

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",

Б. Т. СИТНИК, канд. техн. наук, доц., Український державний університет залізничного транспорту,

А. М. МІРОШНИК, асп., Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

СИНТЕЗ АПАРАТНИХ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ АДАПТИВНИХ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ ВИСОКОГО ПОРЯДКУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ БАЖАНОГО ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ГАРАНТОВАНОГО СТУПЕНЯ СТІЙКОСТІ

В роботі видалено аналітичні вирази для зв'язку критеріїв оптимізації та параметрів налаштування адаптивного PI-PID регулятора зі змінними параметрами об'єкта та адаптивного фільтра. Розроблено метод синтезу моделі дискретних регуляторів із заданих динамічних характеристик. Розроблено метод синтезу моделі дискретного ПІД-регулятора із заданих динамічних характеристик на основі критерію перехідного процесу гарантованого рівня стійкості. Іл.: 3. Бібл. 19 назв.

Ключові слова: структурно-параметрична ідентифікація; моделі індексної ідентифікації; висока потік рідини; формувальні фільтри-регулятори.

Вступ. Керування багатьох існуючих промислових високошвидкісних рухомих (РО) об'єктів у різних галузях народного господарства пов'язане із використанням замкнених систем керування по відхиленню, причому параметри регуляторів перебудовуються відповідно критеріїв якості при зміні режимів роботи чи нестационарності об'єктів керування та перешкод. Цифрові системи керування (ЦСК) [1 – 12] на залізничному транспорті використовуються в складних ієрархічних системах цифрового керуванні РО (роботами. дронами. локомотивами та ін.), в системах нагляду за станом колії, мостів, споруд тощо. Приклад

структури такої системи з блоком ідентифікації та адаптивним PID-регулятором наведено на рис. 1.

Залізничні компанії [5 – 9] в світі впроваджують квадрокоптери для контролю та діагностування залізничних об'єктів, боротьби з крадіжками, вандалізмом та вирішення інших проблем на залізницях. Дрони збирають інформацію, яка дозволяє значно поліпшити показники безпеки та зменшити витрати. Зазвичай застосовувані алгоритми керування, відповідають до потреб технологічних процесів та орієнтовані на високу швидкодію, великий діапазон зміни властивостей об'єкта та параметрів перешкод, що діють на об'єкти.

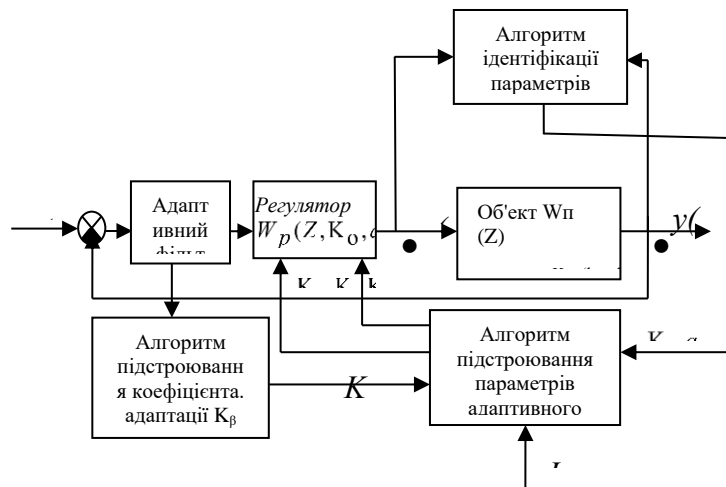


Рис. 1. Приклад структури АСК з блоком ідентифікації та адаптивними фільтром, ідентифікатором та PID-регулятором

При заміні, створенні або модернізації старих аналогових систем керування або їх елементів новими цифровими, виникає проблема забезпечення якості бажаних перехідних процесів в нових системах відповідно тім, яки були у попередніх. Таке становище викликає необхідність дослідження можливостей нових універсальних і простих у реалізації законів та алгоритмів цифрового керування нестационарними високошвидкісними рухомими РО. Тому дослідження з питань теорії та методів створення, моделювання, синтезу простого, універсального та

ефективного адаптивного керування нестационарними об'єктами є одним з актуальних завдань роботи, причому зв'язок між параметрами систем ідентифікації, фільтрації, та розрахунків параметрів змін налаштування регуляторів за обраним критерієм оптимізації повинен виконуватися безпосередньо під час дії перехідних процесів. Методи, що використовуються, і запропоновані алгоритми адаптивного керування повинні поєднувати простоту і універсальність лінійних неперервних законів керування з можливостями цифрових.

Актуальність дослідження. Основним змістом роботи є розробка простих, універсальних та ефективних моделей, методів та алгоритмів адаптивного цифрового керування об'єктами на основі моделі бажаного перехідного процесу гарантованого ступеня стійкості, що дозволять корегувати значення відповідних параметрів налаштування передавальних функцій апаратних та програмних засобів адаптивних дискретних систем управління високого порядку безпосередньо під час дії перехідних процесів.

Метою роботи є підвищення ефективності високошвидкісних пасажирських перевезень шляхом удосконалення процесу організації адаптивних систем автоматичного керування рухом поїздів безпосередньо під час дії перехідних процесів.

Постановка завдання синтезу адаптивної системи автоматичного керування рухом високошвидкісних поїздів. Для досягнення мети необхідним є вирішення таких завдань:

- отримати аналітичні вирази, що пов'язують критерій оптимізації та параметри налаштування адаптивного PI–PID-регулятора зі змінними параметрами об'єкта та адаптивного фільтра;

- розробити метод синтезу моделі дискретного PID-регулятора із заданими динамічними характеристиками на основі критерію бажаного перехідного процесу гарантованого ступеня стійкості;

- в якості критерію бажаного перехідного процесу Ів обрати, наприклад, гарантовану ступень стійкості;

- розробити програму моделювання цифрової АСК 3-го порядку, що містить інерційний об'єкт 1-го порядку з запізнюванням, адаптивний фільтр та адаптивний PID-регулятор за технологією моделювання "Живий

документ" у середовищі Матлаб на основі критерію бажаного перехідного процесу Ів гарантованого ступеня стійкості;

– провести моделювання процесу роботи АСК зі змінними параметри об'єкта та адаптивного фільтра з метою оцінки, відповідно, меж одночасної перебудови оптимальних параметрів налаштування адаптивного PID-регулятора та характеру перехідних процесів.

Основна частина.

Відомий [1, 2] метод синтезу регулятора за моделлю бажаного перехідного процесу та отримані вирази для шуканої передатної функції $D(s)$ неперервного регулятора

$$D(s) = \frac{1}{W_{\text{вм}}(s)W_{\text{аф}}(s)W_o(s)} \frac{H_b(s)}{1-H_b(s)} \frac{\delta_u}{\delta_a} \quad (1)$$

де $H_b(s)$ – бажана передатна функція замкнутої системи аналога, $W_o(s)$ – передатна функція об'єкта, $W_{\text{аф}}(s)$ – передатна функція адаптивного фільтра, $W_{\text{вм}}(s)$ – передатна функція виконавчого механізму, $K_{\text{АЦП}} = \frac{1}{\delta_a} = 2^{n_a}$ і $K_{\text{ЦАП}} = \delta_u = 2^{-n_u}$ – статистичні коефіцієнти передачі лінеаризованих АЦП та ЦАП

У роботах [13, 14, 17, 18] за допомогою методу структурної ідентифікації визначаються параметри моделі об'єкта n -го порядку віду

$$W_o(s) = \frac{K_n e^{-\tau s}}{(a_n s^n + \dots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)}, \quad (2)$$

де $K_n = K_o * 2^{n_a - n_u}$ – статичний коефіцієнт передачі об'єкта, АЦП и ЦАП.

Якщо бажаним є, наприклад, аперіодичний процес віду

$$H_b(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_b}{s + \omega_b} = \frac{1}{T_b s + 1}, \quad (3)$$

то прийнявши значення передаточних функцій $W_{\text{вм}}(s) = 1$ і $W_o(s) = 1$, обмежувачись лише значеннями параметрів моделі об'єкта a_1 та a_2 , після

підстановки (3) у (1) отримаємо передавальну функцію $D(s)$ безперервного PID-регулятора з незалежними настройками.

$$D(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + 1}{K_o} \frac{1}{T_b s} \frac{\sigma_u}{\sigma_a} = \frac{1}{K_n T_b} \left(\frac{1}{s} + a_1 + a_2 s \right) = K_p \left(\frac{1}{s} + K_i + K_d s \right), \quad (4)$$

де $T_b = \frac{1}{\omega_b}$, $K_p = \frac{1}{K_n T_b}$, $K_i = a_1$, $K_d = a_2$, а ω_b – параметр якій характеризує смугу пропускання випадкового корисного сигналу за відсутності перешкод і дорівнює частоті сполучення, що визначає необхідну смугу пропускання ЛАЧХ моделі, що моделює динаміку замкнутого контуру управління, і пропорційний зворотньої постійної часу T_b цієї моделі.

Тут параметри налаштування безперервного адаптивного PID-регулятора є функціями змінних параметрів a_1 , a_2 , K_n об'єкта і T_b , тобто. регулятор забезпечує бажаний перехідний процес у АСК.

Вираз для шуканої передавальної функції $D(z)$ цифрового PID-регулятора

$$D(z) = \frac{1}{W_{\text{вм}}(z)W_{\text{аф}}(z)W_n(z)} \frac{H_b(z)}{1-H_b(z)} \frac{\delta_u}{\delta_a}, \quad (5)$$

де $H_b(z)$ – бажана імпульсна передатна функція замкнутої системи, $W_n(z)$ – імпульсна передатна функція наведеної безперервної частини НБЧ об'єкта управління. $W_{\text{вм}}(z)$ – імпульсна модель передатної функції виконавчого механізму, $W_{\text{аф}}(z)$ – дискретна передатна функція адаптивного фільтра.

Для багатьох транспортних об'єктів небажаним є коливальний характер зміни керованої змінної $y(t)$, який викликає часті перемикання виконавчого механізму. Тому припустимо, що у динамічному режимі бажаним є близький до апериодичного перехідний процес, тобто при подачі на уставку регулятора ступінчастого одиничного сигналу замкнений контур управління повинен поводитися як безперервна модель першого порядку із запізненням. Тоді:

$$H_b(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_b e^{-\tau s}}{s + \omega_b}, \quad (6)$$

Цей метод забезпечує механізм зв'язку бажаної смуги пропускання ω_b ЛАЧХ та змінних параметрів моделей адаптивного фільтра та об'єкта з налаштуваннями адаптивного PID -регулятора $D(s)$. В [17] за допомогою методу індексної ідентифікації визначено параметри моделі об'єкта віду

$$W_0(s) = \frac{K_0}{(T_0s+1)^i} \quad (7)$$

Для цієї моделі в [16] знайдено для АСК з PID - регулятором значення ступеня стійкості I_{onm} віду

$$I_{onm} = \frac{3}{T_0(i+1)} \quad (8)$$

або PI – регулятором віду

$$I_{onm} = \frac{2}{T_0(i+1)}, \quad (9)$$

де T_0 – постійна часу часу і i -індекс моделі (7), які знаходяться методом структурно-параметричної індексної ідентифікації у [17] і пов'язані з ідентифікованими в [18] параметрами (9) співвідношенням $a_1=T_0*i$, $a_2=T_0^2, \dots, a_i=T_0^i$.

Для моделі (2) в [2, 4, 5, 6] знайдено значення зв'язку гарантованого ступеня стійкості АСК I_g з параметрами налаштування PI - або PID -регуляторів віду

$$I_g = \frac{2\tau^2+4c_1\tau+6c_2}{\tau^3-4c_1\tau^2-12c_2\tau+24c_3}, \quad (10)$$

де $c_1=T_{onm}+a_1$, $c_2=T_{onm}*a_1+a_2$, $c_3=T_{onm}*a_2$.

Значення I_{opt} або I_g також характеризують смуги пропускання АСК і пов'язані з параметрами моделей відповідних об'єктів та адаптивного фільтра. Якщо порівняти ω_b до будь-якого з цих значень ступеня

стійкості, наприклад, $\omega_b = I_{onn} = \frac{1}{T_{onn}}$ або $\omega_b = I_g$, то ми в результаті знайдемо параметри регуляторів, що забезпечують гарантований ступінь стійкості, адаптивні властивості АСК та перехідний процес близький до аперіодичного. В цьому випадку, позначивши $\omega_b = I_b$, бажана модель (6) набуде наступного виду

$$H_\beta(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{I_b e^{-\tau s}}{s + I_b}, \quad (11)$$

Застосуємо до виразу (11) z-перетворення. Тоді отримаємо

$$H_b(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(1 - e^{-I_b T}) z^{-N-1}}{1 - e^{-I_b T} z^{-1}}, \text{ де } I_b \leq \frac{1}{T_b} \quad (12)$$

Якщо підставити рівняння (12) до (5), то отримаємо передатну функцію цифрового регулятора в наступному вигляді:

$$D(z) = \frac{1}{W_n(z)} \times \frac{(1 - e^{-I_b T}) z^{-N-1}}{(1 - e^{-I_b T}) z^{-1} - (1 - e^{-I_b T}) z^{-N-1}}. \quad (13)$$

Імпульсна передатна функція наведеної безперервної частини НБЧ об'єкта управління визначається за відомою формулою [1]

$$W_n(z) = z \left\{ (1 - e^{-sT}) \frac{W_0(s)}{s} \right\} = \frac{z-1}{z} z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\} \quad (14)$$

$W_0(s)$ – передатна функція об'єкта

Визначимо Z-перетворення $z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\}$, що входять у формулу для імпульсної передатної функції, наведеної безупинної частини (ПБЧ) (2), коли динамічна модель об'єкта керування апроксимирована аперіодичною ланкою 2-го порядку з "чистим" запізнюванням із передатною функцією:

$$W_0(s) = \frac{K_n e^{-\tau s}}{(t_1 s + 1)(t_2 s + 1)}, \quad (15)$$

де $K_H = K_o * 2^{n_a - n_c}$ – статичний коефіцієнт передачі ПБЧ, якій використовуємо у рівнянні (15) для визначення імпульсної передатної функції ПБЧ об'єкта, t_1 і t_2 – постійні часу, які пов'язані з ідентифікованими в [18] параметрами (2) $a_1 = t_1 + t_2$ і $a_2 = t_1 * t_2$ співвідношеннями

$$t_1 = \frac{a_1}{2} + \left(\frac{a_1^2}{4} - a_2\right)^{\frac{1}{2}} \text{ та } t_2 = \frac{a_1}{2} - \left(\frac{a_1^2}{4} - a_2\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

У цьому випадку після перетворень одержимо вираження (17) для $W_n(z)$. Імпульсна передатна функція ПБЧ після перетворення може бути записана як

$$W_n(z) = \frac{K_H(k_1 + k_2 z^{-1})z^{-N-1}}{\left(1 - e^{-\frac{T}{t_1}} z^{-1}\right)\left(1 - e^{-\frac{T}{t_2}} z^{-1}\right)}, \quad (17)$$

де постійні величини k_1 і k_2 будуть рівні

$$k_1 = 1 + \frac{t_2 e^{-\frac{T}{t_2}} - t_1 e^{-\frac{T}{t_1}}}{t_1 - t_2}, \quad (18)$$

$$k_2 = e^{-\frac{T}{t_1} - \frac{T}{t_2}} + \frac{t_2 e^{-\frac{T}{t_1}} - t_1 e^{-\frac{T}{t_2}}}{t_1 - t_2}. \quad (19)$$

Параметр N дорівнює найбільшому цілому числу від розподілу часу запізнювання τ на період квантування T .

Підстановка рівняння (17) у (13) дає наступне вираження імпульсної передатної функції регулятора:

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-l_b T})\left(1 - e^{-\frac{T}{t_1}} z^{-1}\right)\left(1 - e^{-\frac{T}{t_2}} z^{-1}\right)}{K_H\{1 - e^{-l_b T} z^{-1} - (1 - e^{-l_b T}) z^{-N-1}\}(k_1 + k_2 z^{-1})}, \quad (20)$$

де N – найбільше ціле число від розподілу τ/T , а величини k_1 і k_2 визначаються на основі (18) і (19).

Розглянемо характеристичне рівняння дискретної передатної функції (20). Для алгоритму (20) у керуючому впливі можуть виникати загасаючі коливання з частотою квантування ω_0 . Ці коливання викликаються полюсами характеристичного рівняння у околиці $z = -1$, зв'язаними з будь-яким коефіцієнтом у знаменнику (20).

Коефіцієнт $(k_1 + k_2 z^{-1})$ може обумовити полюс

$$z = -\frac{k_2}{k_1}. \quad (21)$$

Запишемо другий коефіцієнт знаменника (20) у такій формі:

$$\begin{aligned} & [1 - e^{-lbT} z^{-1} - (1 - e^{-lbT}) z^{-N-1}] = \\ & = (1 - z^{-1}) \{1 + (1 - e^{-\omega\beta T}) z^{-1} + (1 - e^{-lbT}) z^{-2} + \dots + (1 - e^{-lbT}) z^{-N}\} = [1 + N(1 - e^{-lbT})] (1 - z^{-1}), \end{aligned} \quad (22)$$

Це вираження має корінь при $z = +1$. Дорівнюючи в знаменнику (20) у фігурних дужках усі $z = +1$, одержимо алгоритм керування, вільний від загасаючих коливань у керуючому впливі

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-lbT}) \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_1} z^{-1}}\right) \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_2} z^{-1}}\right)}{K_H (k_1 + k_2) [1 + N(1 - e^{-lbT})] (1 - z^{-1})}. \quad (23)$$

Підстановкою виражень k_1 і k_2 із (18) і (19), перетворимо рівняння (23) до наступної форми:

$$D(z) = \frac{\left(e^{\frac{T}{\tau_1}} + e^{\frac{T}{\tau_2}} - 2\right) (1 - e^{-lbT})}{K_H \left(e^{\frac{T}{\tau_1}} - 1\right) \left(e^{\frac{T}{\tau_2}} - 1\right) [1 + N(1 - e^{-lbT})]} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{\left(\frac{T}{1-e^{\tilde{t}_1}} \right) \left(\frac{T}{1-e^{\tilde{t}_2}} \right)}{\left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_1}+e^{\tilde{t}_2}-2} \right) (1-z^{-1})} + \frac{1-z^{-1}}{e^{\tilde{t}_1}+e^{\tilde{t}_2}-2} \right]. \quad (24)$$

Загальне представлення дискретної передатної функції *PID*-регулятора с незалежними настройками у формі *Z*-перетворення має вигляд:

$$D(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = K_p \left[1 + \frac{K_i T}{(1-z^{-1})} + \frac{K_d}{T} (1-z^{-1}) \right], \quad (25)$$

а відповідне йому різницеве рівняння має вигляд:

$$u[nT] = u[(n-1)T] + \left(K_p + \frac{K_i T}{2} + \frac{K_d}{T} \right) e[nT] + \left(\frac{K_i T}{2} - K_p - \frac{2K_d}{T} \right) e[(n-1)T] + \frac{K_d}{T} e[(n-2)T]. \quad (26)$$

На основі виражень (13), (25) можна укласти, що для керування об'єктом другого порядку із запізнюванням (15) оптимальним є *PID*-регулятор. Порівняння відповідних коефіцієнтів у вираженнях (24) і (25) приводить до основних співвідношень для оптимального настроювання адаптивного *PID*-регулятора с незалежними настройками [10]:

$$K_{p_{onm}} = \frac{\left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_1}+e^{\tilde{t}_2}-2} \right) (1-e^{-lbT})}{K_H \left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_1}-1} \right) \left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_2}-1} \right) [1+N(1-e^{-lbT})]}; \quad (27)$$

$$K_{i_{onm}} = \frac{\left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_1}-1} \right) \left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_2}-1} \right)}{T \left(\frac{T}{e^{\tilde{t}_1}+e^{\tilde{t}_2}-2} \right)}; \quad (28)$$

$$K_{d_{onm}} = \frac{T}{e^{\tilde{t}_1}+e^{\tilde{t}_2}-2}. \quad (29)$$

Величина $I_b \leq \frac{1}{T_b}$, ($T_b = f(a_1, \dots, a_n, \tau, T_{opt})$) – бажана постійна часу об'єкта, яка забезпечує гарантовану ступень стійкості, є параметром настроювання системи і входить тільки у формулу (27) для обчислення значення оптимального коефіцієнта підсилення пропорційної частині *PID*-регулятора.

З рівнянь (27), (28), (29) для настроювання параметрів цифрових *PID*-регуляторів можна одержати оптимальні настроювання (30), (31) для безупинних *PID*-регуляторів при $T \rightarrow 0$. Тоді для безупинного *PID*-регулятора:

$$K_{ponm} = \frac{I_b(t_1+t_2)}{K_H(1+I_bNT)}; \quad (30)$$

$$K_{iopt} = \frac{1}{(t_1+t_2)}; \quad (31)$$

$$K_{donm} = \frac{t_1 t_2}{t_1+t_2} \quad (32)$$

Моделювання цифрової АСК 3-го порядку (фрагмент програми), що містить з інерційний об'єкт 1-го порядку з запізнюванням, адаптивний фільтр та адаптивний *PID*-регулятор за технологією моделювання "Живий документ" у середовищі Матлаб на основі критерію бажаного перехідного процесу I_b гарантованого ступеня стійкості

$$\begin{aligned} W_0(s) &= \frac{k_0 e^{-TAU*s}}{(t_{ob}s+1)(t_{af}s+1)} = W_0(s) = \frac{k_0 e^{-TAU*s}}{(t_{ob}s+1)(t_{af}s+1)} = \frac{k_0 e^{-TAU*s}}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} = \\ &= \frac{k_0 e^{-TAU*s}}{(t_1 s + 1)(t_2 s + 1)} \end{aligned}$$

Припустимо, що, наприклад, адаптивний фільтр формує постійну часу t_{af} , формуючий фільтр моделі ідентифікувал статичний коефіцієнт

передачі об'єкта K_o і постійну часу об'єкта tob , які автоматично поступають в блок розрахунку оптимальних параметрів настроювання адаптивного регулятора. Якщо в процесі роботи АСК параметри об'єкта будуть змінюватися, відповідно, будуть перебудовуватися значення Ib і оптимальні параметри налаштування адаптивного PI - або PID -регулятора.

Результати та їх обговорення.

Отримано аналітичні вирази, що пов'язують критерій оптимізації та параметри налаштування адаптивного PI - PID -регулятора зі змінними параметрами об'єкта та адаптивного фільтра.

Розроблено метод синтезу моделі дискретних регуляторів із заданими динамічними характеристиками. Середня складова вихідних імпульсів на виході нелінійної ланки, що формується на виході такого регулятора і виділяється інерційною наведеною безперервною частиною, змінюється за законом, що визначається зворотною передатною функцією ланки нового формуючого фільтра моделі у зворотному зв'язку нелінійного елемента.

Розроблено метод синтезу моделі дискретного PID -регулятора із заданими динамічними характеристиками на основі критерію бажаного перехідного процесу гарантованого ступеня стійкості.

Моделювання показало, що якщо в процесі роботи АСК параметри об'єкта та адаптивного фільтра будуть змінюватися в широких межах, то, відповідно, одночасно будуть перебудовуватися і оптимальні параметри налаштування адаптивного PI - або PID -регулятора, забезпечуючи той же самий процес регулювання.

Висновки. Запропоновано аналітичний метод формування нелінійних траєкторій гарантованої точності на ділянках апроксимації.

Видалено аналітичні вирази для зв'язку критеріїв оптимізації та параметрів налаштування адаптивного PI - PID регулятора зі змінними параметрами об'єкта та адаптивного фільтра. Розроблено метод синтезу моделі дискретних регуляторів із заданих динамічних характеристик. Середній склад вихідних імпульсів на виході нелінійного каналу, який формується на виході такого регулятора і розглядається як інерційна

наведена безперервна частина, змінюється за законом, який позначається як функція зворотної передачі талреп нової литої моделі фільтра на хомуті нелінійного елемента.

Розроблено метод синтезу моделі дискретного ПД-регулятора із заданих динамічних характеристик на основі критерію необхідного перехідного процесу гарантованого рівня стійкості. Моделювання показало, що якщо параметри об'єкта та адаптивного фільтра змінюватимуться під час роботи АСК, то, очевидно, оптимальні параметри для налаштування адаптивного ПД-регулятора зміняться одразу. 6 рисунків, 0 таблиць, 32 формул, 19 бібліографічних джерел.

Список літератури

1. Теорія автоматичного управління. Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В. П. Бунь. – Електронні текстові дані. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с. – Режим доступу: URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41587>
2. Ситнік Б. Т. Синтез структури і моделювання адаптивних цифрових регуляторів корекції швидкості руху високошвидкісних поїздів із заданими під-законами формування імпульсних управлінь / Б. Т. Ситнік, В. О. Бриксін, І. В. Давидов // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті : тези стендових доповідей та виступів учасників 35-ї міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"* (Харків, 11 листопада, 2022 р.). – 2022. – Т. 27 № 3 (додаток). – С. 5. . – Режим доступу: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12566>
3. Системи силової електроніки та засоби керування в електроенергетиці. Силова електроніка в системах електроживлення: навч. посібник. . уклад.: С. П. Денисюк, Г. С. Белоха. – Електронне мережне навчальне видання. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 130 с. – Режим доступу: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/141_1565.pdf
4. Бриксін В.А. Адаптивне керування в дискретних системах високого порядку із запізнюванням. Ч. 1. Оптимізація на основі критерію гарантованого ступеня стійкості [Текст] / В.А. Бриксін, В.Б. Ситник, Б.Т. Ситник, В.С. Михайленко // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2011. – №2. – С. 3-8.
5. Бриксін В.А. Адаптивне керування в дискретних системах високого порядку із запізнюванням. Ч. 2 Моделювання цифрової системи третього порядку із запізнюванням з використанням критерію гарантованого ступеня стійкості [Текст] / В.А. Бриксін, В.Б. Ситник, Б.Т. Ситник, В.С. Михайленко // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2011. – №3. – С. 16-21.
6. Бриксін В.А. Адаптивне керування в дискретних системах високого порядку із запізнюванням. Ч. 3. Синтез адаптивного частотно-імпульсного РІ-регулятора з оптимізацією параметрів налаштування на основі критерію гарантованого ступеня стійкості [Текст] / В.А. Синтез адаптивного частотно-імпульсного РІ-регулятора з оптимізацією параметрів налаштування на основі критерію гарантованого ступеня стійкості, В.С. Михайленко, Б.Т. Ситнік, Ю.П. Усков, С.І. Яцько // *Науково-технічний*

журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2012. – №1. – С.71-79.

7. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Springer, 2001. 728 p. [doi: https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6)

8. Каргін А.А. Введення в інтелектуальні машини. Кн. 1. Інтелектуальні регулятори / А.А. Каргін. – Донецьк: Норд-Прес, ДонНУ, 2010. – 526 с.

9. Загарій Г. І. Критерій якості ухвалення рішення по керуванню в складній ієрархічній системі / Г. І. Загарій, С. В. Панченко, Б. Т. Ситнік, В. А. Бриксін // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2009. – № 3. – С. 54-58.

10. Ситнік Б.Т. Реалізація нейронечітких моделей і регуляторів гарантованої точності / В.А. Бриксін, В.С. Михайленко, Б.Т. Ситнік, С.І. Яцько // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2011. – №. 4., С.24-28.

11. Sytnik B. Construction of an analytical method for limiting the complexity of neural-fuzzy models with guaranteed accuracy. / B. Sytnik, V. Bryksin, S. Yatsko, Y. Vashchenko // *International Scientific Journal "East-European Journal of Advanced Technologies "*. – 2019. – № 2 (4). – С. 6-13. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2%284%29_2

12. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 1. Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду. / Ситнік Б.Т., Бриксін В.О., Ломотько Д.В., Ситнік В.В., Давидов І.В. // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – Харків: 2021. – №4. – С.24–35. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247235>

13. Ситнік Б.Т. Метод ідентифікації параметрів інерційних об'єктів / Б.Т. Ситнік, В.А. Бриксін, В.С. Михайленко, О.О. Пархоменко // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2013. – №5. – С.56-61.

14. Ситнік Б.Т. Метод ідентифікації параметрів інерційних об'єктів / Б.Т. Ситнік, В.А. Бриксін, В.С. Михайленко, О.О. Пархоменко // *Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. – 2014. – № 3. – С. 17-21. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2014_3_4

15. Бідюк П. І. Дослідження алгоритмів ідентифікації параметрів моделі в адаптивній системі керування екструдером / П. І. Бідюк, О. А. Жученко // *Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідомчий науково-технічний збірник*. – 2010. – № 16 (36). – С. 147–153. – Режим доступу: URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/8092>

16. Загарій Г.І. Перспективні системи забезпечення автоматизованого ведення графіку поїздів / В.О. Бриксін, Г.І. Загарій, С.В. Панченко, Б.Т. Ситнік, В.С. Михайленко // Тези доповідей 23 Міжнародної конференції "Перспективні комп'ютерні, керуючі й телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України", Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – №4. – С. 26–28.

17. Мірошник А.М. Структурно-параметрична індексна ідентифікація в адаптивних системах керування рухомими об'єктами / Ситнік Б.Т., Мірошник А.М. // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2023. – № 4. – С.64-70. – Режим доступу: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/296396>

18. Мірошник А.М. Удосконалення моделі та методу структурної ідентифікації параметрів інерційних об'єктів / Б. Т. Ситнік, Мірошник А.М. // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. – 2024. – № 1. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ Ikszt_2024_1

19. Мірошник А.М., Ситнік Б.Т. Синтез структури та моделювання адаптивних цифрових формуючих фільтрів. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2023. вип. 59. С.35-48. – Режим доступу: <http://mia.univer.kharkov.ua>

References:

1. Theory of automatic control. Textbook [Electronic resource]: textbook / compiled by O. Shtifzon, P. Novikov, V. Bun - Electronic text data - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020 - 144 p. – Access mode: URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41587>
2. Synthesis of the structure and modeling of adaptive digital controllers for correcting the speed of high-speed trains with specified sub-laws for the formation of pulse control / B. T. Sytnik, V. O. Bryksin, I. V. Davydov. Davydov // Information and control systems on railway transport: abstracts of poster presentations and speeches of participants of the 35th international scientific and practical conference "Information and control systems on railway transport" (Kharkiv, November 11, 2022) - 2022. - Vol. 27 No. 3 (supplement). – С. 5. – Access mode: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/12566>
3. Power electronics systems and controls in the electric power industry. Power electronics in power supply systems: a textbook. compiled by S. P. Denysiuk, H. S. Belokha - Electronic network educational edition. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. - 130 p. - Access mode: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/141_1565.pdf
4. Bryksin V.A., Sytnik V. B., Sytnik B. T., Mikhaylenko V. S. (2011) Adaptive control in high-order discrete systems with delay. Part 1. Optimization based on the criterion of guaranteed stability degree., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №2., P. 3-8.
5. Bryksin V.A. Sytnik V. B., Sytnik B. T., Mikhaylenko V. S. (2011) Adaptive control in high-order discrete systems with delay. Part 2. Modeling of the third-order digital system with delay with vikoristannya criterion of the guaranteed degree of stability., Optimization based on the criterion of guaranteed stability degree., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №3., P.16-21.
6. Bryksin V.A., Mikhaylenko V.S., Sytnik B.T., Uskov YU.P., Yats'ko S.I. (2012) daptive control in high-order discrete systems with delay. Part 3. Synthesis of adaptive frequency-pulse PI-controller with optimization of tuning parameters on the basis of guaranteed stability degree criterion., Optimization based on the criterion of guaranteed stability degree., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №1., P.71-79.
7. Piegat A. (2001) Fuzzy Modeling and Control. Springer., 728 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>
8. Kargin A.A. (2010) Introduction to Intelligent Machines. Book 1: Intelligent Controllers., Donetsk: Nord-Press, DonNU., 526 p.
9. Zahariy H. I., Panchenko C.V., Sytnik B.T., Bryksin V.A. (2009) Quality criterion for making management decisions in a complex hierarchical system., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №3., P.54-58.
10. Zahariy H. I., Panchenko C.V., Sytnik B.T., Bryksin V.A (2011) Realization of neuro-fuzzy models and regulators of guaranteed accuracy., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №. 4., P.24-28.
11. Sytnik B., Bryksin V., Yatsko S, Vashchenko Y. (2019), Construction of an analytical method for limiting the complexity of neural-fuzzy models with guaranteed accuracy.,

International science-metric scientific journal "East European Journal of Advanced Technologies", ISSN 1729-4061 (Online), ISSN 1729-3774.– Vol 2, No 4 (98) p.8-13.

12. Sytnik B. T., Bryksin V. O., Lomot'ko D. V., Sytnyk V. V., Davydov I. V. (2021) Models and methods for creating systems for the implementation of high-speed train schedules with adaptive speed correction based on actual travel parameters. Part 1: Structure of the automatic system for fuzzy setting of the schedule of the speed of a moving object with its correction according to the actual parameters of the passage., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №4., P.24–35. Access mode: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247235>

13. Sytnyk B.T., Bryksyn V.A., Mykhaylenko V.S., Parkhomenko A.A. (2013) Method of identification of parameters of inertial objects., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №5., P.56-61. [Elektronnyi resurs]:– Access mode: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=33934

14. Sytnik B.T., Kurtsev M. S., Mikhaylenko V. S. (2014) Structural-parametric identification in adaptive train traffic control systems., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", №3. – P. 17-21.

Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2014_3_4

15. Research of algorithms for identifying model parameters in the adaptive control system of an extruder / P. I. Bidyuk, O. A. Zhuchenko // Adaptive automatic control systems: interdepartmental scientific and technical collection. 2010 - No. 16 (36) - P. 147-153 - Access mode: URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/8092>

16. Zagariy G.I. Perspective systems for providing automated train scheduling / V.O. Bryksin, G.I. Zagariy, S.V. Panchenko, B.T. Sytnik, V.S. Mykhailenko // Abstracts of the 23rd International Conference "Perspective computer, control and telecommunication systems for railway transport of Ukraine", Information and control systems on railway transport.. – 2010. – №4. – C. 26–28.

17. Miroshnyk A.M., Sytnyk B.T. (2023) Structural-parametric index identification in adaptive control systems for moving objects., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", № 4., P.64-70. Access mode: <http://jiks.kart.edu.ua/article/view/296396>

18. Miroshnyk A.M., Sytnyk B.T. (2024) Improvement of the model and method of structural identification of parameters of inertial objects., Scientific and technical journal "Information and control systems on railway transport", № 1., – P. 21-36.– Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2024_1

19. Miroshnyk A.M., Sytnik B.T. (2023) Structure synthesis and modeling of adaptive digital shaping filters., Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Mathematical Modeling. Information technologies. Automated control systems", впр. 59., P.35-48.– Access mode: <http://mia.univer.kharkov.ua>

Надійшла 31.03.2024 р.

Представив д-р техн. наук, проф. Харківського Національного Університету імені В.В. Каразіна Мірошник Марина Анатоліївна

Kachanov Petro, doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Higher Education automation and control in technical systems of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic University", Kharkiv, Kirpychova St.,2, 61002

e-mail: petro.kachanov@khpі.edu.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-7532-5913>

Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine.

E-mail: bts12021947@gmail.com,
<http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Miroshnyk Anatolii, assistant.

Kharkiv National University of Radioelectronics

Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166

graduate student of the department "Automation and control in technical systems, ACTS",
NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine.

Tel.: (095) 82-69-640, e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua

ORCID ID: 0000-0001-5702-9611

УДК 681.513.6:621.337.1:004

Синтез апаратних та програмних засобів адаптивних дискретних систем управління високого порядку на основі моделі бажаного перехідного процесу гарантованого ступеня стійкості / Качанов П. О., Ситнік Б.Т., Мірошник А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2024. – № 1 – 2 (11 – 12). – С. 122 – 139.

В роботі видалено аналітичні вирази для зв'язку критеріїв оптимізації та параметрів налаштування адаптивного PI-PID регулятора зі змінними параметрами об'єкта та адаптивного фільтра. Розроблено метод синтезу моделі дискретних регуляторів із заданих динамічних характеристик. Розроблено метод синтезу моделі дискретного ПІД-регулятора із заданих динамічних характеристик на основі критерію перехідного процесу гарантованого рівня стійкості. 3 рисунка, 0 таблиць, 32 формул, 19 бібліографічних джерел.

Ключові слова: структурно-параметрична ідентифікація; моделі індексної ідентифікації; висока потік рідини; формувальні фільтри-регулятори.

UDC 681.513.6:621.337.1:004

Synthesis of hardware and software for adaptive discrete high-order control systems based on a model of the desired transient process with a guaranteed degree of stability / P.O. Kachanov, B.T. Sytnik, A.M. Miroshnyk // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2024. – № 1 – 2 (11 – 12). – P. 122 – 139.

In this work, analytical expressions for the connection between optimization criteria and settings parameters of the adaptive PI-PID controller with variable parameters of the object and adaptive filter have been removed. A method for synthesizing a model of discrete controllers based on given dynamic characteristics has been developed. A method has been developed for synthesizing a model of a discrete PID controller based on given dynamic characteristics based on the criterion of the transient process of a guaranteed level of stability. 3 figures, 0 tables, 32 formulas, 19 bibliographic sources..

Analytical expressions have been removed to link the optimization criteria and adjustment parameters of the adaptive PI-PID controller with the variable parameters of the object and adaptive filter.

A method for synthesizing a model of discrete controllers from specified dynamic characteristics has been developed. The average warehouse of output pulses at the output of a nonlinear channel, which is formed at the output of such a regulator and is seen as an inertial induced uninterrupted part, changes according to the law, which is designated as a reverse transmission the function of the lanyard of the new molded filter model at the collar of the non-linear element.

A method has been developed for synthesizing a model of a discrete PID controller from specified dynamic characteristics based on the criterion of the required transient process of a guaranteed stability level.

The modeling showed that while the parameters of the object and the adaptive filter will change during the ASC operation, then, obviously, the optimal parameters for adjusting the adaptive PID controller will immediately change.

Keywords: structural and parametric identification; models of indexical identification; high flow of liquid; shaping filters-regulators.