реалізованих системами підпорядкованого регулювання, вищеописана проблема ускладнюється нелінійним характером перехідних траєкторій на більшій частині їхньої протяжності [7, 8], що утрудняє як аналіз динаміки, так і синтез стійких алгоритмів керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Застосування релейних систем керування [1, 2, 5, 7] забезпечує комплексне розв'язання задачі керування пружними об'єктами [7—10]. Насамперед, зниження порядку характеристичного рівняння в ковзному режимі на одиницю важливе для систем четвертого й п'ятого порядків [8]. Незалежність ковзних режимів регуляторів від стану внутрішніх контурів керування допускає декомпозицію комплексної задачі синтезу цілісних систем підпорядкованого регулю-

вання на декілька більш простих підзадач синтезу окремих регуляторів [8, 11, 12], що досить актуально для багатоконтурних систем. Задача обґрунтованого призначення коренів характеристичних рівнянь при синтезі релейних систем керування електроприводами отримує ефективне розв'язання [11] на основі методу N-і перемикачів [7, 8, 12]. Цей метод встановлює чіткий зв'язок між параметрами оптимальної за швидкодією системи, яка має каскадну структуру, і рівнями обмежень змінних стану [8—11]. Знайдені з його застосуванням аналітичні вирази для коефіцієнтів зворотного зв'язку систем оптимального керування близькі до виразів для коефіцієнтів зворотного зв'язку модальних систем керування. Це дозволяє максимально зблизити перехідні характеристики модальних й оптимальних релейних систем [11]. Неповна відповідність параметрів оптимальних і модальних регуляторів може бути успішно скомпенсована на основі емпіричних даних, як показано в роботах [12—15] на прикладі систем третього порядку.

Формулювання мети дослідження

На відміну від випадку строгої оптимізації [7], при синтезі релейно-модальних систем математичний апарат методу N-і перемикачів допускає цілеспрямовану корекцію перехідних характеристик [11, 12]. Метою даної роботи є порівняльне дослідження систем четвертого порядку, синтезованих при послідовній варіації динамічних параметрів, що дозволить визначити умови досягнення близької до оптимальної швидкодії разом з аперіодичним характером перебігу процесів як при відпрацюванні задавального впливу, так і при реакції на збурювання.

Виклад основного матеріалу

Система диференціальних рівнянь руху двомасової електромеханічної системи без в'язкого тертя в пружному елементі має вигляд [8]

$$\left. \begin{aligned} p\Omega &= \frac{M_n}{J} \\ pM_n &= C_{жс} (k_p \omega_{\partial\partial} - \Omega); \\ p\omega_{\partial\partial} &= \frac{M_{\partial\partial} - k_r M_n}{J_{\partial\partial}} \\ pM_{\partial\partial} &= c \cdot \frac{u - R \cdot M_{\partial\partial} / c - c \cdot \omega_{\partial\partial}}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де $p = d / dt$ — символ диференціювання за часом, $\Omega, \omega_{\partial\partial}, M_n, M_{\partial\partial}$ — відповідно кутові швидкості виконавчого вала й вала електричної машини постійного струму, пружний момент і електромагнітний момент двигуна, u — напруга силового перетворювача; k_p — коефіцієнт передачі редуктора, R — опір якірного кола, L — індуктивність якірного кола, J — момент інерції робочого органа, $J_{\partial\partial}$ — момент інерції двигуна, $C_{жс}$ — коефіцієнт жорсткості, $c = k\Phi$, k — конструктивний коефіцієнт, Φ — магнітний потік.

Метод N-і перемикачів допускає заміну електромеханічної системи (1) при синтезі регуляторів на нейтрально-стійкий об'єкт четвертого порядку, описуваний системою рівнянь [8]

$$p\Omega = \varphi, \quad p\varphi = \omega, \quad p\omega = \varepsilon, \quad p\varepsilon = a, \quad (2)$$

де a — ривок виконавчого вала.

Каскад релейних регуляторів, які забезпечують регулювання вихідної координати Ω системи (2) і обмеження її старших похідних $\varphi, \omega, \varepsilon$, описується системою рівнянь [8—11]

$$\left. \begin{aligned} u_{R1} = u_{R\Omega} = \varphi^* &= \varphi_{max} \cdot \text{sign}(\Omega^* - \Omega - K_{\Omega\varphi} \cdot \varphi - K_{\Omega\omega} \cdot \omega - K_{\Omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R2} = u_{R\varphi} = \omega^* &= \omega_{max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R3} = u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R4} = u_{R\varepsilon} = a^* &= a_{max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де K_{ij} — коефіцієнти зворотних зв'язків; нижній індекс "max" позначає обмеження відповідних координат; символ * позначає задані значення величин: як вхідне, так і сформовані регулятори для підпорядкованих їм контурів регулювання.

Подвійна індексація регуляторів $R_1 = R_\Omega$, $R_2 = R_\varphi$, $R_3 = R_\omega$, $R_4 = R_\varepsilon$ указує на їхнє положення в каскаді (3) або на регульовану ними координату. При керуванні об'єктом (1) регулятор $R_4 = R_\varepsilon$ генерує сигнал з амплітудою u_{max} , цей сигнал відтворюється швидкодіючим силовим перетворювачем як напруга, яка прикладається до якорного кола u .

Каскад (3) забезпечує оптимальне за швидкодією керування електромеханічною системою (1) або нейтрально-стійким динамічним об'єктом (2) при синтезі коефіцієнтів K_{ij} методом N-і перемикачів [8]

$$\begin{aligned} K_{\Omega\varphi} &= \frac{1}{2}(T_\omega + T_\varepsilon + T_a), K_{\Omega\omega} = \frac{1}{4}(T_\omega T_\varepsilon + T_\varepsilon T_a + T_\omega T_a) + \frac{1}{12}(T_\varepsilon^2 + T_a^2), \\ K_{\Omega\varepsilon} &= \frac{1}{8}T_\omega T_\varepsilon T_a + \frac{1}{24}(T_\omega T_a^2 + T_\varepsilon T_a^2 + T_\varepsilon^2 T_a), K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}(T_a + T_\varepsilon), K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}T_a T_\varepsilon + \frac{1}{12}T_a^2, K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}T_a. \end{aligned} \quad (4)$$

Сталі часу замкнутої системи залежать від реалізованих нею обмежень координат

$$T_\omega = \frac{\varphi_{max}}{\omega_{max}}, \quad T_\varepsilon = \frac{\omega_{max}}{\varepsilon_{max}}, \quad T_a = \frac{\varepsilon_{max}}{a_{max}}. \quad (5)$$

Квазіоптимальне за швидкодією керування електромеханічною системою (1) забезпечується каскадом (3), синтезованим як релейно-модальні регулятори [11] шляхом підстановки у формули Вієта половинних значень сталих часу (5)

$$\begin{aligned} K_{\Omega\varphi} &= \frac{1}{2}(T_\omega + T_\varepsilon + T_a)\gamma_\Omega, K_{\Omega\omega} = \frac{1}{4}(T_\omega T_\varepsilon + T_\varepsilon T_a + T_\omega T_a)\gamma_\Omega^2, K_{\Omega\varepsilon} = \frac{1}{8}T_\omega T_\varepsilon T_a \gamma_\Omega^3, \\ K_{\varphi\omega} &= \frac{1}{2}(T_a + T_\varepsilon)\gamma_\varphi, K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}T_a T_\varepsilon \gamma_\varphi^2, K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}T_a, \end{aligned} \quad (6)$$

що зумовлює подібність виразів (4) та (6).

При цьому сталі часу (5) оптимальної системи керування коригуються за допомогою множників γ , які забезпечують рівність коефіцієнтів при старших похідних $K_{\varphi\varepsilon}$, $K_{\Omega\varepsilon}$ у виразах (4) та (6)

$$\gamma_\varphi = \sqrt{\frac{T_a T_\varepsilon + \frac{1}{3}T_a^2}{T_a T_\varepsilon}}, \quad \gamma_\Omega = \sqrt[3]{\frac{T_\omega T_\varepsilon T_a + \frac{1}{3}(T_\omega T_a^2 + T_\varepsilon T_a^2 + T_\varepsilon^2 T_a)}{T_\omega T_\varepsilon T_a}}. \quad (7)$$

Формули (7) обґрунтовані в роботі [11] недопущенням пізнього входження регуляторів у ковзний режим у порівнянні з оптимальним за швидкодією процесом, іншими словами — недопущенням перерегулювань. Однак таке обґрунтування не є аналітично строгим, а його результат — єдино прийнятним. Ця обставина допускає варіювання коефіцієнтів (7) з метою пошуку способів поліпшення динамічних характеристик релейно-модальних систем на основі їх емпіричного порівняння, що і є метою даної роботи.

Розглянемо об'єкт керування (1), який має наступні параметри:

$$R = 1,48 \text{ Ом}, L = 0,05 \text{ Гн}, J_m = 0,07 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, J = 0,007 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (8)$$

$$\omega_{mn} = 104,7 \text{ с}^{-1}, U_n = 220 \text{ В}, I_n = 14,1 \text{ А}, C_{жс} = 6 \text{ Н} \cdot \text{м}, k_p = 1.$$

Їм відповідають такі обмеження похідних швидкості порядку 1 — 4 у позначеннях (2)

$$\varphi_{max} = 766 \text{ с}^{-2}, \omega_{max} = 13464 \text{ с}^{-3}, \varepsilon_{max} = 656620 \text{ с}^{-4}, a_{max} = 87348000 \text{ с}^{-5}. \quad (9)$$

Ці обмеження визначають частину параметрів каскаду (3) безпосередньо, а також є вихідними даними для синтезу коефіцієнтів зворотних зв'язків як оптимальних регуляторів за формулами (5), (4)

$$K_{\Omega\varphi} = 0,0425c, K_{\Omega\omega} = 0,000477c^2, K_{\Omega\varepsilon} = 1,41 \cdot 10^{-6}c^3, \quad (10)$$

$$K_{\varphi\omega} = 0,01401c, K_{\varphi\varepsilon} = 0,0000432c^2, K_{\omega\varepsilon} = 0,00376c,$$

так і модальних регуляторів за формулами (7), (6)

$$K_{\Omega\varphi} = 0,046c, K_{\Omega\omega} = 0,000517c^2, K_{\Omega\varepsilon} = 1,41 \cdot 10^{-6}c^3, \quad (11)$$

$$K_{\varphi\omega} = 0,0148c, K_{\varphi\varepsilon} = 0,0000432c^2, K_{\omega\varepsilon} = 0,00376c,$$

Розглянемо вплив коефіцієнта γ_{Ω} на вид перехідних функцій системи керування (1), (3) при варіюванні його в діапазоні $\pm 20\%$ відносно базового рівня $\gamma_{\Omega 0}$, визначеного згідно з формулою (7), що приведе до відповідного варіювання параметрів (11), а саме $K_{\Omega\varphi}, K_{\Omega\omega}, K_{\Omega\varepsilon}$, пропорційного першій, другий і третій степені γ_{Ω} відповідно. При цьому значення коефіцієнта γ_{φ} , визначене згідно з формулою (7), залишимо незмінним. Виконаємо дослідження перехідних процесів для такого ряду значень γ_{Ω} , встановивши $\Omega^* = 100c^{-1}$:

$$1) \gamma_{\Omega} = 0,85 \cdot \gamma_{\Omega 0}, 2) \gamma_{\Omega} = 0,91 \cdot \gamma_{\Omega 0}, 3) \gamma_{\Omega} = 1,0 \cdot \gamma_{\Omega 0}, 4) \gamma_{\Omega} = 1,1 \cdot \gamma_{\Omega 0}, 5) \gamma_{\Omega} = 1,3 \cdot \gamma_{\Omega 0}. \quad (12)$$

На рис. 1 наведене сімейство перехідних характеристик системи (1), (3) для випадків прикладання ступінчастого задавального впливу при $t = 0c$ та ступінчастого збурювального впливу при $t = 0,5c$. У рамках показані збільшені фрагменти діаграм, які пронумеровані відповідно до виразів (12). Діаграма оптимальної за швидкодією системи (2), (3) показана для порівняння і позначена нулем "0". На рис. 2 наведені часові діаграми сигналів регуляторів. Діаграми є безрозмірними, їхня амплітуда відповідає старшинству регуляторів у каскаді (3). Сигнали виведені з перекриттям, оскільки перемикавання старших регуляторів повторюються молодшими. Моменти початку ковзного режиму регулятора R_{Ω} позначені як $ts1$ у режимі розгону та $ts2$ у режимі ударного прикладання моменту навантаження. Аналіз діаграм дозволяє відзначити характерні особливості перехідних процесів релейно-модальних систем підпорядкованого регулювання.

По-перше, варіювання налаштувань регулятора R_{Ω} згідно із рядом значень γ_{Ω} (12), еквівалентне варіюванню середньгеометричного кореня, викликає розбіжність діаграм тільки на кінцевому етапі процесу розгону. Даний факт обумовлений порядком взаємодії регуляторів (3) каскадно-підпорядкованої системи, у якій початкова стадія перехідного процесу формується внутрішніми регуляторами, а їхні налаштування незмінні в наведеній серії експериментів. Відзначений ефект не поширюється на режим накиду навантаження, у якому відносна тривалість ковзних режимів внутрішніх контурів є набагато меншою.

По-друге, збільшення γ_{Ω} відносно базового значення (криві 4,5) викликає затягування кінцевої стадії перехідних процесів, що є цілком природним, оскільки зростання цього коефіцієнта еквівалентне збільшенню сталих часу системи, які визначають темп руху в ковзному режимі. Разом з тим, зниження γ_{Ω} провокує перерегулювання при реакції системи (криві 1,2) як на задавальний, так і на збурювальний впливи, хоча застосована процедура синтезу релейно-модальної системи гарантує чисто дійсні корені характеристичного рівняння. Цей факт не суперечить загальноприйнятим теоретичним уявленням про динаміку систем керування, він є цілком органічним і обумовлений тією обставиною, що рівняння ковзання регулятора R_{Ω} зовнішнього контуру стає характеристичним рівнянням всієї системи (1), (3) тільки після виникнення стійкого ковзного режиму цього регулятора. Оскільки синтез розглянутої релейно-модальної системи має на меті максимальне наближення характеристик до оптимальних за швидкодією, її регулятори мають виражений режим одиничних перемикань перед входженням у ковзний режим. При зменшенні γ_{Ω} зменшуються коефіцієнти зворотних зв'язків, що приводить до зрушення одиничних перемикань на більш пізні моменти та спричиняє перерегулювання. Проти-

лежна тенденція зміни параметрів викликає раннє виникнення ковзних режимів і збільшує дотягування, цей факт ілюструє зсув міток часу $ts1$ та $ts2$ у лівий бік на шкалі часу на рис. 2.

По-третє, в усіх розглянутих варіантах перехідних процесів траєкторії системи при розгоні дещо відхиляються від оптимальної за швидкістю внаслідок дії внутрішніх зворотних зв'язків електромеханічної системи (1), а також, крім варіанту 0, внаслідок дії модальних налаштувань. Цей факт підтверджується не повним узгодженням характеру роботи регуляторів (рис. 2) із правилом N-ї перемикачів [7, 12]. Як і у випадку релейно-модальних систем третього

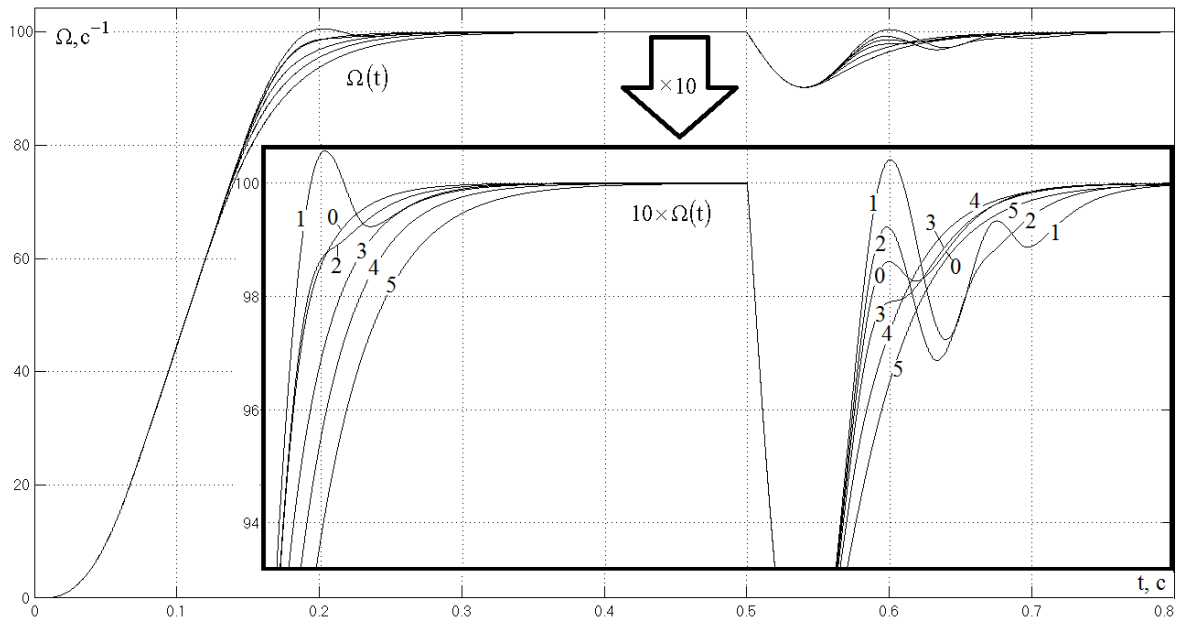


Рис. 1. Сімейство перехідних функцій релейно-модальної системи

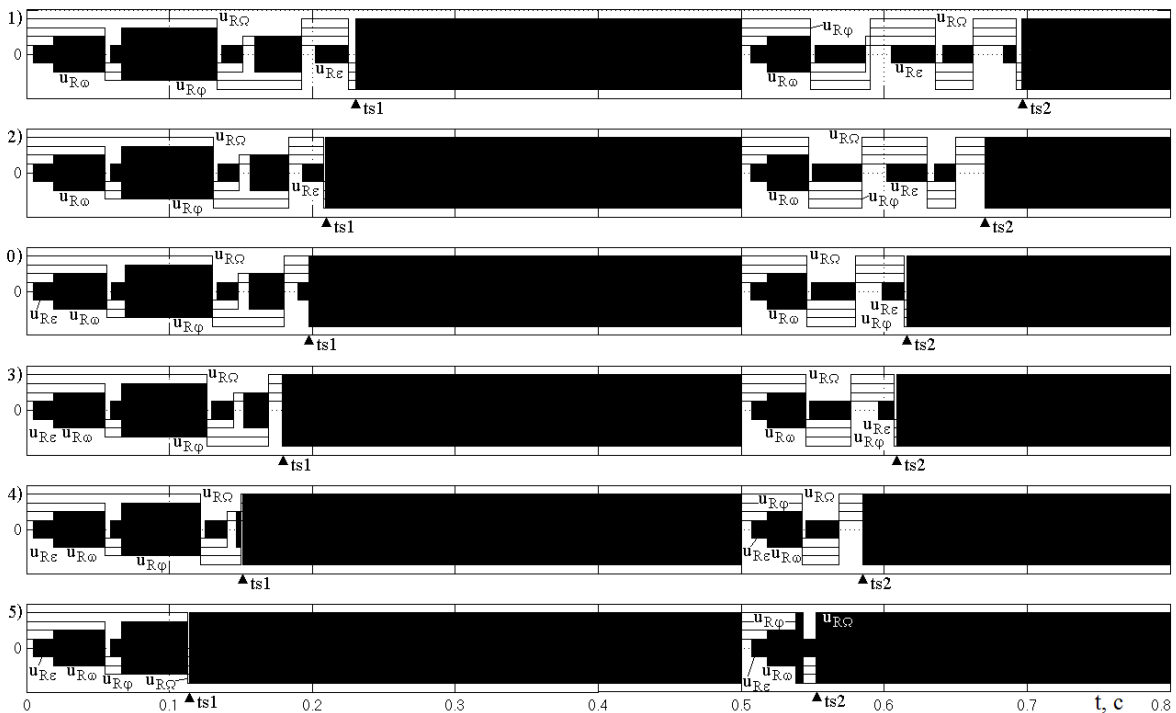


Рис. 2. Сигнали касадно з'єднаних регуляторів

порядку [12—15], вплив перелічених факторів на передчасне виникнення ковзних режимів можна частково компенсувати зменшенням коефіцієнта γ_{Ω} на 5—10 % відносно базового значення, визначеного згідно з формулою (7). Однак, виконуючи порівняльну оцінку наведених діаграм з міркувань вибору значення коригувального коефіцієнта виявляємо, що занижені значення γ_{Ω} надають системі четвертого порядку коливальності, яка помірно проявляється навіть у режимах розгону (криві 1, 2) і більш явно — при накиді навантаження, що ставить під сумнів практичну доцільність налаштувань зі співвідношенням $\gamma_{\Omega} < \gamma_{\Omega 0}$. Більше того, з погляду характеру реакції на збурення навіть базовий варіант модальної системи (крива 3), як і система з оптимальними регуляторами (крива 0), не задовольняють вимогам формування аперіодичного процесу, хоча вони й забезпечують неколивальний режим розгону.

Дещо відмінна поведінка систем підпорядкованого регулювання в різних режимах роботи цілком узгоджується з їх нелінійною природою, оскільки обмеження проміжних координат мають різний ступінь прояву залежно від похибки регулювання. До того ж, виведення формул коефіцієнтів (4) методом N-ї перемикачів [8] і подальше обґрунтування [11] формул (6), (7) оснований на прогнозуванні оптимальної траєкторії саме для режиму розгону в умовах обмежень координат системи (2), (3). Реакція ж системи на ударний накид моменту опору при застосуванні методу N-ї перемикачів взагалі не розглядається, а збіжність даного процесу лише передбачається виходячи з обґрунтованої аналітично стійкості регуляторів (3) з коефіцієнтами зворотних зв'язків (4) або (6). Відповідно, діаграми на рис. 1 у режимі накиду навантаження при $t > 0,5$ с виявляють підвищену коливальність у порівнянні з режимом розгону. У зв'язку із цим, позитивний вплив підвищеного коефіцієнта γ_{Ω} на характер перехідних процесів у сенсі усунення їх коливальності (криві 4, 5) є особливо актуальним саме для корекції режимів компенсації збурень.

Отже, за результатами проведеного дослідження можна рекомендувати варіант 4 як найкращий для практичного налаштування електропривода. Даний варіант відповідає збільшенню розрахункових сталих часу на 10 % відносно параметрів базового варіанта 3. Він забезпечує мінімальну тривалість реакції на накид навантаження при збільшенні тривалості розгону на 5 % й аперіодичний перебіг обох типових динамічних режимів.

Висновки

Виконаний на прикладі двомасової електромеханічної системи аналіз сімейства перехідних діаграм дозволяє оцінити модифікацію розрахункових сталих часу шляхом застосування коригувального множника як дієвий засіб впливу на динамічні характеристики релейно-модальних систем підпорядкованого регулювання. Збільшення коригувального коефіцієнта на 10 % усуває коливальність в режимі компенсації збурення без істотної втрати швидкодії при аперіодичному відпрацюванні задавального впливу. У підсумку синтез N-контурної релейно-модальної системи підпорядкованого регулювання четвертого порядку методом N-ї перемикачів забезпечує їй швидкодію, максимально наближену до оптимальної. Пропонований методичний прийом може бути інтегрований в адаптивні алгоритми [16] параметричного синтезу цифрових контролерів.

Список використаної літератури

1. Горелов П. В., Мотченко А. И., Морозов Д. И. Релейно-модальное управление двухмассовыми электромеханическими системами. *Вестник НТУ ХПИ. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. Харьков, 2008. №30. С. 120–123.
2. Mahmud N. L., Arshad N. M., Andan R. Sliding mode control design based on pole placement method. *Journal of mechanical engineering*, 2017. Vol SI 2. P. 135–144.
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. Utkin V. I. Sliding modes in control and optimization. Springer Science & Business Media, 2013.

6. Bartik O. An algebraic approach for the motion control of the two-mass system, *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2020. P. 100–105.
7. Садовой А. В., Сухинин Б. В., Сохина Ю. В., Дерез А. Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами : монографія. Днепродзержинск : ДГТУ, 2011. 337 с.
8. Садовой О. В., Дерезь О. Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2014. 206 с.
9. Дерез А. Л., Садовой А. В. Оптимизация по быстродействию системы регулирования скорости электропривода методом N–i переключений при неопределённом максимуме упругого момента. *Сборник научных трудов ДГТУ*. Днепродзержинск, 2013. Вып. 1 (21). С. 150–156.
10. Дерез А. Л., Садовой А. В. Синтез релейной системы управления четвёртого порядка методом N–i переключений при неопределённых максимумах первой и второй производных регулируемой координаты. *Сборник научных трудов ДГТУ*. Днепродзержинск, 2016. Вып. 1 (28). С. 81–88.
11. Дерез А. Л., Садовой А. В. Синтез каскадно-подчинённых структур релейно-модальных систем с распределением корней на основе метода N–i переключений. *Вестник НТУ ХПИ. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика*. Харьков, 2017. №27. С. 75–79.
12. Дерезь О. Л., Садовой О. В. Метод N–i переключень у задачах оптимізації за швидкодією : монографія. Кам'янське : ДДТУ, 2021. 252 с.
13. Derets O., Sadovoi O. Synthesis of a Quasi-Optimal in Speed Relay-Modal Position Control System, Based on the N–i Switching Method. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019. P. 154–157. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896675.
14. Дерез А. Л., Садовой А. В., Дерез А. А. Исследование математической модели релейно-модальной системы управления третьего порядка с целью поиска экстремальных настроек регуляторов. *Сборник научных трудов ДГТУ*. Каменское, 2020. Вып.1 (36). С. 66–72.
15. Дерезь О. Л., Садовой О. В., Дерезь Г. О. Оптимізація за швидкодією релейно-модальної системи керування позиційним електроприводом на основі дослідження математичної моделі. *Збірник наукових праць ДДТУ*. Кам'янське, 2020. Вип.2 (37) С. 43–48.
16. Дерез А. Л., Садовой А. В. Алгоритм адаптации релейной системы управления четвёртого порядка, синтезированной методом N–i переключений, к изменению формы переходной траектории. *Сборник научных трудов ДГТУ*. Каменское, 2017. Вып.1 (30). С. 87–95.

STUDY OF DYNAMIC STATES OF RELAY-MODAL ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM WITH ELASTIC LINK

Derets O., Sadovoi O., Narushevych Y., Halkevych M., Kumaniov R.

Abstract

Modal control systems have given transient characteristics, but are not optimal by any criterion. The use of modal controllers in systems with elastic dynamic objects is due to their relatively high order and tendency to oscillate. In the synthesis of such controllers, the actual distribution of roots is implemented on the basis of the N–i switching method and provides them with characteristics that are close to optimal in terms of speed. This original synthesis method has a simple and transparent mathematical apparatus.

The use of relay systems in combination with the principles of subordinate control and modal control provides a comprehensive solution to the problem of forming the desired flow of transient processes in electric drives with elastic links. The analytical expressions for the feedback coefficients of optimal control systems found using the N–i switching method are close to the expressions for the feedback coefficients of modal control systems. The incomplete correspondence between the parameters of optimal and modal controllers can be successfully compensated based on empirical data. This makes it possible to bring the transient characteristics of modal and optimal relay systems as close as

possible. The purpose of the study is to estimate the performance indexes obtained in this way and correction of them based on empirical data. To achieve it, the problem of a comparative study of typical operating modes under conditions of varying key parameters was solved, which made it possible to determine the conditions for the implementation of the highest possible dynamic characteristics in fourth-order relay-modal control systems.

The results of the study led to the conclusion that the modification of the calculated time constants of the system by applying a correction factor can be characterized as an effective means of influencing the dynamic characteristics of relay-modal slave control systems in order to bring them closer to the optimal ones in terms of speed. The prospect of practical application of the results of the work lies in their integration into adaptive algorithms for parametric synthesis of digital controllers.

References

- [1] Gorelov P.V., Motchenko A.I., Morozov D.I. (2008). Releyno-modalnoye upravleniye dvukhmassovymi elektromekhanicheskimi sistemami [Relay-modal control of two-mass electromechanical systems]. *Vestnik NTU KhPI. Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. – Bulletin of NTU KhPI. Problems of automated electric drive. Theory and practice*, 30, 120–123. Kharkov: KhPI [in Russian].
- [2] Mahmud N.L., Arshad N.M., Andan R. (2017). Sliding mode control design based on pole placement method, *Journal of mechanical engineering*, 2017, vol. SI 2, 135–144.
- [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] Utkin V.I. (2013). Sliding modes in control and optimization. Springer Science & Business Media.
- [6] Bartik O. (2020). An algebraic approach for the motion control of the two-mass system, *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 100–105.
- [7] Sadovoy, A.V., Sukhinin, B.V., Sokhina, Yu. V., Derets A.L. (2011) *Releynnye sistemy optimalnogo upravleniya elektroprivodami [Relay systems of optimal control of electric drives]*. Dneprodzerzhinsk: DSTU [in Russian].
- [8] 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: DDTU [in Ukrainian].
- [9] Derets A.L., Sadovoy A.V. (2013). Optimizatsiya po bystrodeystviyu sistemy regulirovaniya skorsti elektroprivoda metodom N–i pereklyucheniy pri neopredelennom maksimume uprugogo momenta [Optimization in speed of the electric drive velocity control system by the N–i switching method at an indefinite maximum of elastic moment]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 1 (21), 150–156. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [10] Derets A. L., Sadovoy A. V. (2016). Sintez releynoy sistemy upravleniya chetvortogo poryadka metodom N–i pereklyucheniy pri neopredelennykh maksimumakh pervoy i vtoroy proizvodnykh reguliruyemoy koordinaty [Synthesis of the fourth order sliding mode control system by the N–i switching method with indefinite maxima of the first and second derivatives of the controlled coordinate]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU*, 1 (28), 81–88. Dneprodzerzhinsk: DGTU [in Russian].
- [11] Derets A. L., Sadovoy A.V. (2017). Sintez kaskadno-podchinonnykh struktur releyno-modalnykh sistem s raspredeleniyem korney na osnove metoda N–i pereklyucheniy [Synthesis of cascade-subordinate structures of relay-modal systems with distribution of roots based on the N–i switching method]. *Vestnik NTU KHPI. Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika – Bulletin of NTU KhPI. Problems of automated electric drive. Theory and practice*, 27, 75–79. Kharkov: KhPI [in Russian].
- [12] 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: DDTU [in Ukrainian].

- [13] Derets O., Sadovoi O. (2019). Synthesis of a Quasi-Optimal in Speed Relay-Modal Position Control System, Based on the N-i Switching Method. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 154–157. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896675.
- [14] Derets A.L., Sadovoy A.V., Derets A.A. (2020) Issledovaniye matematicheskoy modeli reley-modalnoy sistemy upravleniya tretyego poryadka s tselyu poiska ekstremalnykh nastroyek regulyatorov [Study of the mathematical model of the third-order relay-modal control system with the purpose of search for extremal settings of controllers]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU, 1 (36)*, 66–72. Kamenskoye: DGTU [in Russian].
- [15] Derets O.L., Sadovoy O.V., Derets H.O. (2020). Optymizatsiya za shvydkodiyeyu reley-modalnoyi systemy keruvannya pozytsiynym elektropryvodom na osnovi doslidzhennya matematichnoyi modeli [Optimization in speed of the relay-modal control system of the servo drive based on the study of the mathematical model]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU – Collection of scientific works of DDTU, 2 (37)*, 43–48. Kamyanske: DDTU [in Ukrainian].
- [16] Derets A.L., Sadovoy A.V. (2017). Algoritm adaptatsii releynoy sistemy upravleniya chetvortogo poryadka, sintezirovannoy metodom N-i pereklyucheniy, k izmeneniyu formy perekhodnoy trayektorii [Adaptation algorithm for the fourth-order sliding mode control system, synthesized by the N-i switching method, to a change in the shape of the transition trajectory]. *Sbornik nauchnykh trudov DGTU – Collection of scientific works of DSTU, 1 (30)*, 87–95. Kamenskoye: DGTU [in Russian].