

ДЕРЕЦЬ О.Л., к.т.н., доцент
САДОВОЙ О.В., д.т.н., професор
ДЕРЕЦЬ Г.О., студентка

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Вступ. До систем керування позиційними електроприводами висувається ряд загальних технічних вимог, які не залежать від сфери їхнього застосування. Порівняно велика тривалість перехідних процесів [1] ставить завдання оптимізації за швидкодією [2]. При цьому необхідно забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу. Названим вимогам у найбільшій мері відповідають системи розривного керування. Завдяки ковзному режиму роботи релейних регуляторів вони мають низьку чутливість до параметричних і координатних збурень [3]. Каскадно-підпорядковане увімкнення регуляторів забезпечує здатність до обмеження проміжних координат [4]. Гранична швидкодія, яка є їхньою структурною властивістю, реалізується при синтезі параметрів методом $N-i$ перемикачів за рахунок узгодженого входження регуляторів у ковзний режим. У поєднанні з принципом модального керування [5] цей метод забезпечує бажану форму перехідних траєкторій у всьому діапазоні зміни керованих координат [6].

Постановка задачі. Позиційний електропривод як об'єкт керування при загальноприйнятих допущеннях описується такою системою диференціальних рівнянь [4]

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

де $p = d/dt$ – символ диференціювання за часом, $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ – відповідно кутові положення, швидкість, прискорення й ривок виконавчого вала, u – напруга силового перетворювача; i – струм якоря, i_s – статичний струм, R, L, J – опір, індуктивність якірного кола і момент інерції машини, $c = k\Phi$, k – конструктивний коефіцієнт, Φ – номінальний магнітний потік машини.

Відповідно до методу $N-i$ перемикачів для керування таким динамічним об'єктом застосовується каскад релейних регуляторів

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

Символом * у системі (2) позначені задані значення відповідних змінних, як вхідної, так і сформованих регуляторами для підпорядкованих їм контурів [4]. Коефіцієнти зворотних зв'язків K при модальних налаштуваннях регуляторів (2) згідно з методом $N-i$ перемикачів залежать від сталих часу замкнutoї системи [6]

$$K_{\omega\epsilon} = \frac{1}{2}\gamma T_a, K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}\gamma(T_a + T_e), K_{\varphi\epsilon} = \frac{1}{4}\gamma^2 T_a T_e, \quad (3)$$

які у свою чергу є функціями рівнів обмеження канонічних координат $\omega_{max}, \epsilon_{max}, a_{max}$. Сталі часу коригуються підвищувальним коефіцієнтом

$$\gamma = \sqrt{\frac{T_a T_e + \frac{1}{3} T_a^2}{T_a T_e}}. \quad (4)$$

Коефіцієнти (3) отримані при допущенні, що оптимальну за швидкістю траєкторію електропривода (1), прогнозовану при відомих $\omega_{max}, \epsilon_{max}, a_{max}$, можна замінити ідеалізованою траєкторією нейтрально-стійкого об'єкта. Таке спрощення розрахункової траєкторії є припустимим саме для релейних систем, замкнутих зворотними зв'язками за канонічними координатами [7]. У ковзному режимі вони компенсують внутрішні зворотні зв'язки об'єкта керування (1), роблячи його еквівалентним нейтральному динамічному об'єкту (5). Це дозволяє синтезувати релейні системи підпорядкованого регулювання різними динамічними об'єктами на підставі єдиної перехідної траєкторії [8].

Однак, у будь-якому перехідному процесі системи з об'єктом керування (1) і регуляторами (2) існують інтервали часу, на яких зривається ковзний режим всіх регуляторів каскаду (2). Це проміжки часу, на яких здійснюється зміна найближчої до входу об'єкта керування координати – прискорення. На цих інтервалах траєкторія реальної системи дещо відрізняється від ідеальної. Такі розбіжності з оптимальною траєкторією здатні вплинути на характер руху системи при малих відхиленнях від стану рівноваги і, як наслідок, на загальну тривалість позиціонування. Як було встановлено у попередніх дослідженнях, варіювання розрахункового ривка, пропорційного амплітуді напруги силового перетворювача, є дієвим засобом корекції руху систем оптимального керування у математичному апараті методу $N-i$ перемикачів. Задачею даного дослідження є встановлення можливості коригування налаштувань релейно-модальної системи керування електроприводом у напрямку оптимальної швидкодії при збереженні переваг налаштування методом розподілу коренів.

Результати роботи. Виконаємо розрахунок параметрів (3) каскаду регуляторів (2) при рівнях обмежень

$$\omega_{max} = 100 \text{ c}^{-1}, \epsilon_{max} = 800 \text{ c}^{-2}, a_{max} = 57200 \text{ c}^{-3},$$

які відповідають параметрам електромеханічної системи (1) зі значеннями

$$R = 1 \text{ Ом}, c = 2 \text{ В} \cdot \text{с}, J = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, L = 0,1 \text{ Гн}$$

$$I_H = 20 \text{ А}, \omega_H = 100 \text{ c}^{-1}, U_H = 220 \text{ В}, U_{max} = 1,3 U_H.$$

Тоді параметри релейно-модальних регуляторів каскаду (2) для режиму великих переміщень при $\varphi^* = 20$ радіан дорівнюють

$$K_{\omega\epsilon} = 0.007 \text{ с}, K_{\varphi\omega} = 0.07198 \text{ с}, K_{\varphi\epsilon} = 0.0005213 \text{ с}^2.$$

Для встановлення можливості корекції параметрів виконана серія експериментів з моделлю системи керування позиційним електроприводом, при синтезі якої варіювався розрахунковий рівень напруги силового перетворювача стосовно реального, при

цьому коефіцієнт розрахункової напруги $K_U = \frac{U_{max}}{U_{max0}}$ змінювався в діапазоні 0,6...1...1,4 з кроком 0,2 [9], [10].

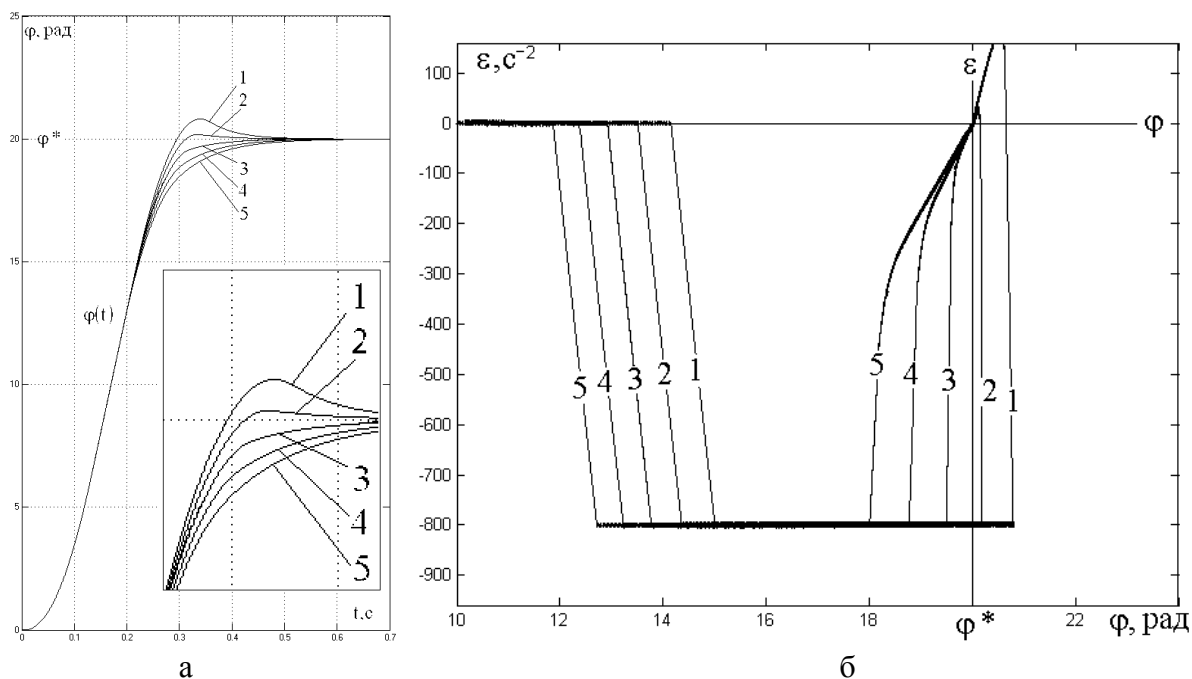


Рисунок 1 – Сімейства перехідних функцій (а) релейно-модальної системи та проєкції кінцевих ділянок її фазових траєкторій (б) на площину $\varphi \epsilon$ для випадків: 1 – $K_U = 0,6$, 2 – $K_U = 0,8$, 3 – $K_U = 1,0$, 4 – $K_U = 1,2$, 5 – $K_U = 1,4$

У результаті отримано сімейство перехідних функцій (рис.1,а), що демонструє зміну характеру перехідного процесу. Послідовна зміна налаштувань системи відповідно до значення варійованого коефіцієнта приводить до зсуву початку ковзання регулятора положення на більш ранні моменти часу. Це спершу знижує перерегулювання, а потім надає процесу усе більш явний аперіодичний характер [9], [10].

Таке поведіння регуляторів зумовлене усе більш раннім потраплянням зображуючої точки системи на гіперплощину перемикання регулятора R_φ внаслідок зміни кута її нахилу. Дана обставина ілюструється проєціюванням сімейства траєкторій на координатні площини простору стану. Проекції кінцевих ділянок траєкторій на площину $\varphi \epsilon$ представлені на рис.1,б. Необхідно особливо підкреслити, що відмінності в характері перехідних процесів досліджуваних систем цілком визначаються зсувом моментів виникнення режиму одиничних перемикань, оскільки застосований метод синтезу гарантує дійсні корені рівняння ковзання [6]. На рис.2 наведено часові діаграми як регульованої координати, так і проміжних, а також діаграми сигналів регуляторів каскаду (2), які дозволяють детально розглянути відмінності функціонування системи при різних налаштуваннях.

Результати моделювання електроприводу в умовах варіювання K_U (рис.1,2), які демонструють перехід від перерегулювання до дотягування, вказують на існування процесу позиціонування з мінімальною тривалістю.

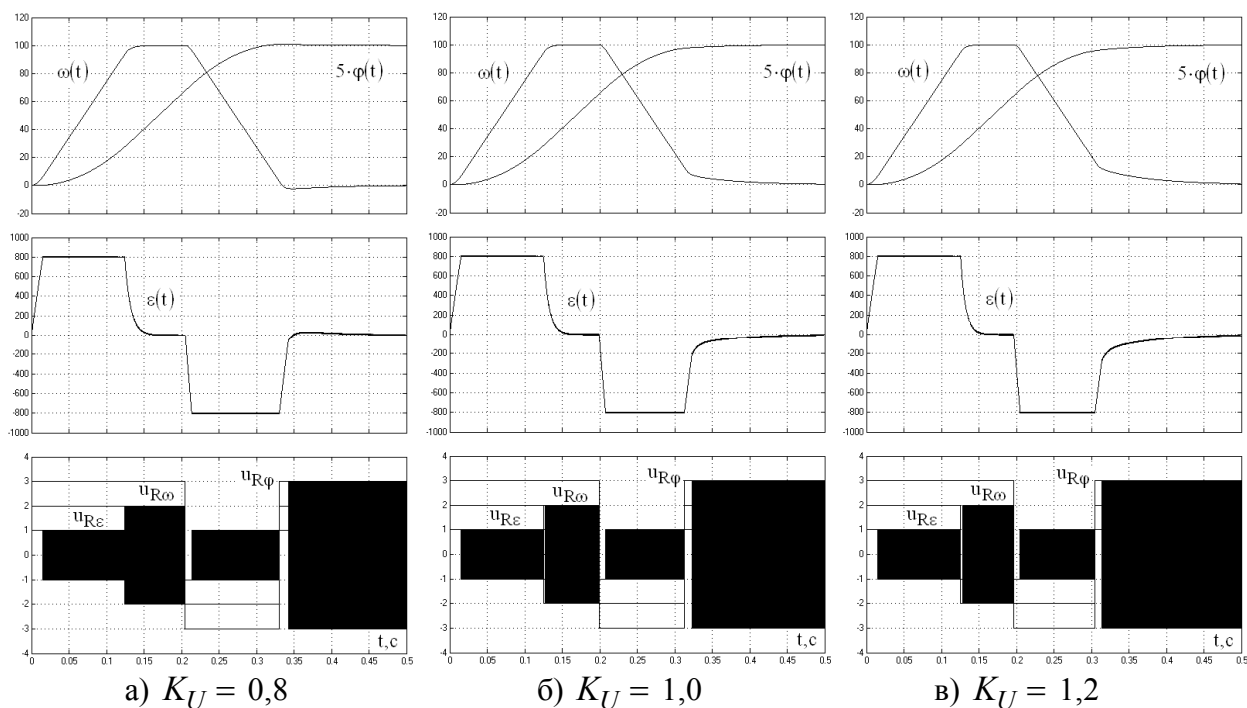


Рисунок 2 – Приклад зміни часових діаграм релейно-модальної системи керування електроприводом

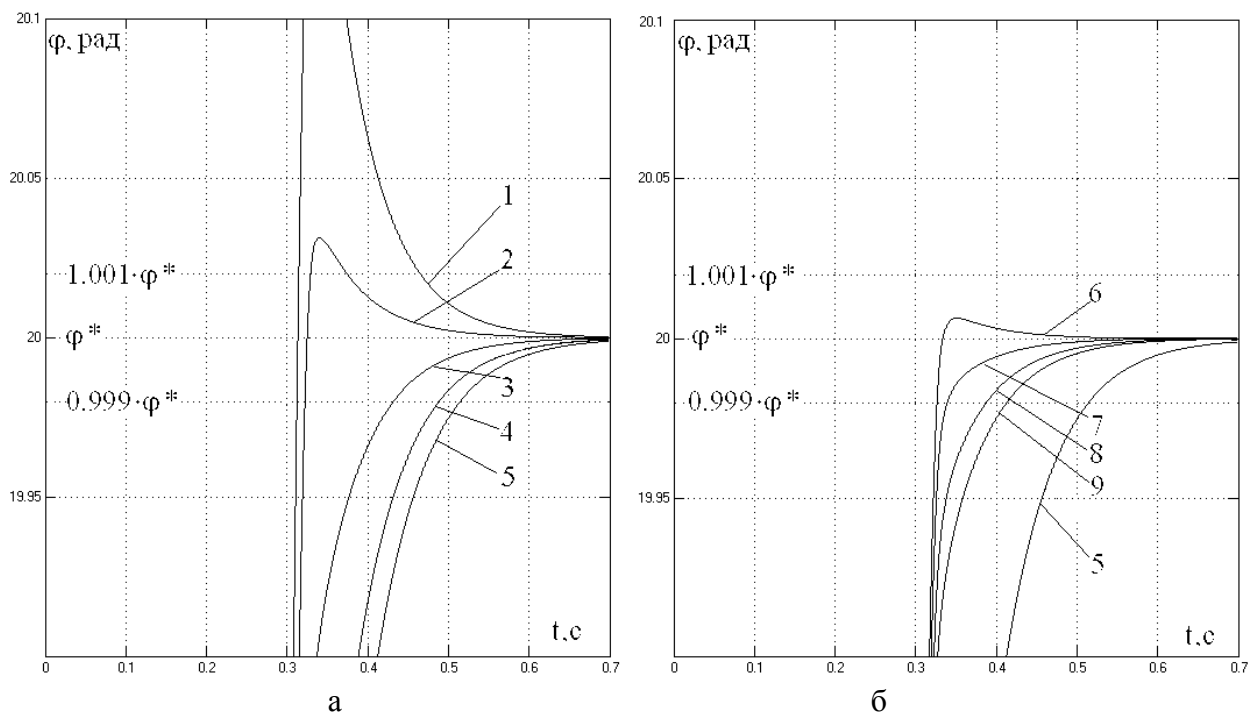


Рисунок 3 – Сімейства перехідних функцій системи керування:
 1 – $K_U = 0,8$, 2 – $K_U = 0,85$, 3 – $K_U = 0,9$, 4 – $K_U = 0,95$, 5 – $K_U = 1,0$,
 6 – $K_U = 0,86$, 7 – $K_U = 0,87$, 8 – $K_U = 0,88$, 9 – $K_U = 0,89$

На підставі уточненого перебору коефіцієнта розрахункової напруги в діапазоні 0,8...1,0 з кроком 0,05 (рис.3,а) та в діапазоні 0,86...0,89 з кроком 0,01 (рис.3,б) побудо-

вані часові діаграми перехідних процесів систем з різними параметрами. У якості критерію завершення перехідного процесу прийняте досягнення відхилення від заданого положення не більше ніж на $\pm 0,001 \cdot \varphi^*$ [9], [10]. У результаті обробки результатів моделювання отримана залежність t_{per} від K_U (рис.4,а), яка має виражений екстремум при $0,86 < K_U < 0,87$.

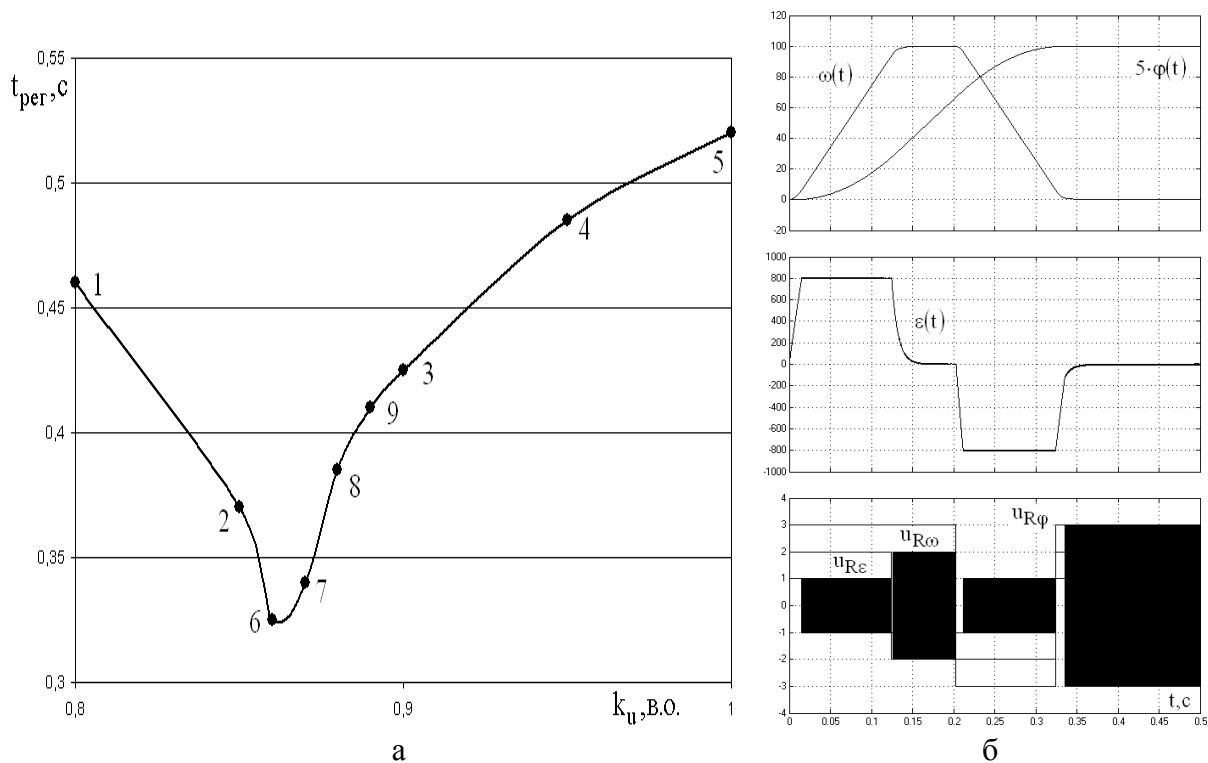


Рисунок 4 – Залежність тривалості регулювання від коефіцієнта розрахункової напруги (а) та динаміка скорегованої системи керування (б).

Необхідно відзначити, що вітки графіків, які розташовані ліворуч від точки екстремуму, відповідають налаштуванням систем, що викликають перерегулювання. Отже, при корекції параметрів системи керування за допомогою емпіричного коефіцієнта розрахункової напруги варто вибирати його значення при наближенні до положення екстремуму з правого боку.

На рис.4,б наведено часові діаграми перехідного процесу релейно-модальної системи керування електроприводом з налаштуваннями, синтезованими при $K_U = 0,87$, що відповідає найближчій розрахунковій точці, розташованій з правого боку від екстремуму на рис.4,а або кривій 7 на рис.3,б. Застосування пропонованого способу корекції налаштувань дозволяє практично повністю компенсувати відхилення руху системи керування електроприводом від оптимальної за швидкодією траєкторії, обумовлені прийняттям спрощуючих допущень при синтезі каскаду релейних регуляторів.

Висновки. Виявлений взаємозв'язок параметрів релейно-модальної системи третього порядку із тривалістю її перехідного процесу дозволив запропонувати в контексті методу $N-i$ перемикачів спосіб корекції швидкодії систем керування електроприводами у напрямку оптимуму. Методика зводиться до побудови сімейства перехідних характеристик при варіюванні розрахункової амплітуди напруги й подальшого застосування обґрунтованого емпірично поправочного коефіцієнта при здійсненні синтезу параметрів

рів каскаду релейно-модальних регуляторів. Подальший розвиток даної методики є доцільним в напрямках її адаптації до випадків різних форм траєкторії [10] а також до систем керування більш високого порядку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М., «Энергия», 1971.
2. Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. Дерез А.Л. Релейные системы оптимального управления электроприводами. Днепропетровск: ДГТУ, 2011. 337 с.
3. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем М.: «Наука», 1966. 624 с.
4. Садовой О.В., Дерезь О.Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпропетровськ : ДДТУ, 2014. 206 с.
5. Горелов П.В., Мотченко А.И., Морозов Д.И. Релейно-модальное управление двухмассовыми электро-механическими системами. *Вестник НТУ ХПИ: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харьков, 2008, №30. С. 120-123.
6. 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»*. Сер.: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». Харьков, 2017. №27. С. 75-79.
7. Дерез А.Л., Садовой А.В., Сохина Ю.В. Сравнительное исследование релейных систем третьего порядка с оптимальными и модальными регуляторами, синтезированными методом N-i переключений. *Сборник научных трудов ДГТУ Каменское*. 2018. №.32. С. 59-63.
8. Derets O., Sadovoy O., “Investigation of the third-order sliding mode control system with different structures of the control objects synthesized by the N-i switching method” // *Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017*, pp. 100-103.
9. Дерез А.Л., Садовой А.В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстродействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N-i переключений. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика». Х.: НТУ «ХПИ», 2019. № 9 (1334), С. 20-23.
10. Дерез А.Л., Садовой А.В., Дерез А.А. Моделирование режимов позиционирования оптимизированной по быстродействию релейной системы управления при изменении расчётной амплитуды напряжения. *Сборник научных трудов ДГТУ .Каменское*. 2019. №.35. С. 55-59.

Надійшла до редколегії 30.11.2020.