УДК 681.31

КАЧАНОВ П.О., доктор технічних наук, професор, професор ЗВО кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»
СИТНІК Б. Т., кандидат технічних наук, доцент, доцент ЗВО
МІРОШНИК А.М., аспірант кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»

Удосконалення моделі та методу структурної ідентифікації параметрів інерційних об'єктів

Представив д.т.н., професор Приходько С.І.

Удосконалено *моделі ідентифікації параметрів та структури складного динамічного рухомого об'єкта (РО) для побудови адаптивних систем керування (АСК) для корекції параметрів налаштування регуляторів.*

Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати як при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра так і при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в обмеженому діапазоні змін коефіцієнта адаптації, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації. Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтру моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n. В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм.

Ключові слова: структурно-параметрічна ідентифікація, адаптивна система керування, високошвидкісний рух, формуючий фільтр.

Вступ.

Зниження витрат палива та енергії високошвидкісних РО пов'язане з необхідністю створення систем автоматичного керування, їх ідентифікацією, оптимізацією та адаптацією [1, 2, 12-22], забезпеченням безпеки обслуговуючого персоналу, високою швидкодією обладнання та обмеженими реакціями людини [23-25], що потрибує його виключення з процесу управління РО.

Аналіз наявних рішень.

Цифрові системи керування (ЦСК) [10, 11] 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 такой системи з блоком идентифікації та адаптивним ПІД-регулятором наведено на рис. 1.

© КАЧАНОВ П.О., СИТНІК Б. Т., МІРОШНИК А.М., 2024

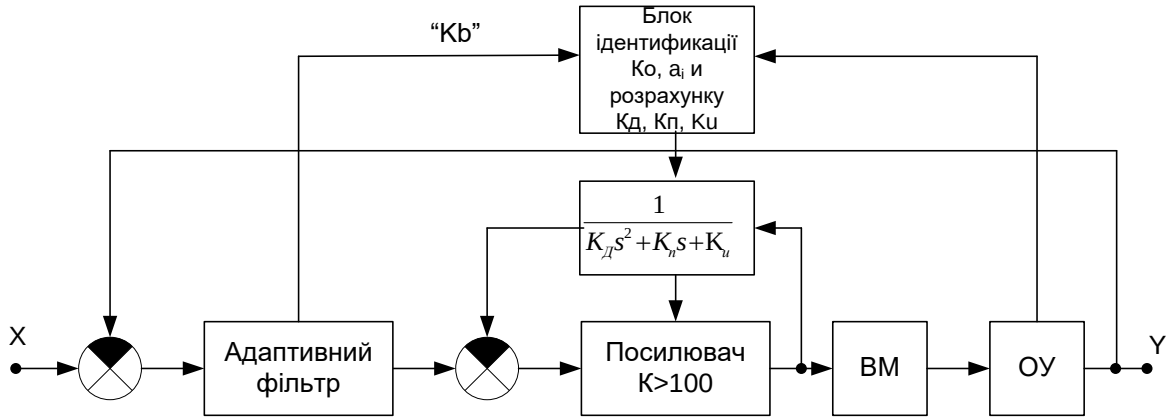


Рисунок 1 – Структура системи з блоком ідентифікації та адаптивним ПІД-регулятором

Провідни залізнични компанії [5-9] впроваджують квадрокоптери для контролю та діагностування залізничних об'єктів, боротьби з крадіжками, вандалізмом та вирішення інших проблем на підприємствах залізниць. Дрони збирають інформацію, яка дозволяє підвищити до 20% показники безпеки та значно зменшити витрати.

Наприклад, за даними компанії BNSF (США) кожна колія двічі на тиждень повинна перевіряться обхідниками. Безпілотний контроль квадрокоптерами може збільшити частоту перевірок колії для покращення стану безпеки руху потягів.

Велика кількість сучасних наукових досліджень та реалізацій АСК присвячена створенню робастних, нейроподібних, нечітких, інтелектуальних фільтрів та регуляторів [1, 2, 3].

АСК [2, 3] знаходять застосування як системи керування складними нестаціонарними та багатовимірними об'єктами, що суттєво покращує їх характеристики надійності та техніко-економічні показники. За наукову основу досліджень було взято роботи вчених Бесекерського В.А., Загарія Г.І., Заде Л.А, Лазаряна, В.А., Поспелова Д. А., Ципкіна Я.З.

Роботи цих та багатьох інших вчених [1-30] створили методичні та теоретичні передумови розвитку теорії АСК.

Мета дослідження.

Метою дослідження є забезпечення можливості ідентифікації всіх статичних та динамічних параметрів інерційних об'єктів шляхом організації послідовності визначення параметрів процесів ідентифікації та логіки організації підключення об'єкта до формуючих фільтрів системи ідентифікації.

Постановка задачі.

Завданням дослідження є розроблення нових моделей ідентифікації параметрів та структури РО для корекції поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів АСК.

Основний матеріал.

Розглянемо обмеження відомої моделі та методу перешкодо захищеної ідентифікації. Структура схема відомої моделі надана на рис.2.

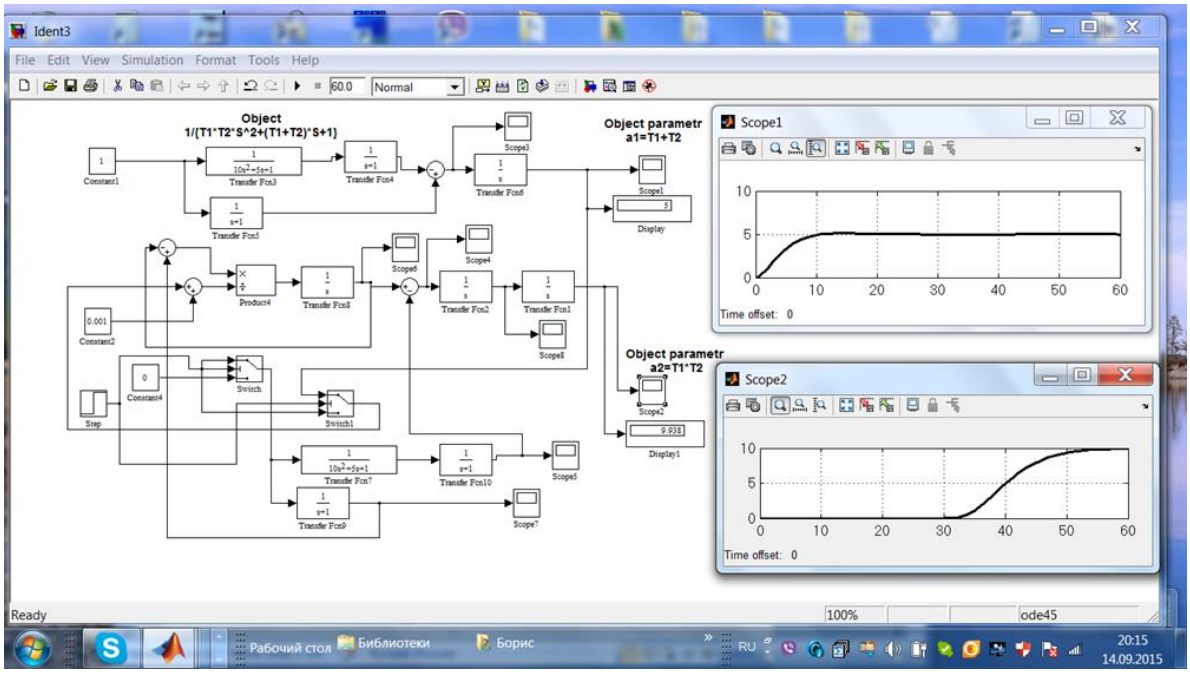


Рисунок 2 – Структура схема відомої моделі.

Динамічний об'єкт можна уявити передавальною функцією виду $W_o(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{c_k s^k + \ldots + c_2 s^2 + c_1 s + 1} = \frac{K_0}{e^{\tau s}(c_k s^k + \ldots + c_2 s^2 + c_1 s + 1)} \approx$

$$\approx \frac{K_0}{(\frac{\tau}{m}s+1)^m (c_k s^k + \ldots + c_2 s^2 + c_1 s + 1)} \approx \frac{K_0}{a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (1)$$

де n=m+k,

K_0 - статичний коефіцієнт посилення.

В [1] при $K_0=1$ запропоновано для визначення значень параметрів a_1 і a_2 використовувати теорему про кінцеве значення функції і помилку ідентифікації $e_1(s)$ в режимі, що встановився в наступному вигляді

$$e_1(s) = \left[W_{\phi 1}(s) - W_o(s) W_{\phi_2}(s)\right] X_{вх}(s) \quad (2)$$

і

$$e_1(0) = \underset{s\to 0}{slim}\left\{\left[W_{\phi_1}(s) - W_o(s) W_{\phi_2}(s)\right] X_{вх}(s)\right\} \quad (3)$$

та фільтри

$$W_{\phi_2}(s) = \frac{1}{a_{\phi_1} s + 1} \quad (4)$$

і

$$W_{\phi_2}(s) = \frac{1}{a_{\phi_2} s + 1} \quad (5)$$

Недоліком цієї моделі є те, що вона крім ідентифікації динамічних параметрів налаштування a_1 і a_2 не визначає ні його статичного коефіцієнта посилення при $K_0 \neq 1$ ні ідентифікацію динамічних параметрів інерційних об'єктів a_1 і a_2 при $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$, при введенні в пристрій [16, 17] аперіодичного та адаптивного фільтрів, що підключаються до входу та виходу об'єкта, відповідно, при впливі на систему ідентифікації перешкод зі змінними характеристиками.

Крім того ця модель не може бути розширена на ідентифікацію поточних параметрів об'єктів *n*-ого порядку з будь-якими значеннями: $K_0, a_1, a_2, \ldots a_n$. Якщо $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$, то при $X_{вх}(s) = \frac{1}{s}$ на виходах обчислювача в режимі, що встановився $t \to \infty, s \to 0$ формуються сигнали

$$X_{вых_1}(s) = e_1(s) = \frac{a_{\phi_2} a_2 s^2 + (a_2 + a_1 a_{\phi_2}) s + (a_{\phi_2} + a_1 - a_{\phi_1})}{(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{\phi_1} s + 1)(a_{\phi_2} s + 1)}$$

(6)

і

$$X_{вых_1}(0) = a_{\phi_2} + a_1 - a_{\phi_1}. \quad (7)$$

$X_{вых_2}(s)$ шукається як зображення інтеграла від помилки ідентифікації

$$e_2(s) = \underset{s\to 0}{slim}\left\{\left[W_{\phi 1}(s) W_f(s) - W_o(s) W_{\phi_2}(s) W_f(s)\right] X_{вх}(s)\right\}$$

де $W_f(s)$ формуючий фільтр моделі (ФФМ) з передавальною функцією $W_f(s) = \frac{1}{a_{\phi 3} s + 1}$ і $a_{\phi 3} \neq a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$

$$X_{вых_2}(s) = \frac{e_2(s)}{s}$$

$$X_{вых_2}(s) = \frac{e_2(s)}{s} = \frac{a_{\phi_2}a_2s^2+\left(a_2+a_1a_{\phi_2}-a_1a_{\phi_1}\right)s \ +(a_{\phi_2}-a_{\phi_1})}{s \ \ (a_2s^2+a_1s+1)\left(a_{\phi_1}s+1\right)\left(a_{\phi_2}s+1\right)(a_1s+1)}$$

(8)

З цього випливає, що за $a_{\phi_1} \neq a_{\phi_2}$

$$X_{вых_2}(0) = \infty,$$

тобто система непрацездатна і, крім цього, вона не працює, якщо K_0 відрізняється від 1.

У системі ідентифікації [1], структурна модель якої наведена на рис.3, другий параметричний вихід другого адаптивного фільтра (АФ), підключеного до виходу об'єкта (рис.3), використовується для встановлення постійної часу другого керованого фільтра, підключеного до входу об'єкта, чим забезпечується рівність постійних часу першого та другого фільтрів при змінних перешкодах.

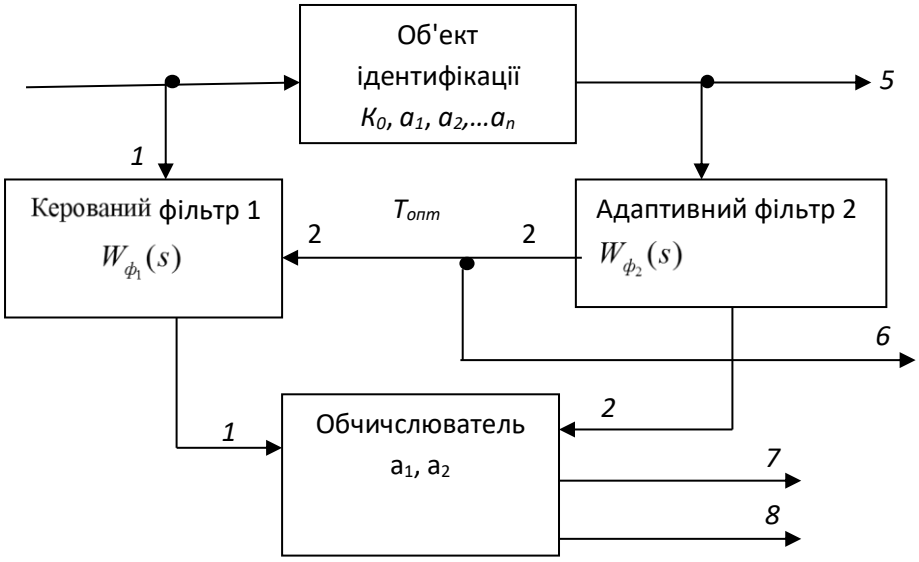


Рисунок 3 – Структурна схема перешкодо захищеної системи ідентифікації.

Отже, наявність цієї відмітної ознаки призводить до виключення ручного налаштування фільтрів при змінних перешкодах, що забезпечує рівність їх постійних часу і точність вимірювання параметрів об'єкта, що досліджується, і є метою роботи.

На вхід другого фільтра надходить вихідний сигнал об'єкта з адитивною перешкодою. Передатна функція другого фільтра описується виразом (5), де a_{ϕ_1} - сигнал другого входу першого керованого фільтра. Так як $a_{\phi 1} = a_{\phi_2} = T_{опт}$, то передавальні функції першого фільтра та другого фільтра рівні.

При $a_{\phi_1} = a_{\phi_2} = a_{\phi} = T_{опт}$ на виходах 7 і 8, відповідно, обчислювача в режимі, що встановився при $t \to \infty, s \to 0$ та при $X_{вх}(s) = \frac{1}{s}$ формуються сигнали

$$X_{вых_1}(s) = \frac{a_1s}{(a_2s^2+a_1s+1)(a_{\phi}s+1)}X_{вх}(s), \qquad (9)$$

$$X_{вых_2}(s) = \frac{a_2s^2}{s \ \ (a_2s^2+a_1s+1)(a_{\phi}s+1)(a_1s+1)}X_{вх}(s), \qquad (10)$$

На виходах обчислювача формуються сигнали

$$X_{вых_1}(0) = a_1 \text{ і } X_{вых_2}(0) = a_2, \qquad (11)$$

які не залежать від змінних параметрів фільтрів.

Пропонована модель перешкодо-захищеної системи ідентифікації, структурна схема якої наведена на рис.4, може бути розширена на ідентифікацію поточних параметрів об'єктів *n*-ого порядку з будь-якими значеннями: K_0, a_1, $a_2,...a_n$ при дослідженні та налагодженні систем автоматичного регулювання в умовах впливу на них перешкод змінної інтенсивності.

Передатна функція об'єкта *n*-ого порядку з параметрами: K_0, a_1, $a_2,...a_n$. має такий вигляд (1). До таких систем відносяться, наприклад, замкнуті контури керування потяги з різним числом вагонів різної маси [23-25].

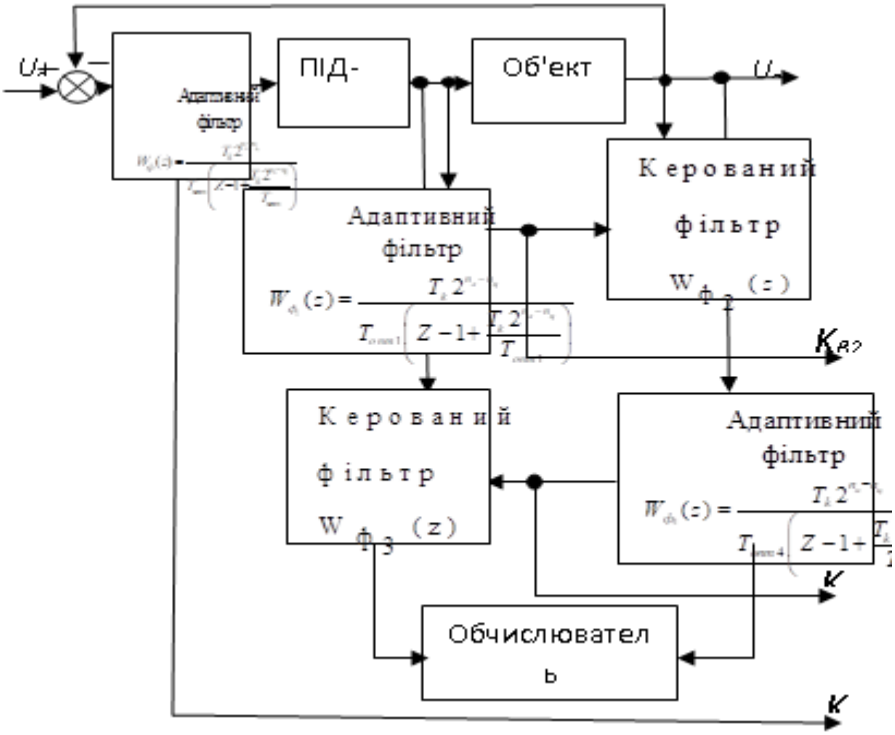


Рисунок 4 – Структурна схема пропонованої перешкодо-захищеної системи ідентифікації всіх параметрів об'єктів n-ого порядку з будь-якими значеннями параметрів: K_0, a_1, a_2, …a_n.

Введемо в структуру моделі формуючий фільтр з передатною функцією

$$W_f(s) = \frac{K_f}{b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}, \quad (12)$$

тоді передатна функція моделі з формуючим та керованим фільтрами дорівнює

$$W_m(s) = \frac{K_f}{(b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)(a_\phi s + 1)}, \quad (13)$$

а передатна функція моделі об'єкта, що досліджується, з АФ має наступний вигляд

$$W_o(s) = \frac{Ko}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} \quad (14)$$

Визначення статичного коефіцієнта посилення об'єкта. Для визначення статичного коефіцієнта використовуємо або метод поділу вихідного сигналу об'єкта на вхідний, або метод параметричної ідентифікації методом мінімізації помилки вихідних сигналів об'єкта і моделі пропущених через адаптивний і керований фільтри.

Процедура визначення всіх динамічних параметрів передавальної функції об'єкта a_1, a_2… a_n

Знайдемо помилку

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) =$$
$$= \frac{K_f}{(b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)(a_\phi s + 1)} - \frac{Ko}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$
$$= \frac{K_f(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - Ko(b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{(b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

Визначення значення a1. Введемо в модель формуючого фільтра отримане значення $K_f = K_0$ і встановимо значення коефіцієнтів передавальної функції моделі формуючого фільтра $b_0=1$, $b_1=0$, $b2=0, \ldots, b_n=0$. Тоді отримаємо

$$W_f(s) = \frac{Ko}{(b_m s^m + \ldots + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)(a_\phi s + 1)} = \frac{Ko}{(0 s^m + \ldots + 0 s^2 + 0 s + 1)(a_\phi s + 1)} = \frac{K_o}{1} = K_o$$

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) = \frac{K_0(a_n s + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - K_0}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$
$$= \frac{K_0(a_n s + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

Вихідний сигнал$X_{вых_1}(s)$ при $X_{вх}\ (s) = \frac{1}{s}$ дорівнює

$$X_{вых_1}(s) = W_e(s) * X_{вх}\ (s) =$$
$$= \frac{K_o(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{ф1}\, s + 1)} * \frac{1}{s} =$$
$$= \frac{K_o(a_n s^{n-1} + \ldots + a_2 s^1 + a_1)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{ф1}\, s + 1)}$$

У режимі, що встановився

$$X_{вых_1}(0) = s\ \underset{s \to 0}{\lim}(W_e(s) * X_{вх}\ (s)) =$$
$$s\ \underset{s \to 0}{\lim} W_e(s) * X_{вх}\ (s) = s\ \underset{s \to 0}{\lim} X_{вых_1}(s) =$$
$$= s\ \underset{s \to 0}{\lim}\left[\frac{K_o(a_n s^{n-1} + \ldots + a_2 s^1 + a_1)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_{ф1}\, s + 1)}\right] = Ko * a_1 * s$$

Ділимо значення сигналу $X_{вых_1}(s)$ на K_0, і інтегруємо його, а на виході інтегратора $X_{вых_{a1}}(0)$ в режимі, що встановився, отримаємо значення параметра a_1

$$X_{вых_{a1}}(0) =_s \underbrace{lim\vec{}_0 \frac{X_{вых1}(s)}{K_o s}}_{s} \underbrace{lim\vec{}_0 \frac{s\ \ K_o * a_1}{K_o s}}_{1}$$

Визначення значення a_2. Встановимо коефіцієнти передавальної функції моделі формуючого фільтра, ввівши в модель отримані значення коефіцієнта передавальної функції об'єкта a_1 та K_f. наступним чином: $K_f = K_0$, $b_0 = 1$, $b_1 = a_1$, $b_2 = 0, \ldots$, $b_n = 0$. Тоді отримаємо

Тоді модель має передатну функцію виду

$$W_m(s) == \frac{Ko}{(a_\phi s + 1)(0 * s^m + \ldots + 0 * s^2 + a_1 s + 1)}.$$

Визначимо передатну функцію помилки моделі об'єкта $W_e(s)$.

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) =$$
$$= \frac{K_o}{(a_\phi s + 1)(0 * s^m + \ldots + 0 * s^2 + a_1 s + 1)} - \frac{Ko}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$
$$= \frac{K_o(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) -}{K_{1o} \quad (a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$
$$= \frac{K_o(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$X_{вых2}(0) = s\ \underset{s \to 0}{\lim}(W_e(s) * X_{вх}\ (s)) =_s \underset{s \to 0}{\lim}(W_e(s) * X_{вх}\ (s) =$$
$$=_s \underset{s \to 0}{\lim} \frac{Ko(a_n s^n + \ldots + a_2 s^3)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} * \frac{1}{s} =$$
$$=_s \underset{s \to 0}{\lim} \frac{Ko(a_n s^{n-1} + \ldots + a_2\, s^2)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$X_{вых2}(0) = s_s \underbrace{lim\vec{}_{0\,e_{вх}}}_{s} \underbrace{lim\vec{}_{0\,e_s}}_{2} \underbrace{lim\vec{}_0{}^2}_{2}$$

Розділимо $X_{вых2}(s)$ на отримане значення коефіцієнта Ko і двічі проінтегруємо

$$X_{вых_{a2}}(0) =_s \underbrace{lim\vec{}_0 \frac{X_{вых2}(s)}{K_o s^2}}_{s} \underbrace{lim\vec{}_0 \frac{s^2 K_o * a_2}{K_o s^2}}_{2}$$

Визначення значення a_3. Аналогічно додаємо в модель отримані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта K_0, a_1 і a_2

$$W_e(s) = W_m(s) - W_o(s) =$$
$$= \frac{Ko}{(0 * s^m + \ldots + 0 * s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} - \frac{Ko}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$
$$= \frac{Ko(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1) - Ko(a_2 s^2 + a_1 s + 1)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)} =$$
$$= \frac{Ko(a_n s^n + \ldots + a_3 s^3)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)}$$

$$X_{вых_3}(s) = W_e(s) * X_{вх}\ (s) * \frac{1}{s^3} =$$
$$= \frac{Ko(a_n s^n + \ldots + a_3 s^3)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1))(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} * \frac{1}{s^3} =$$
$$= \frac{Ko(a_n s^{n-3} + \ldots + a_3)}{(a_n s^n + \ldots + a_2 s^2 + a_1 s + 1)(a_\phi s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)}$$

Розділивши $X_{вых_3}(s)$ на отримане значення коефіцієнта *Ko* і три рази про інтегрувавши отримаємо значення коефіцієнта a_3 на виході ідентифікатора $X_{вых_{a3}}(0)$:

$$X_{вых3}(0) = s_s \underbrace{lim^{\rightarrow}{}_{0} e_{вх}\ \ s \underbrace{lim^{\rightarrow}{}_{0} e \frac{1}{s_s} \underbrace{lim^{\rightarrow}{}_{0} e_3}}}$$

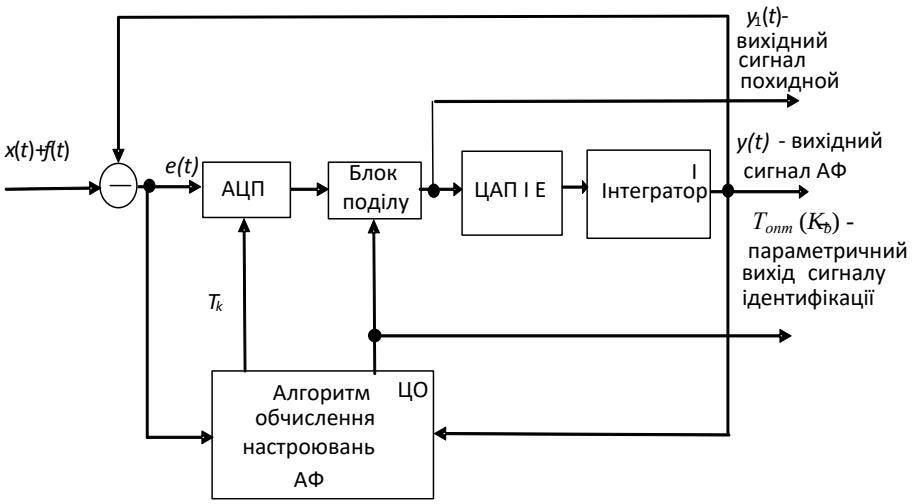
$$X_{вых_{a3}}(0) = \frac{X_{вых_3}(0)}{K_o} = a_3$$

Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтру моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n. В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм. Як випливає з виразів (4), (5) значення постійних часу не адаптивних фільтрів не залежать від характеристик перешкод, що вимагає попереднього налаштування фільтрів на певний спектр перешкод, а при його зміні може призвести до значного зниження точності вимірювання параметрів об'єкта, що досліджується. Так як частотний спектр перешкод у вхідному та вихідному сигналах вимірюваного об'єкта завжди різний, то при встановленні адаптивних та керованих фільтрів їх постійні часу будуть встановлюватися автоматично без попереднього налаштування, і при зміні амплітудних та частотних характеристик перешкод у вхідному та вихідному сигналах об'єкта $a_{\phi_1} = a_{\phi_2}, a_{\phi_3} = a_{\phi_4}$ і, отже, пристрій стає працездатним.

Аналіз стійкості цифрового адаптивного фільтра. Структурна схема відомої обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі АФ, синтез якої проведено у роботах [16-19], наведено на рис.5. АФ [16-19] включає інтегратор, вихід якого є адаптивним виходом пристрою, на якому формується відфільтрований сигнал, блок поділу, вихід якого є другим виходом пристрою, на якому формується сигнал, зворотно-пропорційний постійної еквівалентної часу адаптивного фільтра. Еквівалентна постійна часу АФ змінюється таким чином, щоб забезпечити ефективне придушення перешкоди при мінімальних амплітудних і фазових спотвореннях корисного сигналу.

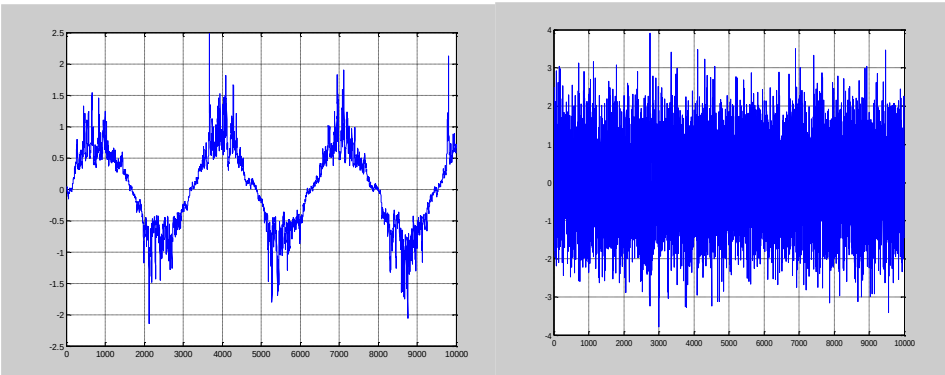
При моделюванні перешкод замість генератора шуму може використовуватися генератор високої частоти $\omega_\phi >> \omega_\beta$, а при моделюванні корисного випадкового сигналу - аперіодичний фільтр, що відбілює сигнал.

Результати моделювання на програмної моделі адаптивного цифрового фільтру наведено на рис. 6.



АЦП – аналого-цифровий перетворювач, ЦО – цифровий обчислювательь, ЦАП і Е – цифро-аналоговий перетворювач та екстраполятор з передавальною функцією $W_e(s)$, І – інтегратор із передавальною функцією $K(s)$, T_k – період квантування (дискредитації), K_b - коефіцієнт адаптації.

Рисунок 5 - Структурна блок-схема обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі АФ



а) б)

а) Вихідний сигнал фільтру с завадою filter_out±E(N1,1), б) Сигнал завад F на вході фільтру.

Рисунок 6- Результати моделювання АФ

В m-файлі програмної S-моделі АФ використовувалися наступні формули**:**

m_xam=1.0; Амплітуда вхідного сигналу фільтра;

m_xch=2.0; Частота вхідного сигналу фільтра;

n=0:0.001:9.999; m_t=0.001; m_mod=10.0; m_ti=0.01; m_d=0.1; m_m=1.0; NI=m_mod/m_t;

E(N1,1)=X(N1,1)-filter_out(N1-1,1)+F(N1,1);

EA(N1,1)=E(N1,1)*E(N1,1);

ED(N1,1)=EA(N1,1)+m_d;

YA(N1,1)=filter_out(N1-1,1)^2+m_d;

Y1(N1,1)=E(N1,1)*YA(N1,1)/(ED(N1,1));

Kb(N1,1)=YA(N1,1)/(m_d+ED(N1,1));

filter_out(N1,1)=(0.5*m_t/m_ti)*(Y1(N1,1)+Y1(N1-1,1))+filter_out(N1-1,1).

Результати моделювання наступні:

Вхідний сигнал X=1sin(m_xch*n).

Вхідний сигнал завад F(N1,1)=±3.5*sqrt((-2)*log(A)).*cos(2*pi*B), де A=rand(NI,1), B=rand(NI,1).

Вихідний сигнал Y с завадою filter_out±E(N1,1)=1±(0.1±1.5)sin(m_xch*n), тобто рівень завад 3.5 змінюється при зміні амплітуди сигналу від 0.1 до 1.5.

Вихідний сигнал змін коефіцієнта адаптації *Kb≈від 2.3 до 35*.

Структурну схему обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі керованого фільтра [1] наведено на рис.7.

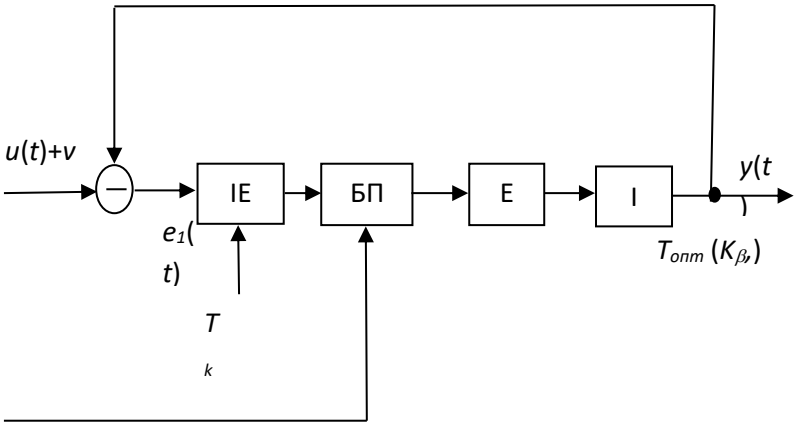


Рисунок 7 – Структурна схема обчислювальної цифро-аналогової імітаційної моделі керованого фільтра.

ІЕ-імпульсний елемент, БП – блок подилу, Е-екстраполятор, І-інтегратор

Передатна функція АФ каналом *x→y* дорівнює

$$W_{ф2}(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{1}{T_{опт}s+1}, \quad (15)$$

де

$$T_{опт} \approx \frac{T_\beta}{K_b} \approx \frac{T_\beta\sqrt{Q}}{\sqrt{R}} = a_{ф2} \quad (16)$$

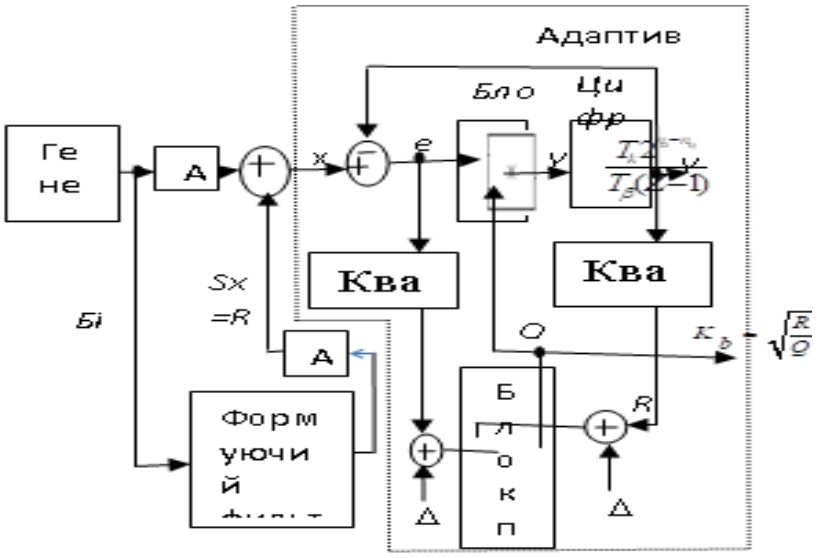
оптимальне значення постійного часу фільтра,

T_β - необхідна постійна часу фільтра за корисним сигналом,

K_b - коефіцієнт адаптації,

Q і R – поточні значення рівнів спектральних густин перешкоди та корисного сигналів, відповідно.

При переході до цифрових аналогів ланок структурних елементів фільтрів моделі навіть структурно стійкі ланки першого порядку можуть втрачати стійкість за певних співвідношеннях параметрів цих ланок і періодом дискретизації. Відповідно до [18, 19] для реалізації цифро-аналогової імітаційної моделі АФ може бути використана система, структурна схема якої наведена на рис. 8.



БП – блок поділу; І – інтегратор; БМ – блок множення; Δ - мала величина, що вводиться в дільник для виключення поділу на нуль.

Рисунок 8 - Структурна схема цифровааналогової імітаційної моделі цифрового АФ

Вихідний сигнал блоку поділу дорівнює поточному значенню K_b коефіцієнта адаптації і може бути використаний для автопідстроювання параметрів налаштування цифрових регуляторів за зміни оптимального значення постійного часу АФ. Послідовним з'єднанням адаптивних фільтрів може бути реалізована структура АФ вищого порядку.

Передаточна функція розімкнутого фільтра з функцією передавання *K(s)* з екстраполятором *We(s)* має вигляд:

$$W_p(s) = W_e(s)K(s) = \frac{1-e^{-st}}{s} \cdot \frac{1}{T_{опт}s}. \quad (17)$$

де n_a і $n_ц$ - розрядності перетворювачів АЦП та ЦАП, $K_{a-ц} = 2^{n_a - n_ц}$- підсумковий статичний коефіцієнт передачі перетворювачів АЦП та ЦАП.

Z-перетворення цієї передавальної функції має вигляд

$$W_p(Z) = \frac{T_k}{T_{опт}(Z-1)}. \quad (18)$$

Z-передаточна функція замкнутого контуру (суматор. блок множення, інтегратор) цифро-аналогової імітаційної моделі цифрового АФ має вигляд

$$H(Z) = \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}\left(Z-1+\frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}}\right)} = \frac{A(Z)}{B(Z)}. \quad (19)$$

Для аналізу стійкості розглянемо характеристичне рівняння замкнутого контуру (19)

$$B(Z) = Z - 1 + \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}} = 0. \quad (20)$$

Застосувавши до цього рівняння білінійне перетворення, отримаємо

$$B(W) = \frac{1+W}{1-W} - 1 + \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}} = 0$$

та

$$\frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}} W + 2 - \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}} = 0. \quad (21)$$

За критерієм Гурвіца ця система стійка, якщо виконується умова позитивності коефіцієнтів $d_0>0$ і $d_1>0$,

де $d_0 = \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}}$, а $d_1 = 2 - \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}}$, тобто $0 < \frac{T_k 2^{n_a - n_ц}}{T_{опт}} < 2$.

Отже, для стійкості цифрового АФ необхідно, щоб постійні часу T_β, $T_{опт} \approx \frac{T_\beta}{K_\beta} \approx \frac{T_\beta\sqrt{Q+\Delta}}{\sqrt{R+\Delta}} = a_{ф2}$,

коефіцієнт адаптації $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$, та T_k перебували у таких межах

$$0 < \frac{1}{T_{опт}} < \frac{2}{T_k 2^{n_a - n_ц}}$$

або

$$0 < K_\beta < \frac{2^{n_ц - n_a + 1} T_\beta}{T_k} \qquad (22)$$

При прагненні до нуля складової оцінки дисперсії за корисним сигналом ($Q \to 0$), ця нерівність може бути порушена, і в цьому випадку в адаптивному фільтрі виникнуть нестійкі коливання, що розходяться. Для їх усунення необхідно до велич R і Q додати константу Δ малої величини, що обмежує діапазон адаптації коефіцієнта $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$ при заданому відношенні $\frac{2^{n_ц - n_a + 1} T_\beta}{T_k}$ з урахуванням розрядності перетворювачів АЦП и ЦАП.

Аналіз системи ідентифікації. Приклад моделювання системи ідентифікації об'єкта, що досліджується, з передатною функцією третього порядку має вигляд

$$W_o(s) = \frac{3}{6s^3 + 10s^2 + 5s + 1}.$$

Для спрощення розглянемо схему прикладу без логічного пристрою, підключивши моделі об'єкта безпосередньо до відповідних входів 1, 2, 3, 4 та виходів 1, 2, 3, 4 формуючих фільтрів системи ідентифікації

Комп'ютерна модель запропонованої системи ідентифікації та її структурних елементів, а також графіки перехідних процесів ідентифікації параметрів K_0, a_1, a_2, $a3$, інерційного об'єкта наведено на рис.9.

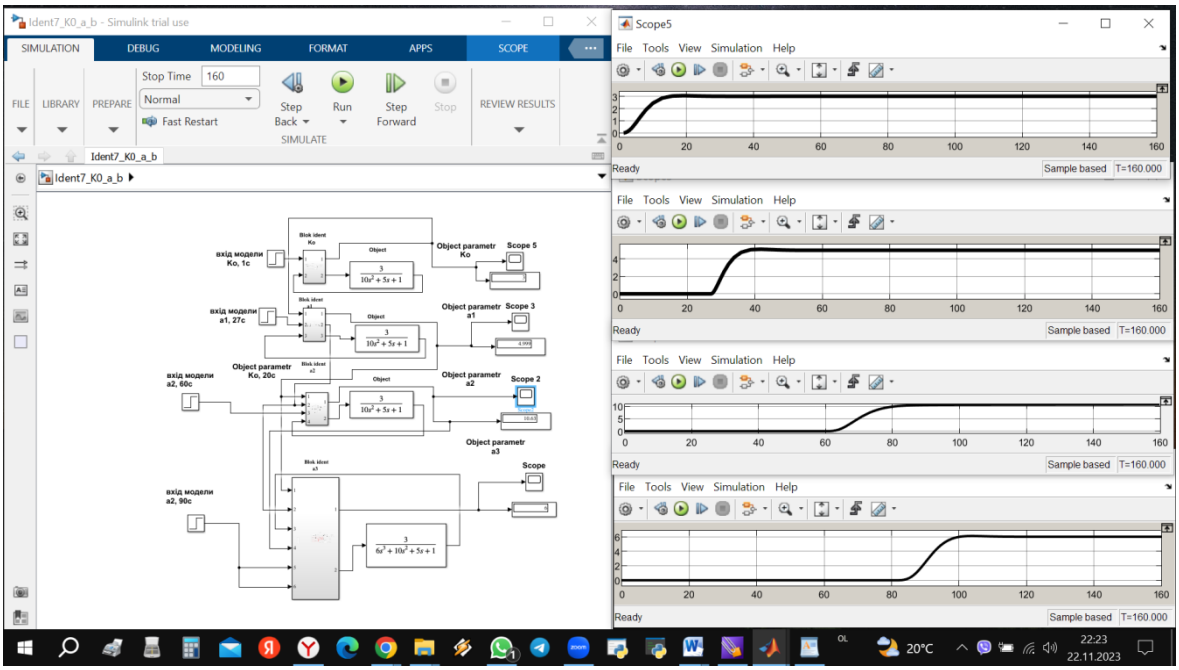


Рисунок 9 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації

Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом поділу вихідних сигналів об'єкта $W_o(s) = \frac{10}{20s^2 + 9s + 1}$ і моделі пропущених через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу) для об'єкта, що підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації надана на рис.10.

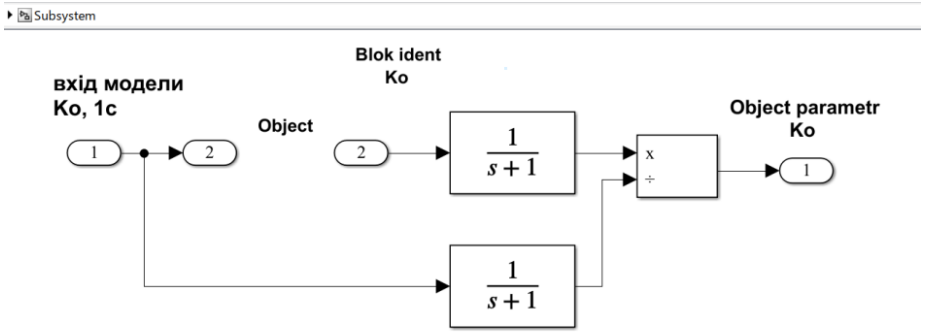


Рисунок 10 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом поділу вихідних сигналів об'єкта і моделі пропущених через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу) для об'єкта, що підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації $W_o(s) = \frac{10}{20s^2+9s+1}$ методом мінімізації помилки вихідних сигналів об'єкта і моделі надана на рис.11.

Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 для об'єкту

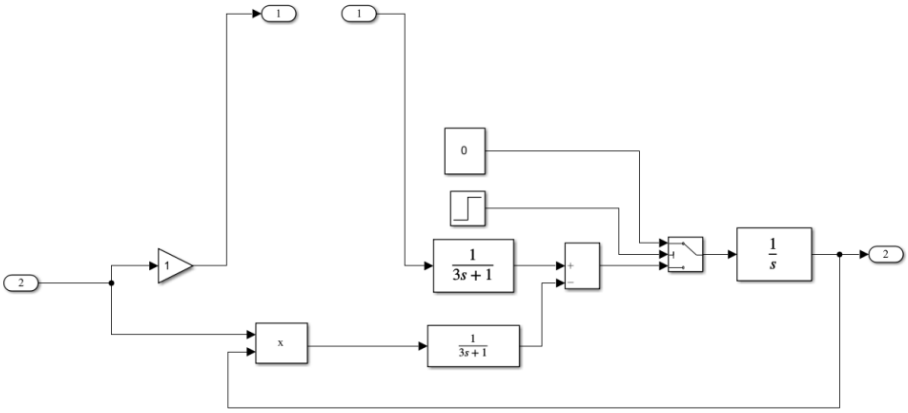


Рисунок 11 – Комп'ютерна модель системи ідентифікації статичного коефіцієнта посилення K_0 методом мінімізації помилки вихідних сигналів об'єкта і моделі

Сигнали пропущені через адаптивний і керований фільтри (або фільтри з однаковими постійними часу). Об'єкт підключається до входу 1 і виходу 1 системи ідентифікації. До входу 2 подається сигнал ідентифікації (вхід об'єкту), а на виході 2 формується значення коефіцієнта посилення K_0.

Графік установки K_0 для об'єкта $W_o(s) = \frac{10}{20s^2+9s+1}$ надано на рис.12. Комп'ютерну модель логічного пристрою підключення об'єкта до системи ідентифікації наведено на рис.13.

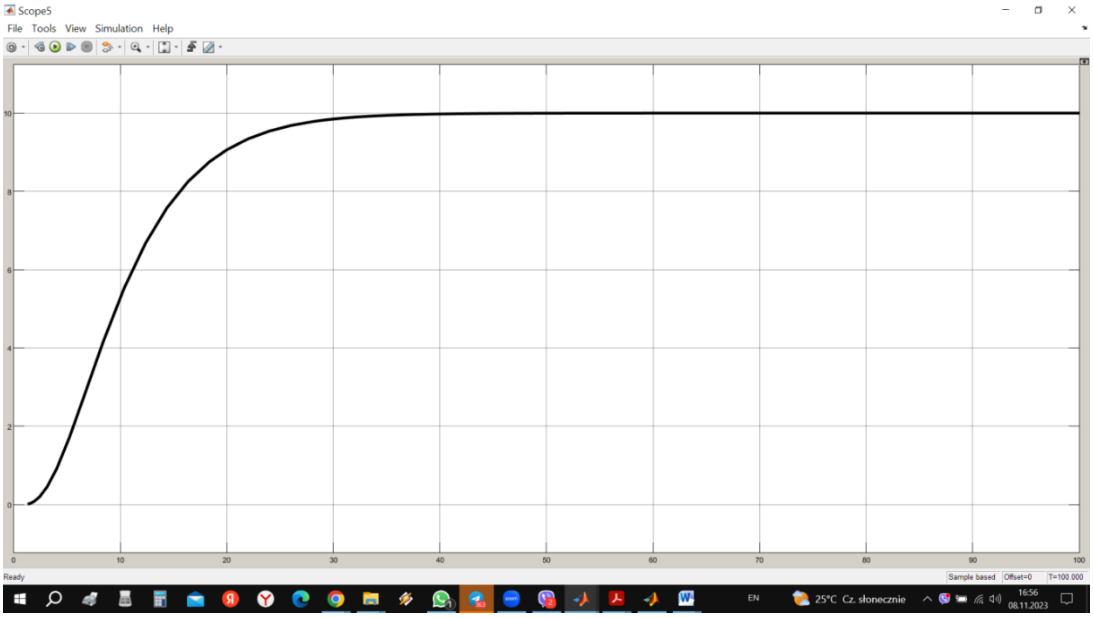


Рисунок 12– Графік установки K_0

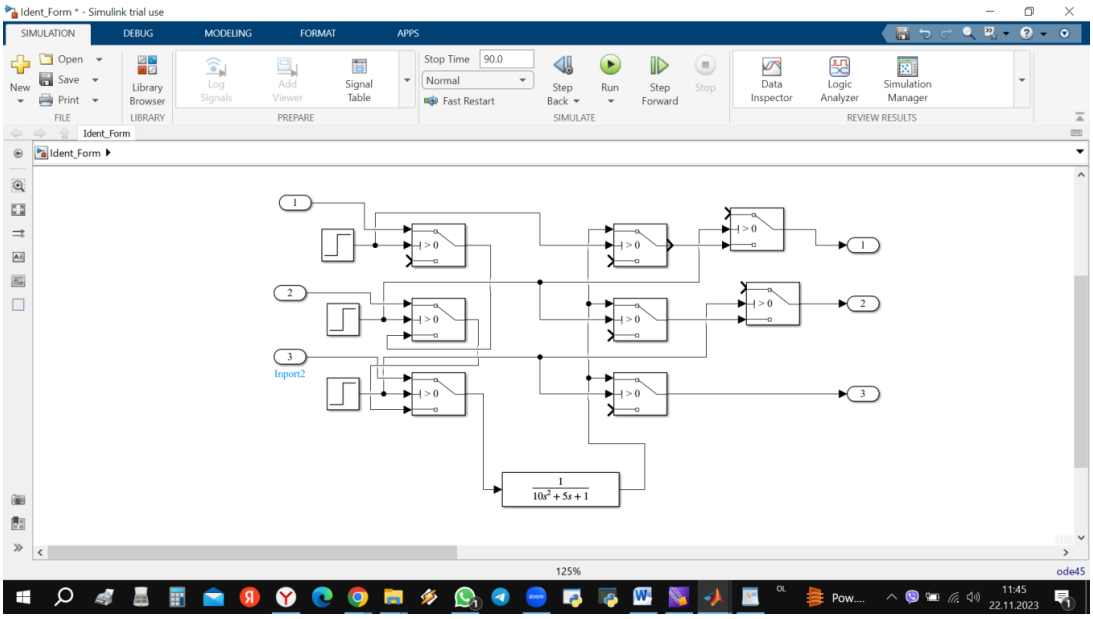


Рисунок 13 – Комп'ютерна модель логічного пристрою підключення об'єкта до системи ідентифікації

Висновки

Удосконалено моделі структурно-параметричної (за запропонованою процедурою) ідентифікації структури та усіх, на відміну від відомих моделей, параметрів складного РО і побудови адаптивних систем керування для корекції поточних параметрів налаштування регуляторів параметрами ідентифікації.

Параметричний вихід АФ можна використовувати при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра для забезпечення ідентифікації всіх статичних та динамічних параметрів об'єкта.

Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в

обмеженому діапазоні змін амплітудних і частотних характеристик корисного сигналу та перешкод в діапазоні адаптації коефіцієнта адаптації $K_b = \sqrt{\frac{R+\Delta}{Q+\Delta}}$ при заданому співвідношенні $\frac{2T_\beta}{T_k}$, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації.

Перспективою подальших розробок у цій галузі є:

реалізація програмних цифрових моделей ідентифікації для корекції параметрів налаштування цифрових регуляторів параметрами ідентифікації,

реалізація станцій керування регуляторами з можливістю без ударного програмного введення вхідних сигналів ідентифікації в об'єкт у ручному та автоматичному режимах роботи системи керування.

Література

1. Сытник Б.Т. Метод идентификации параметров инерционніх объектов /, Б.Т.Сытнік, В.А.Брыксин, В.С. Михайленко, А.А.Пархоменко// Науково-технічний журнал "Інформаціно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2013. – №5. – С.56-61.[Електронний ресурс]: – Режим доступуа: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=33934
2. Сытник Б.Т. Структурно-параметрическая идентификация в адаптивных системах управления движением поездов / Б. Т. Сытник, М. С. Курцев, В. С. Михайленко // Информационно управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2014. – № 3. – С. 17-21. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ Ikszt _2014_3_4
3. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств. Избранные труды / В.А. Лазарян. - К.: Наукова думка, 1985. - 528 с.
4. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104с.
5. Marco Dal Pino.Управление дронами с помощью приложений для распознавания речи на основе Intel Real Sense SDK [Електронний ресурс]: – Режим доступа:https://habr.com/company/intel/blog/273083
6. Собственный рой беспилотников – возможно ли? [Електронний ресурс]: – Режим доступу : http://robotrends.ru/pub/1603/sobstvennyy–roy–bespilotnikov–vozmozhno–li
7. Роботизированные комплексы и системы [Електронний ресурс]: – Режим доступа: http://ds–robotics.ru/sections/informacziya/robotizirovannyie–kompleksyi–i–sistemyi.html
8. Метод коллективного управления группой роботов [Електронний ресурс]:– Режим доступа: http://www.studmedlib.ru/ru/doc/ISBN9785922111416–SCN0004.html
9. Як дрони можуть змінити майбутнє залізничної галузі. Підвищення ефективності і зменшення операційних витрат залізниць. Безпілотники можуть швидко в цьому допомогти.Режимдоступу:[Електронний ресурс] https://cfts.org.ua/blogs/yak_droni_mozhut_zminiti_maybutne_zaliznichno_galuzi_292
10. Ситнік Б.Т. Комп'ютерні системи керування: Навч. посібник. – Ч1.– Моделювання систем. – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 182 с.
11. Ситнік Б.Т. Комп'ютерні системи керування: Навч. посібник. – Ч.2 – Цифрові ком-п'ютерні системи керування – Харків: УкрДУЗТ, 2019. – 141 с.
12. Адаптивные системы идентификации / Кику А.Г.,Костюк В.И., Краскевич В.Е., Сильвестров А.Н., Шпит С.В.-К.:Техніка,1975.-288с.
13. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М.Дейч. - М.: Энергия.1979.-240с.
14. Растригин Р.А. Введение в идентификацию объектов управления / Р.А.Растригин , Н.Е.Маджаров.- М.: Энергия, 1977.-216с.
15. Марков С.И. Идентификация параметров колебательных систем автоматического регулирования / Марков С.И., Минаев В.М., Артамонов Б.Н. – Л.: Энергия.1975.- 96с.
16. Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Авторское свидетельство СССР №1209538. Бюл. изобр. 1984.
17. *Гусев П.В., Загарий Г.И., Сытник Б.Т.* Устройство для измерения параметров инерционных звеньев. Авторское свидетельство СССР №1783478. Бюл. изобр. №47, 1992.

18. *Сытник Б.Т., Сытник В.Б.* Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Часть 1 // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – №6. – С.18 – 24.

19. *Сытник Б.Т., Сытник В.Б., Яцько С.И.* Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Часть 2. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 1. – С. 62 – 66.

20. *Гусев П.В., Загарий Г.И., Сытник Б.Т.* Адаптивный фильтр. Патент України 11427, Бюл. № 14, 1996.

21. *Сытник В.Б.* Адаптивная фильтрация и дифференцирование сигналов в системах автоматического управления [Текст]/В.Б.Сытник// Науково-технічний журнал "Інформаціно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2012. – №4. – С.42-46.

22. *Авт. свідоцтво* № 47196, реєстр. 14.01.2013, МОН України, Державний департамент інтелектуальної власності. Комп'ютерна програма "Адаптивний профіль діфференціатор-ідетифікатор" ("The adaptive profile dìfferencìator-ìdetifikator") /В.Б. Ситник; заявка від 13.11.2012 № 47499.

23. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 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., Ситник В. В., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2021. – №4. – С.24–35. - Режим доступу: https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247235

24. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Частина 2. Аналіз способів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму/Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2022. – №1. – С.3–18.- https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i1.254087

25. Ситнік Б. Т. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами прямування Частина 3. Синтез структури і моделювання адаптивних цифрових регуляторів корекції швидкості руху високошвидкісних поїздів із заданими ПІД-законами формування імпульсних управлінь/Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В.//Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: 2022. – №.3 – С.35–48.- DOI: 10.18664/ikszt.v27i3.265542. Режим доступу: http://jiks.kart.edu.ua/issue/view/15894, http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11256

26. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах.-М.: Наука, 1968.- 400с.

27. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А.Пегат.- М.: Бином, 2009. – 798 с.

28. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

29. Крутько П.Д. Вариационные методы синтеза систем с цифровыми регуляторами.- :М.:Советское радио, 1967. – 439с.

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

Ключові слова: структурно-параметрічна ідентифікація, адаптивна система керування, високошвидкісний рух, формуючий фільтр.

Качанов П. О., Ситнік Б. Т., Мірошник А. М., Удосконалення моделі та методу структурної ідентифікації параметрів інерційних об'єктів. Удосконалено модель ідентифікації структури й параметрів складного рухомого об'єкта рейкового транспорту для побудови адаптивних систем керування з корекцією параметрів налаштування регуляторів. Показано, що параметричний вихід адаптивного цифрового фільтра можна використовувати як при автоматичному коригуванні параметрів керованого фільтра так і при автоматичному коригуванні параметрів регулятора в контурі регулювання системи керування в

обмеженому діапазоні змін коефіцієнта адаптації, що розширює сферу застосування запропонованого методу ідентифікації. Значення коефіцієнтів знаменника формуючого фільтру моделі послідовно змінюються на ідентифіковані значення коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_{n-1}$ для знаходження нових значень коефіцієнтів a_n. В автоматичному режимі роботи ідентифіковані раніше значення коефіцієнтів об'єкта повинні запам'ятовуватися і вводиться у формуючий фільтр, змінюючи його структуру та порядок, для обчислення значення величини наступного коефіцієнта об'єкта. Після ідентифікації необхідних значень коефіцієнтів передавальної функції об'єкта a_1, $a_2 \ldots a_n$ процес ідентифікації повторюється послідовно у кожному циклі перехідних процесів системи керування. Підключення об'єкта до відповідних входів-виходів формуючих фільтрів пристрою ідентифікації здійснюється логічним пристроєм.

Kachanov P. O., Sytnik B., Miroshnyk A. Improved model and method of structural identification of parameters of inertial objects. Models for identification of parameters and structure of a complex dynamic moving object (MO) have been improved for the construction of adaptive control systems (ACS) for correcting the parameters of regulator settings.

It is shown that the parametric output of the adaptive digital filter can be used both for the automatic adjustment of the parameters of the controlled filter and for the automatic adjustment of the controller parameters in the regulation circuit of the control system in a limited range of changes in the adaptation coefficient, which expands the scope of the proposed identification method. The values of the coefficients of the denominator of the forming filter of the model are successively changed to the identified values of the coefficients of the transfer function of the object a_1, $a_2 \ldots a_{n-1}$ to find new values of the coefficients a_n. In the automatic mode of operation, previously identified values of the coefficients of the object must be remembered and entered into the forming filter, changing its structure and order, to calculate the value of the next coefficient of the object. After identifying the necessary values of the transfer function coefficients of the object a_1, $a_2 \ldots a_n$, the identification process is repeated sequentially in each cycle of transient processes of the control system. The connection of the object to the corresponding inputs-outputs of the forming filters of the identification device is carried out by a logical device.

Keywords: structural-parametric identification, adaptive control system, high-speed motion, shaping filter

Рецензент д.т.н., професор
(УкрДУЗТ)
Надійшло

Качанов Петро Олексійович, д.т.н., професор, професор ЗВО кафедри автоматики і управління в технічних системах Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет»,

*e-mail:*petro.kachanov@khpi.edu.ua
https://orcid.org/0000-0002-7532-5913

Ситнік Борис Тимфійович, кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: bts12021947@gmail.com *http://orcid.org/0000-0002-9664-5617*

Мірошник Анатолій Миколайович, аспірант кафедри «Автоматика та керування у технічних системах, АУТС», НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна.

e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
https://orcid.org/0000-0001-5702-9611

Kachanov Petro Oleksiiovych, 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"

*e-mail:*petro.kachanov@khpi.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, graduate student of the department "Automation and control in technical systems, ACTS", NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
https://orcid.org/0000-0001-5702-9611