

УДК 681.31

СИТНИК Б. Т., кандидат технічних наук, доцент (Український державний університет залізничного транспорту)

МІРОШНИК А. М., аспірант кафедри «Автоматика та управління у технічних системах, АУТС», НТУ «ХПІ»

## Структурно-параметрична індексна ідентифікація в адаптивних системах управління рухомими об'єктами

*Розроблено нову модель індексної ідентифікації структури та параметрів складного динамічного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів.*

**Ключові слова:** індексна ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.

### Вступ

Підвищення якості експлуатаційних характеристик систем автоматичного управління складними високошвидкісними рухомими об'єктами рейкового транспорту пов'язане з необхідністю ідентифікації та адаптації, забезпеченням безпеки та здоров'я навченого персоналу, високою швидкістю обладнання та уповільненою реакцією операторів, обумовленою обмеженими фізичними можливостями людини.

### Аналіз наявних рішень

Переважає більшість сучасних наукових досліджень і промислових реалізацій адаптивних систем управління (АСУ) присвячена створенню робастних, нейроподібних, нечітких, інтелектуальних фільтрів і регуляторів [1-3].

Адаптивні АСУ та активні експертні системи (АЕС) [2, 3] знаходять застосування як системи управління складними нестационарними та багатовимірними об'єктами, підтримують функціонування систем у стохастичному та хаотичному світах, що суттєво покращує їхні характеристики надійності та техніко-економічні показники. За наукову основу досліджень було взято роботи Бесекерського В. А., Загарія Г. І., Заде Л. А., Лазаряна В. А., Поспелова Д. А., Мамдані Е. А., Ципкіна Я. З. Роботи цих і багатьох інших

учених [1-11] створили методичні та теоретичні передумови розвитку теорії адаптивних АСУ.

### Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення нової моделі індексної ідентифікації структури та параметрів складного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування в кожному перехідному процесі роботи об'єкта.

### Постановка задачі

Завданням дослідження є забезпечення ідентифікації динамічних параметрів інерційних об'єктів  $T_0 = i * T_i$  і  $k_0 = K(j)$  шляхом введення додаткових  $m_i$ ,  $K_j$  елементів організації самоналаштування моделей і забезпечення визначення значень цих параметрів за критерієм оцінювання близькості структури і параметрів моделі та об'єкта за вибором мінімуму модулів сигналів помилок, що формуються на виходах об'єкта і відповідних виходах  $i, j$  блоків модулів у кожному перехідному процесі роботи об'єкта.

### Основний матеріал

Відповідно до робіт Лазаряна В. А. [1] потяг може бути поданий як локомотив (пристрій управління та виконавчий механізм (ВМ)) і послідовність вагонів різної довжини та маси (об'єкт управління) (рис. 1).

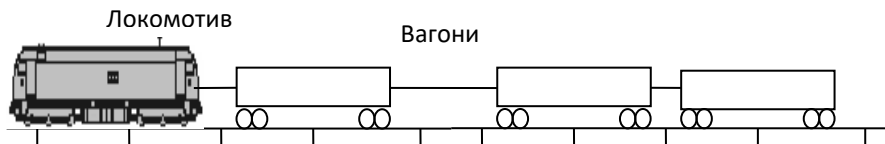


Рис. 1. Схема рухомого об'єкта як об'єкта управління

Електричною моделлю об'єкта може бути послідовність аперіодичних ланок з різними постійними часу і статичними коефіцієнтами передачі [1, 2]. Ланки з більшими постійними часу можуть замінюватися ланками з меншими постійними часу. Кількість ланок з меншою постійною часу може дорівнювати найбільшому цілому від ділення найбільшої постійної часу моделі на найменшу, відповідну моделі найлегшого вагона.

Загальним недоліком відомих систем ідентифікації з використанням моделі [2-8] є незмінність структури моделі, що налаштовується, підключеної паралельно досліджуваному об'єкту, значні витрати часу на обчислення, неодночасність обчислень усіх статичних і динамічних параметрів обраної моделі об'єкта протягом часу одного перехідного процесу.

Розглядаються моделі динамічних об'єктів, структура яких може апроксимуватися математичною моделлю, що містить блок множення *Produkt3* (рис. 2-5) з необхідним значенням коефіцієнта посилення об'єкта  $k_0$ , аперіодичною ланкою з постійною часу об'єкта  $T_0$  та  $i$  аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 \dots m_i$  з постійними часу  $T_i$ , на виході кожної з яких

встановлені блоки підсилювачів  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 \dots K_j$ . Кожен блок підсилювачів  $K_j$  (рис. 6) містить  $j$  підсилювачів  $Gain_j$  з коефіцієнтами посилення  $K_{ij}$  від 0.1 до 1. На перші входи  $In1$  кожного блока  $K_j$  подається сигнал  $Y_{mi}$  з виходів відповідних аперіодичних ланок  $m_i$ , а на другі входи  $In2$  – вихід моделі  $Y_{OB}$  об'єкта (або вихід об'єкта). На виходах усіх підсилювачів  $K_j$  формуються модулі сигналів помилки  $E(T_i, K_j)$  і мінімальний сигнал модуля помилки  $E_{min}(T_i, K_j) = \text{abs}(Y_{mi} - Y_{OB})$ .

У процесі спільної роботи об'єкта і моделі відбувається автоматичне визначення кількості аперіодичних ланок  $i$  та розрахунок статичного коефіцієнта посилення  $k_m = f(\text{індекс } K_j) * k_0$  об'єкта. Перехідну функцію моделі індексної ідентифікації наведено на рис. 7.

Критерієм оцінювання близькості структури і параметрів моделі та об'єкта є вибір мінімуму модуля сигналу помилки  $E_{min}(T_i, K_j)$ , що формується на виходах блоків підсилювачів  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 \dots K_j$ , підключених до індексного селектора мінімального сигналу *Minimum*.

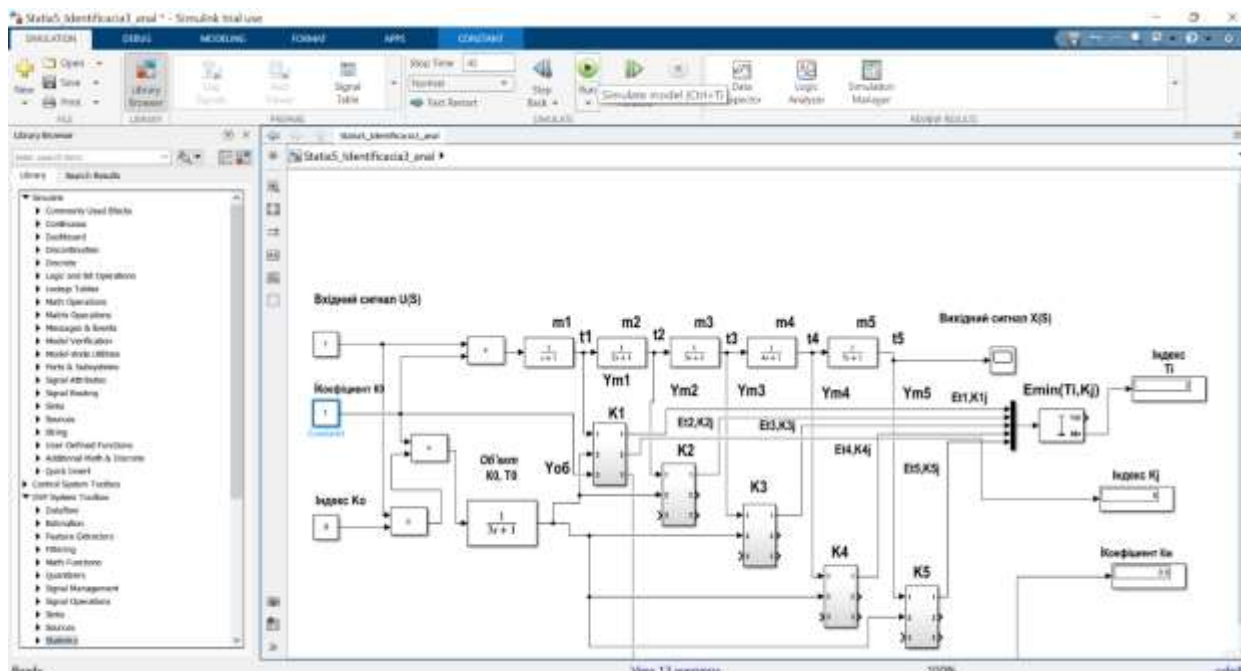


Рис. 2. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*1=0.8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=3$  с

Оскільки індекс  $i$  моделі  $i=2$ , то постійна часу моделі  $T_m=T_1+T_2=1$  с+2 с=3 с. У моделі п'ять аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3

с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=0.8$ .

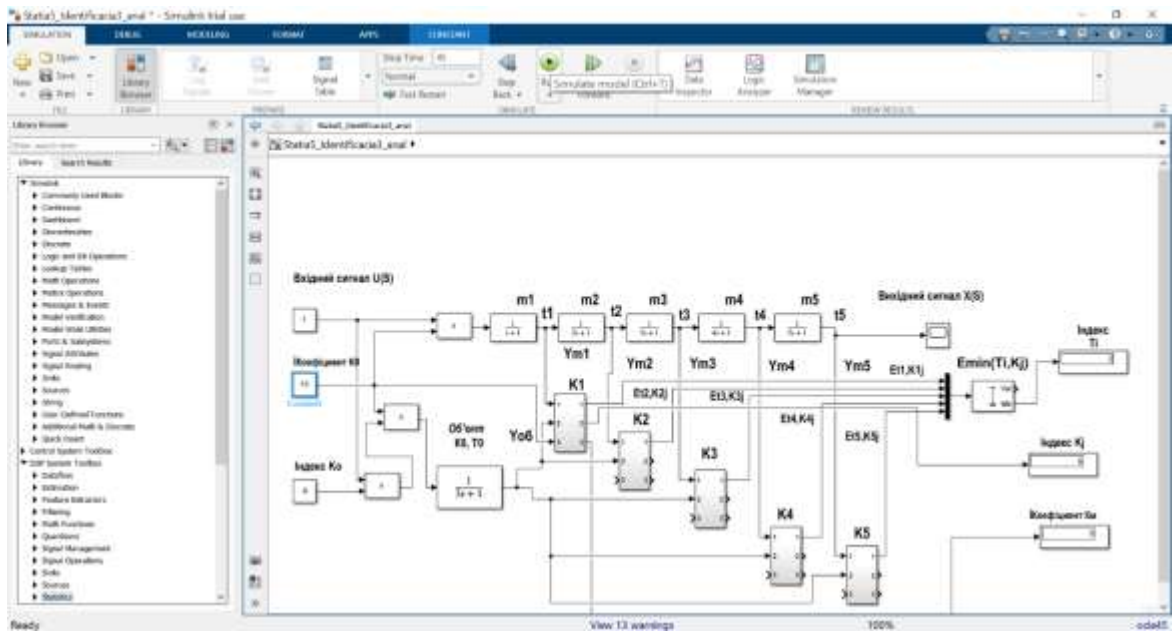


Рис. 3. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*10=8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=3$  с і п'яти аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=8$ . Постійна часу моделі  $T_M=3$  с

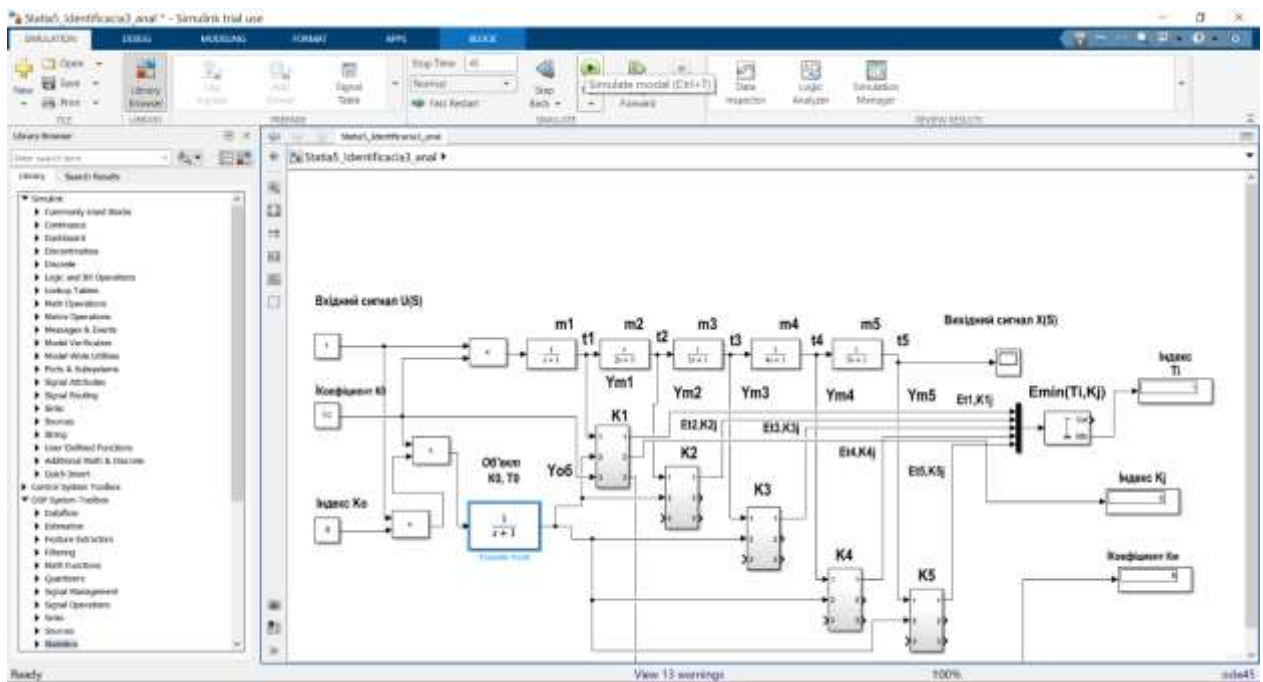


Рис. 4. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.8*10=8$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=1$  с і п'яти аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_m=8$ . Постійна часу моделі  $T_M=1$  с

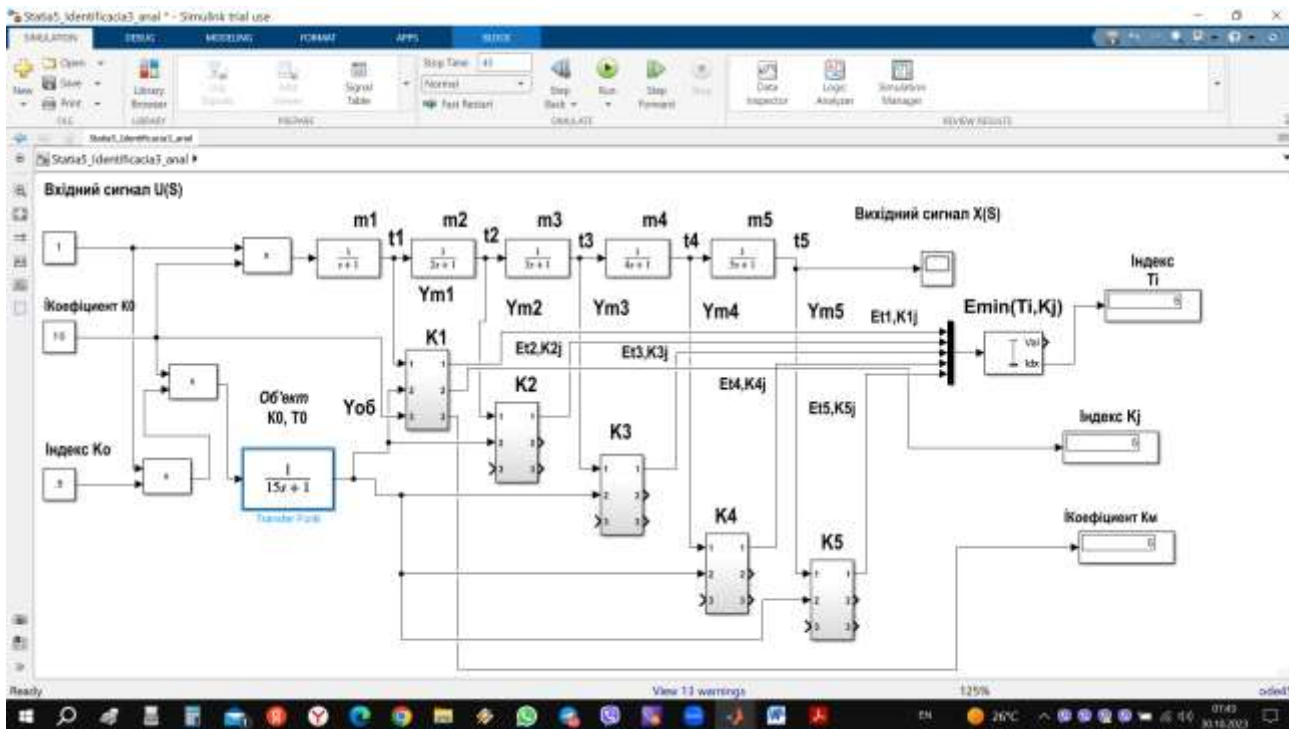


Рис. 5. Структурна схема індексної моделі Simulink об'єкта у вигляді аперіодичної ланки з необхідним значенням коефіцієнта посилення  $k_0=0.5*10=5$ , заданим значенням шуканої постійної часу  $T_0=15$  с і п'яти аперіодичних ланок  $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$  з постійними часу  $T_i=1$  с, 2 с, 3 с, 4 с, 5 с відповідно. Коефіцієнт посилення моделі  $k_M=5$ .  
Постійна часу моделі  $T_M=15$  с

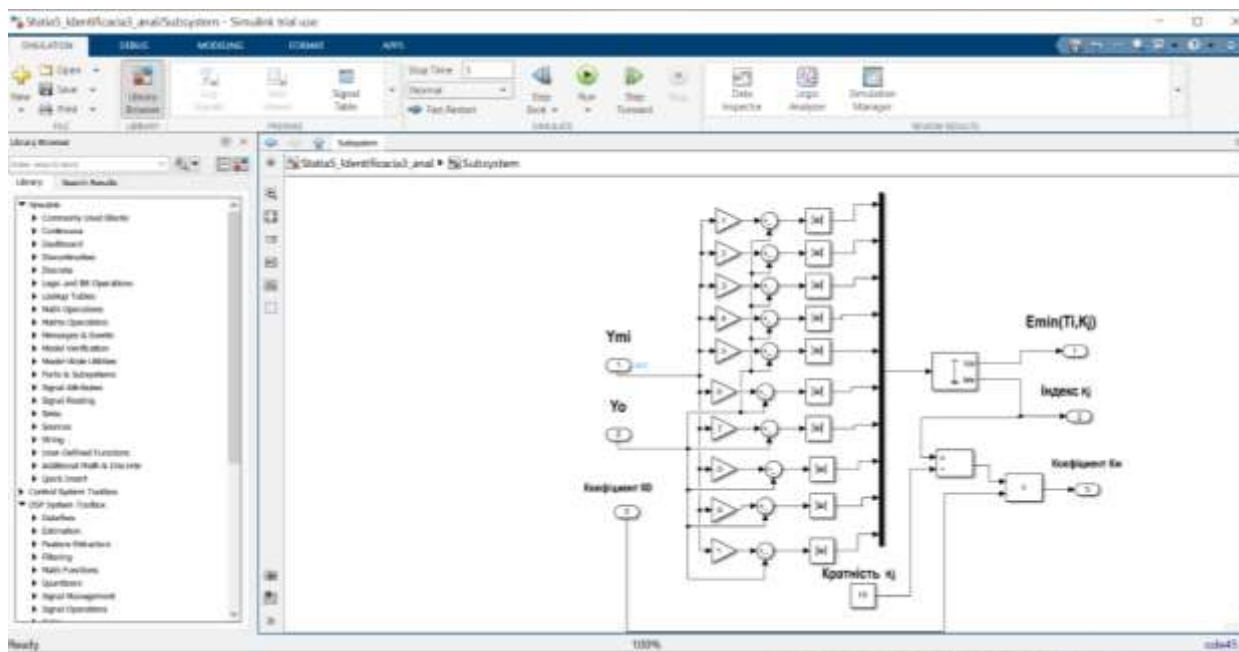


Рис. 6. Структурна схема блока обчислення індексу  $K_j$  і додаткового блока обчислення статичного коефіцієнта посилення моделі об'єкта  $k_M$

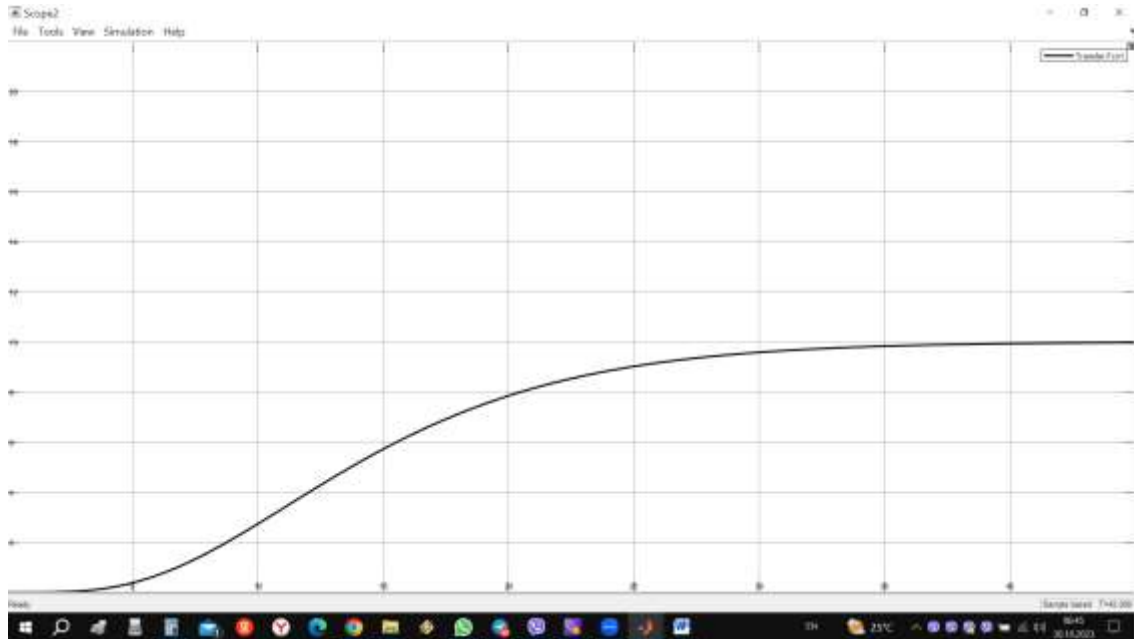


Рис. 7. Перехідна функція моделі індексної ідентифікації

Припустимо, що диференціальне рівняння моделі цього об'єкта зі статичним коефіцієнтом посилення  $k_o$ , як операторного, має вигляд

$$(s^i + a_1 s^{i-1} + \dots + a_i) \cdot x(s) = k_o U(s), \quad (1)$$

де  $U(s)$  - зображення, за Лапласом, керуючого впливу;

$x(s)$  - зображення, за Лапласом, вихідного сигналу об'єкта.

Відомо [2], що для випадку, коли рівняння (1) має речові та одну пару комплексних коренів, справедлива нерівність

$$k_o \cdot [1 + V(t)] \geq h(t) \geq k_o [1 - V(t)],$$

де

$h(t)$  - перехідна функція;

$[1 + V(t)]$  - функція, що обмежує  $h(t)$

зверху;

$[1 - V(t)]$  - функція, що обмежує  $h(t)$

знизу, причому

$$V(t) = e^{-\eta t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{\eta^i t^i}{i!},$$

де  $\eta$  - середньоарифметичний корінь рівняння (1).

Якщо рівняння (1) нормалізовано відносно  $a_i$  так, що  $a_i = 1$ , то в розімкнутій системі (без регулятора)

коефіцієнт  $\frac{a_{i-1}}{i \cdot a_i} = T$  визначає середньоарифметичну

постійну часу об'єкта, а коефіцієнт  $\frac{a_{i-1}}{a_i} = iT$  -

сумарну постійну добу, що характеризує загальну інерційність об'єкта. Значення середньоарифметичного

кореня  $\eta_{c.a.} = \frac{1}{iT}$  визначає постійну складову

швидкості перебігу перехідного процесу в розімкнутій системі, оскільки  $\eta_{c.a.}$  найближче розташований відносно уявної осі комплексної площини коренів, тобто є правою межею всіх коренів.

Припустимо, що в замкнутій системі управління модель об'єкта описується передавальною функцією

$$W_m(s) = \frac{k_o}{(T_i s + 1)^i}, \quad (2)$$

а керуючі впливи формуються у вигляді співвідношення, що відповідає ПІД-закону регулювання,

$$U(t) = k_{II} e(t) + k_{II} \int_0^t e(t) dt + k_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

де  $e = x_0 - x(t)$  - помилка регулювання,

де  $x_0$  - сигнал задавання регулятора;

$x(t)$  - вихідний сигнал об'єкта.

Дискретному аналогу формули (3) відповідає [3] формула

$$U(nT_k) = \sum_{l=0}^k k_l \cdot e^{l-1}(nT_k)$$

При  $t \in [nT_k, (n+1)T_k]$ ,  $n = \overline{0, \infty}$

керуючий вплив подається одночасно як в об'єкт, так і модель. Управлінню (3) відповідає передатна функція

$$W(s) = k_{II} + \frac{k_D s}{2} + \frac{k_{II}}{s}, \quad (4)$$

де  $k_0 = k_{II}$ ,  $k_1 = k_{II}$ ,  $k_2 = k_D$  - оптимальні за критерієм максимального ступеня стійкості налаштування цього регулятора [3],

$$k_{II} = \frac{27i}{2T_i k_0} \cdot \frac{(k-1)(k-2)^{k-2}}{(k+1)^{i-1}}, \quad (5)$$

$$k_{II} = \frac{1}{k_0} \cdot \frac{(k-2)^{i-2}}{(k+1)^{i-1}} \cdot (5k-4), \quad (6)$$

$$k_D = \frac{T_i}{2k_0} \cdot \left( \frac{k-2}{k+1} \right). \quad (7)$$

Міноранта перехідної функції  $V_3(t)$  у замкнутій системі рівнянь збігається з перехідною функцією  $h_3(t)$  у тому випадку, якщо  $k+1$  - похідна характеристичного рівняння замкнутої системи, що містить цей об'єкт, має корені  $s_1 = -\frac{l}{T_i(k+1)}$

кратності  $k+1$ , тобто виглядає як

$$Q^{k-l-1}(s) \cdot \left( s + \frac{k}{iT_i(k+1)} \right)^{k+1} = 0,$$

де  $Q^{k-l-1}(s) = 0$  - рівняння визначення інших  $k-l-1$  коренів  $l+1$  похідної характеристичного рівняння замкнутої системи, що дорівнюють  $s_2 = \frac{1}{T_0}$ .

У цьому випадку  $(k+1)$  - кратний корінь  $k+1$  похідної характеристичного рівняння  $s_1$  замкнутої системи рівняння, визначається кількістю ланок моделі  $i$ , кратністю  $k$  і постійною часу  $T_i$ . Якщо  $i > l$ , то  $s_1 < s_2$ , тобто корені  $s_1$  розташовані ближче до уявної осі.

За координатами  $i$  та  $j$  вузлової точки моделі, яким відповідає мінімальна помилка порівняння  $E_{min}(E_{ij}, K_{ij})$  (мінімум модуля помилки ідентифікації), знаходимо значення  $T_0 = i * T_i$  і величину  $k_0$ , необхідні для налаштування поточних параметрів налаштування регуляторів (5), (6), (7) у кожному перехідному процесі.

На рис. 2 наведено результати моделювання процесу ідентифікації об'єкта  $T_0$  і  $k_0$ .

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 2 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_0=3$  с і статичний коефіцієнт передавання

$k_0=0.8$ ). Індеси моделі  $i=2, j=8$  для  $T_0=3$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2=3$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання

$k_m = K(j) = K_{28} = 0.8 * 1 = 0.8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 3 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_0=3$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_0=8$ ). Індеси моделі  $i=2, j=8$  для  $T_0=3$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2=3$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{28} = 0.8 * 10 = 8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 4 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_0=1$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_0=8$ ). Індеси моделі  $i=1, j=8$  для  $T_0=1$  с відповідають  $T_m=T_1=1$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{18} = 8$  за час моделювання 45 с.

Аналіз показань цифрових вольтметрів на рис. 5 показує ідентифікацію параметрів об'єкта (постійна часу об'єкта  $T_0=15$  с і статичний коефіцієнт передавання  $k_0=8$ ). Індеси моделі  $i=5, j=8$  для  $T_0=15$  с відповідають  $T_m=T_1+T_2+T_3+T_4+T_5=1+2+3+4+5=15$  с і значенню її статичного коефіцієнта передавання  $k_m = K(ij) = K_{58} = 8$  за час моделювання 45 с.

Підвищити точність ідентифікації можна через збільшення кількості аперіодичних ланок, зменшення значень їхніх постійних часу  $T_i$ , а також збільшення кількості блоків обчислення індексу  $K_j$  і статичного коефіцієнта посилення моделі об'єкта  $K_m$ .

### Висновки

Запропоновано нову модель індексної ідентифікації структури та параметрів складного рухомого об'єкта для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування регуляторів. Кількість ланок  $i$  (структура) моделі та координата  $j$  (адреса значення її статичного коефіцієнта передавання) є змінними величинами, і їхні зміни враховуються в адаптивних системах управління шляхом корекції поточних параметрів налаштування регуляторів за формулами (5)-(7) у кожному перехідному процесі.

Перспективами подальшого розроблення в цій галузі є:

- реалізація цього методу та моделей програмним способом;
- створення програмних моделей спільного дослідження моделей індексної ідентифікації,

пристроїв розрахунку оптимальних параметрів корекції цифрових регуляторів за критеріями максимального або гарантованого ступеня стійкості, цифрових регуляторів з можливістю введення сигналів корекції, цифро-аналогових моделей об'єктів із змінними параметрами, станцій керування регуляторами з можливістю ненаголошеного введення пробних сигналів у ручному та автоматичному режимах роботи, адаптивних фільтрів, програм реалізації перешкод із заданими законами розподілу випадкових сигналів.



## Список використаних джерел

1. Лазарян В. А. Динамика транспортных средств. Избранные труды. Киев: Наукова думка, 1985. 528 с.
  2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. 3-е, доп. Москва: Наука, 1975.
  3. Загарий Г. И., Шубладзе А. М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.
  4. Адаптивные системы идентификации / А. Г. Кику, В. И. Костюк, В. Е. Краскевич и др. Киев: Техніка, 1975. 288 с.
  5. Дейч А. М. Методы идентификации динамических объектов Москва: Энергия, 1979. 240 с.
  6. Растринин Р. А., Маджаров Н. Е. Введение в идентификацию объектов управления. Москва: Энергия, 1977. 216 с.
  7. Марков С. И., Минаев В. М., Артамонов Б. Н. Идентификация параметров колебательных систем автоматического регулирования. Ленинград: Энергия, 1975. 96 с.
  8. Сытник Б. Т., Курцев М. С., Михайленко В. С. Структурно-параметрическая идентификация в адаптивных системах управления движением поездов. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*. 2014. № 3. С. 17-21. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt\\_2014\\_3\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ikszt_2014_3_4).
  9. 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. та ін. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. № 4. С. 24–35. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i4.247>
  - 235.
  10. Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 2. Аналіз способів управління швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 1. С. 3–18. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v27i1.254087>.
  11. Ситнік Б. Т., Бриксін В. О., Давидов І. В. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 3. Синтез структури і моделювання адаптивних цифрових регуляторів корекції швидкості руху високошвидкісних поїздів із заданими ПД-законами формування імпульсних управлінь. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2022. № 3. С. 35–48. DOI: 10.18664/ikszt.v27i3.265542. URL: <http://jiks.kart.edu.ua/issue/view/15894>, <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/11256>.
- Ключові слова:** індексна ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.
- Ситнік Б., Мірошник А. Структурно-параметрична ідентифікація в адаптивних системах управління рухом поїздів.** Розроблено нову модель ідентифікації структури й параметрів складного рухливого об'єкта рейкового транспорту для побудови адаптивних систем управління з корекцією поточних параметрів налаштування цифрових регуляторів.
- Ключові слова:** ідентифікація, адаптивна система управління, високошвидкісний рух поїздів, енергозбереження.
- 
- Sytnik B., Miroshnyk A. Structural and parametric identification in adaptive systems of train dispatching.** A new model of structure and parameters identification of a complex rail moving object for the construction of adaptive control systems with the correction of current settings of digital regulators has been designed.
- Keywords:** identification, adaptive control system, high-speed traffic, energy saving.
- 
- Ситнік Борис Тимофійович,** кандидат технічних наук, доцент, м. Харків, Україна. E-mail: [bts12021947@gmail.com](mailto:bts12021947@gmail.com) <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>.
- Мірошник Анатолій Миколайович,** аспірант кафедри автоматики та управління у технічних системах, НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна. E-mail: [anatolii.miroshnyk@nure.ua](mailto:anatolii.miroshnyk@nure.ua) <https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>.
- Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.** E-mail: [bts12021947@gmail.com](mailto:bts12021947@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>.
- Miroshnyk Anatolii, graduate student of the department "Automation and control in technical systems, NTU «KhPI», Kharkiv, Ukraine.** E-mail: [anatolii.miroshnyk@nure.ua](mailto:anatolii.miroshnyk@nure.ua) <https://orcid.org/0000-0001-5702-9611>