

УДК 656.25:621

*С.В. Панченко  
Н.Г. Панченко  
С.Л. Пархоменко*

**ДО ПИТАННЯ ДИНАМІЧНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ  
ТА НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ АВТОВЕДЕННЯ  
ПОЇЗДІВ**

*В статті удосконалено моделі систем та методи керування засобами рейкового транспорту, визначені основні напрямки їх удосконалення.*

*В статье усовершенствованы модели систем и методы управления средствами рельсового транспорта, определены основные направления их усовершенствования.*

*In the article have been improved models of the systems and methods of rail transport facilities management. It was determined basic approaches of their development.*

**Ключові слова:** графік руху, електровози, управління швидкістю.

**Актуальність проблеми.** Важливим напрямком забезпечення ефективної експлуатації засобів рейкового транспорту (РТ) залізниць є розроблення і впровадження перспективних автоматизованих систем керування (СК). Пошук нових ідей, які спрямовані на ефективне керування нечітких ситуацій, на врахування різних збурюючих впливів, завад і обмежень та створенні адаптивних контурів керування (КК) рейковими одиницями (РО). Удосконалення автоматизованих систем керування параметрами засобів рейкового транспорту – РО (СК РТ) повинно забезпечувати автоматизоване ведення поїздів з урахуванням реалей руху на конкретній ділянці.

**Мета статті.** Метою статті є удосконалення моделей систем та методів керування засобами рейкового транспорту, визначення основних напрямків їх удосконалення.

**Виклад основного матеріалу**

Метою адаптивного керування є відпрацювання впливу, який задає потрібне значення параметра  $x(t)$  та компенсація збурювань  $\lambda(t)$  незалежно від значень вектора  $k$ .

Проектування КК являє собою визначення алгоритму цифрового регулятора, що забезпечує бажаний перехідний процес у контурі безпосереднього цифрового керування (БЦК).

© *Панченко С.В., Панченко Н.Г., Пархоменко С.Л., 2012*

З огляду на високі техніко-економічні показники регуляторів, що формують П-, ПІ-, ПІД- закони регулювання вони знайшли широке застосування.

При синтезі структури адаптивних регуляторів необхідно встановити залежність параметрів настроювання регуляторів від характеристик завод та об'єкта керування – РО (для рухомих об'єктів залізничного транспорту їхні параметри та характеристики задаються при формуванні поїздів), що дає можливість застосувати адаптацію при обраному критерії оптимізації.

Для названих законів керування характеристичні рівняння замкнутих КК мають такий вигляд:

I-закон:

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 k_I = 0, \quad (1)$$

ПІ-закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{PI} \lambda + k_I] = 0, \quad (2)$$

ПІД-закон:

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{PID} \lambda + k_{PI}] = 0, \quad (3)$$

ПІДІ-закон:

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{PID} \lambda^2 + k_{PI} \lambda + k_I] = 0, \quad (4)$$

ПІДІІ-закон:

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{PID} \lambda^2 + k_{PI} \lambda + k_I] = 0, \quad (5)$$

ПІДІІІ-закон:

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{PID} \lambda^3 + k_{PI} \lambda^2 + k_{PI} \lambda + k_I] = 0. \quad (6)$$

У рівняння (1) – (6) входить  $T_{onm}$  адаптивного фільтра.

Співвідношення для максимального ступеня стійкості, наведені в [1], можна перетворити до вигляду, зручного для програмної реалізації:

$$u[nT] = u[(n-1)T] + A_0 e[nT] + A_1 e[(n-1)T] + A_2 e[(n-2)T], \quad (7)$$

де

$$A_0 = k_{II} \left[ 1 + \frac{T}{T_{II}} + \frac{T_D}{T} \right],$$

$$A_I = -k_{II} \left[ 1 + \frac{2T_D}{T} \right],$$

$$A_2 = \frac{k_{II} T_D}{T}.$$

Для цифрового ПІ-закону керування коефіцієнти приймають такі значення

$$A_0 = k_{II} \left[ 1 + \frac{T}{T_{II}} \right],$$

$$A_I = -k_{II},$$

$$A_2 = 0.$$

При цифровій реалізації адаптивних регуляторів виникає завдання визначення максимально припустимого періоду квантування  $T$ , при якому забезпечується задана точність наближення цифрового закону керування до свого безперервного аналога. Вибір  $T$  виконаємо з використанням максимального ступеня стійкості  $J_{opt}$  [2].

У випадку ПІД-закону регулювання маємо:

$$T \leq \frac{4.46e}{J_{opt}}, \quad (8)$$

а для ПІ-закону регулювання:

$$T \leq \frac{3.69e}{J_{opt}}. \quad (9)$$

Залежності максимально припустимого періоду квантування від параметрів об'єкта керування, адаптивного фільтра  $T_{opt}$  і еквівалентного запізнювання  $\tau(x)$  мають вигляд

для ПІД-закону керування:

$$T \leq \frac{4.46e}{\frac{3}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} - \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{opt}^2}} \quad (10)$$

і для ПІ-закону керування:

$$T \leq \frac{3.69e}{\frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^3} + \frac{1}{2T_{\text{онт}}} - \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^3} + \frac{1}{4T_{\text{онт}}^2}} \quad (11)$$

На рис. 1 показано запропоновану узагальнену структуру моделі контуру керування швидкістю РО. Сукупність вхідних сигналів, які використовуються при моделюванні, формується базою даних та сигналів 1. Ці сигнали обробляються адаптивним фільтром 2 [3] стала часу якого визначається блоком настроювання фільтра 7. Сигнал з виходу фільтра 2 подається на адаптивний регулятор 3 [4] з блоком настроювання регулятора 8. Останній використовує сигнали з бази даних та сигналів 1, а також з моделі РО, яка містить еквівалентне запізнювання 5 та інерційну ланку 6. В моделі також передбачено формування різних збурень. Зворотний зв'язок організовано за сигналом швидкості, який знімається з точки поточної координати  $x$ . База даних та сигналів містить такі сигнали.

**Корисний сигнал:**

- східчастий сигнал завдання швидкості  $l(t)$ , період 5; 10 у.о.;
- синусоїдальний сигнал завдання швидкості.

**Завади:**

- синусоїдальний сигнал  $A \sin \omega t$ ,  $\omega=10-1000$  рад/у.о.;
- випадковий сигнал: потужність 0.001, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел (seed) 23341.

**Збурення:**

- випрямлений синусоїдальний сигнал; період 5 у.о.;
- випадковий сигнал: амплітуда 0.02, період формування 0.1 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел (seed) 23341.

**Параметри настроювання контуру керування**

запізнювання  $\tau$ ,  $\tau=0,01 - 0,25$  у.о.;

- коефіцієнти підсилення 0 – 100;
- діапазон зміни  $k_{II}$  0,01 – 20;
- діапазон зміни  $k_{II}$  0,01 – 20;
- сталі часу 0,01-1 у.о.;
- частота сполучення фільтра  $\omega_{\text{сopf}}= 1-50$  рад/у.о..

Нижче наведено результати моделювання адаптивного Simulink – моделі контуру керування швидкістю РО. Сукупність вхідних сигналів, які використовуються при моделюванні, формується базою даних.

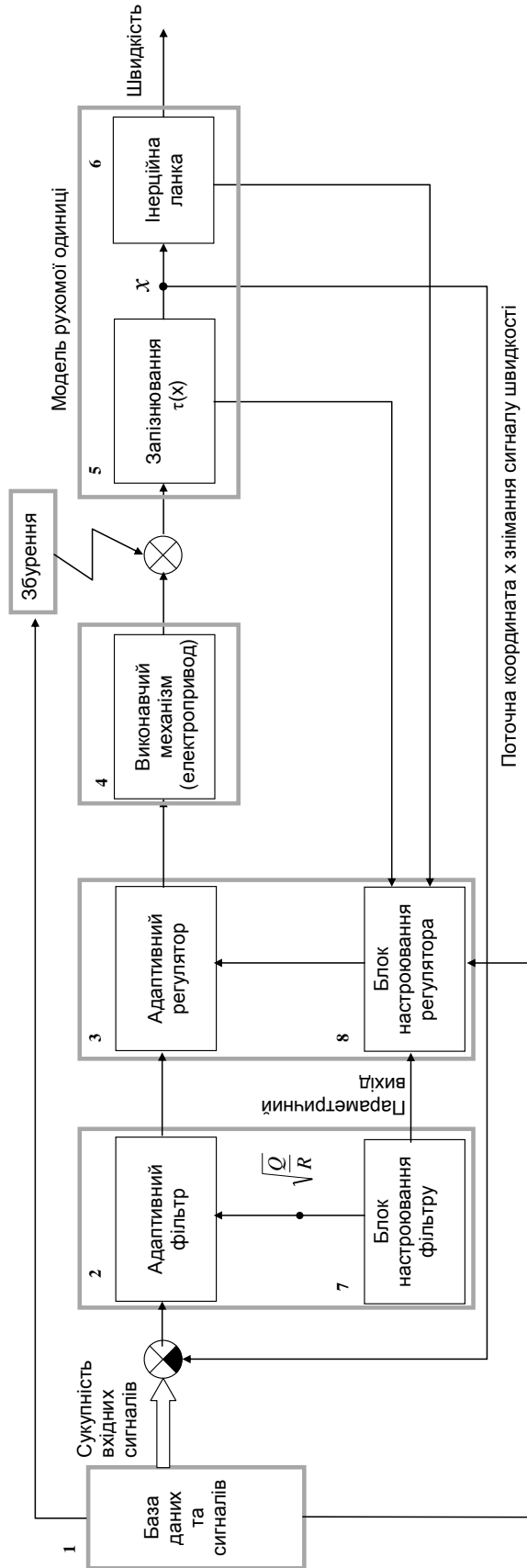


Рис. 1. Структура КК РО із еквівалентним запізнюванням і ПІ-регулятором

Обчислення сталої часу фільтра  $T_\phi$  здійснюється за формулами

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi s + 1}, \text{ де}$$

$$T_\phi = T_{opt} = T \beta \sqrt{\frac{Q}{R + \Delta}}$$

( $\Delta$  – мала константа, що виключає ділення на нуль).

Обчислення критерію КМСС та параметрів настроювання регулятора виконуються відповідними блоками моделі.

При дослідженні динамічних властивостей КК використано ПІ-регулятор, у припущенні, що параметри об'єкта керування, фільтра й оцінки характеристик випадкових корисних сигналів і завад у процесі експлуатації міняються в широких границях.

Нижче отримані аналітичні залежності між параметрами об'єкта, адаптивного фільтра й параметрами настроювання ПІ-регулятора, які використовуються у моделі.

Досліджується замкнутий КК для випадку, коли модель НБЧ контуру керування з урахуванням екстраполятора, описується інтегруючою ланкою з еквівалентним запізнюванням. Для даного випадку передатна функція замкнутого КК має вигляд:

$$W_3(s) = \frac{k_0 k_{II} s + k_0 k_{II}}{s e^{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} (T_{opt} s + 1) + k_0 k_{II} s + k_0 k_{II}} \quad (12)$$

КМСС дорівнює:

$$J_{ПИ} = \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{2T_{opt}} - \left[ \frac{1}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{opt}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

оптимальні параметри настроювання ПІ- регулятора

$$k_{Пopt} = \frac{1}{k_0} \left[ \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{opt} J_{ПИ} - \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{opt} J_{ПИ}^2 - 1 \right] e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{ПИ}}$$

$$k_{IIopt} = \frac{1}{k_0} \left[ \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + T_{opt} - \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{opt} J_{ПИ} J_{ПИ}^2 e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{ПИ}} \right],$$

а еквівалентна оптимальна передатна функція замкнутого КК дорівнює

$$W_{\Sigma}(q) = \frac{k_{\text{Понм}}s + k_{\text{Ионм}}}{(s + J_{\text{онм}})^2}$$

Аналіз цієї передатної функції показує, що адаптація КК у перехідних процесах при будь-яких змінах параметрах РО і завад забезпечує перехідний процес, близький до аперіодичного.

Дослідження КК виконано при різних сигналах на його вході, які являють собою адитивну сукупність корисного сигналу  $s(t)$  та завади  $\zeta(t)$ :

$$u(t) = s(t) + \zeta(t).$$

Як корисний сигнал обрано прямокутний сигнал з одиничною амплітудою і періодом 10 умовних (машинних) одиниць, який широко використовується у аналогічних дослідженнях [2, 5].

Сигнал завади обрано (не обмежуючи загальності) у вигляді синусоїди з більш високою частотою в порівнянні з корисним сигналом та у вигляді випадкових збурюючих сигналів. Відповідні графіки сигналів показані на рис. 2 – 5.

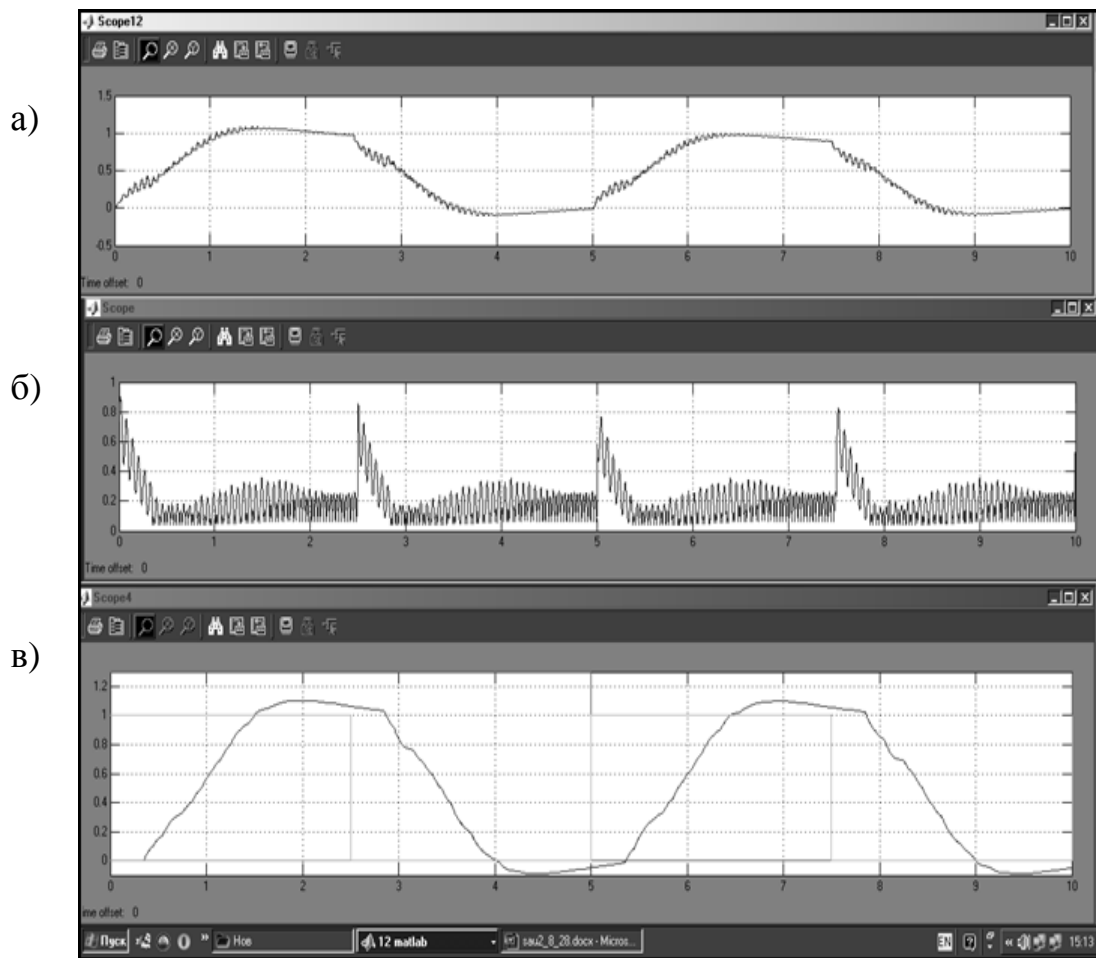
Аналіз отриманих графіків перехідних процесів свідчить про таке.

При наявності завад КК з адаптацією дозволяють отримати більш якісні процеси керування у порівнянні з КК без адаптації (рис. 2 – 5). Видно, що за рахунок *динамічної адаптації* значно покращується якість процесів керування – відхилення регульованої величини у контурах з адаптацією менше на порядок.

При змінюванні параметрів об'єкта, завад та збурень у широких границях адаптивний контур керування реалізує однакові аперіодичні процеси зміни швидкості. На рис. 6, рис. 7 показаний характер процесів зміни швидкості при різних параметричних збуреннях, як видно, характер процесів аперіодичний.

На рис. 2 – 5 (позиції а та б) показано зміну параметрів настроювання адаптивного регулятора у режимі *динамічної адаптації*, за рахунок якої забезпечується висока якість процесів керування.

Отримані результати моделювання дають можливість сформувати необхідні дані для використання в контурах керування мікропроцесорних контролерів, які побудовані на різних принципах функціонування [6].



**Рис. 2. Сигнали у КК з адаптацією:** а) сигнал керування приводом;  
 б) оптимальна стала часу адаптивного фільтру; в) вихідний сигнал;  
 базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал  $1(t)$ ; період 5 у.о.;  $\zeta(t)$  - параметри завади  $0,3\sin 100t$ ; початкова частота сполучення адаптивного фільтра  $\omega_{comp}=1,5$  рад/ у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau = 0,25$  у.о.;  $Tau = 0,25$  у.о.; коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0 = 1$



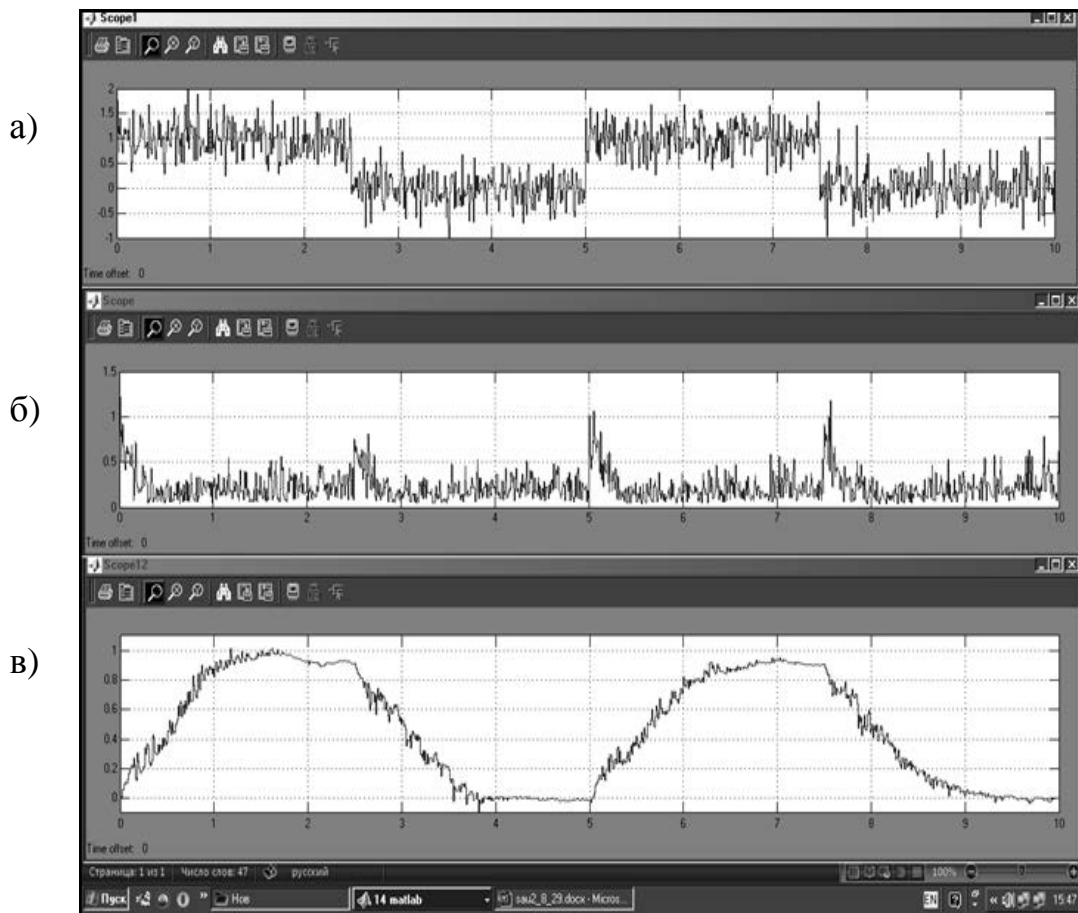


Рис. 3. Сигнали у КК з адаптацією: а) адитивна суміш вхідного сигналу та випадкової завади; б) оптимальна стала часу адаптивного фільтру; в) сигнал керування електроприводом; базові параметри настроювання моделі: вхідний сінусоїдальний сигнал  $1(t)$ ; період 5 у.о.; завада  $\zeta(t)$  з параметрами: потужність 0,001, період 0,01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтру  $\omega_{comp}=1,5$  рад/ у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau = 0,25$  у.о.;  $Tau = 0,25$  у.о.; коефіцієнт передачі об'єкта  $K=1$

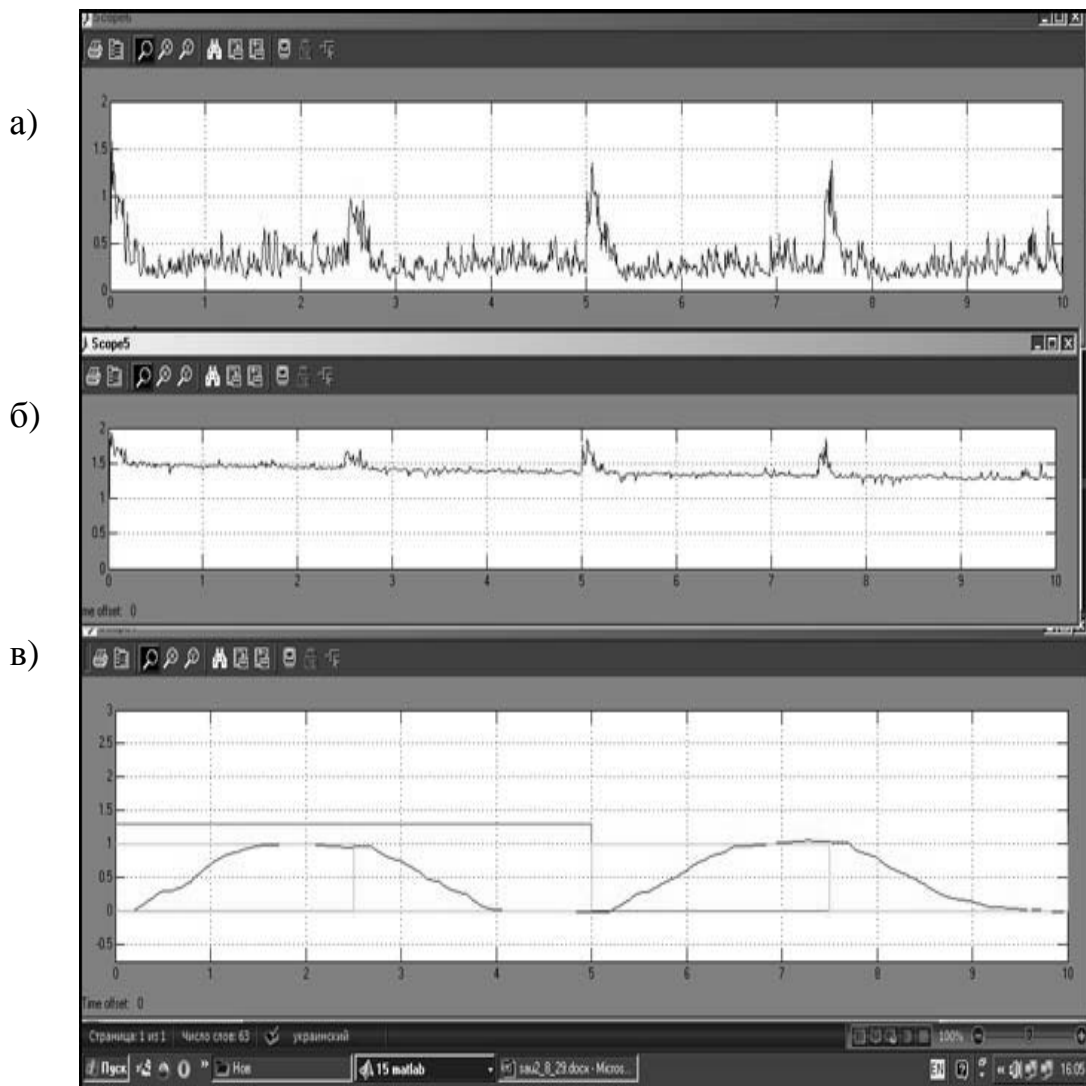


Рис. 4. Сигнали у КК з адаптацією: а)  $k_{II}$ ; б)  $k_{II}$ ; в) вихідний сигнал швидкості; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал  $1(t)$ ; період 5 у.о.; завада  $\zeta(t)$  з параметрами: потужність 0,001, період 0,01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтра  $\omega_{comp}=1,5$  рад/у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau=0,25$  у.о.;  $Tau=0,25$  у.о.; коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0=1$

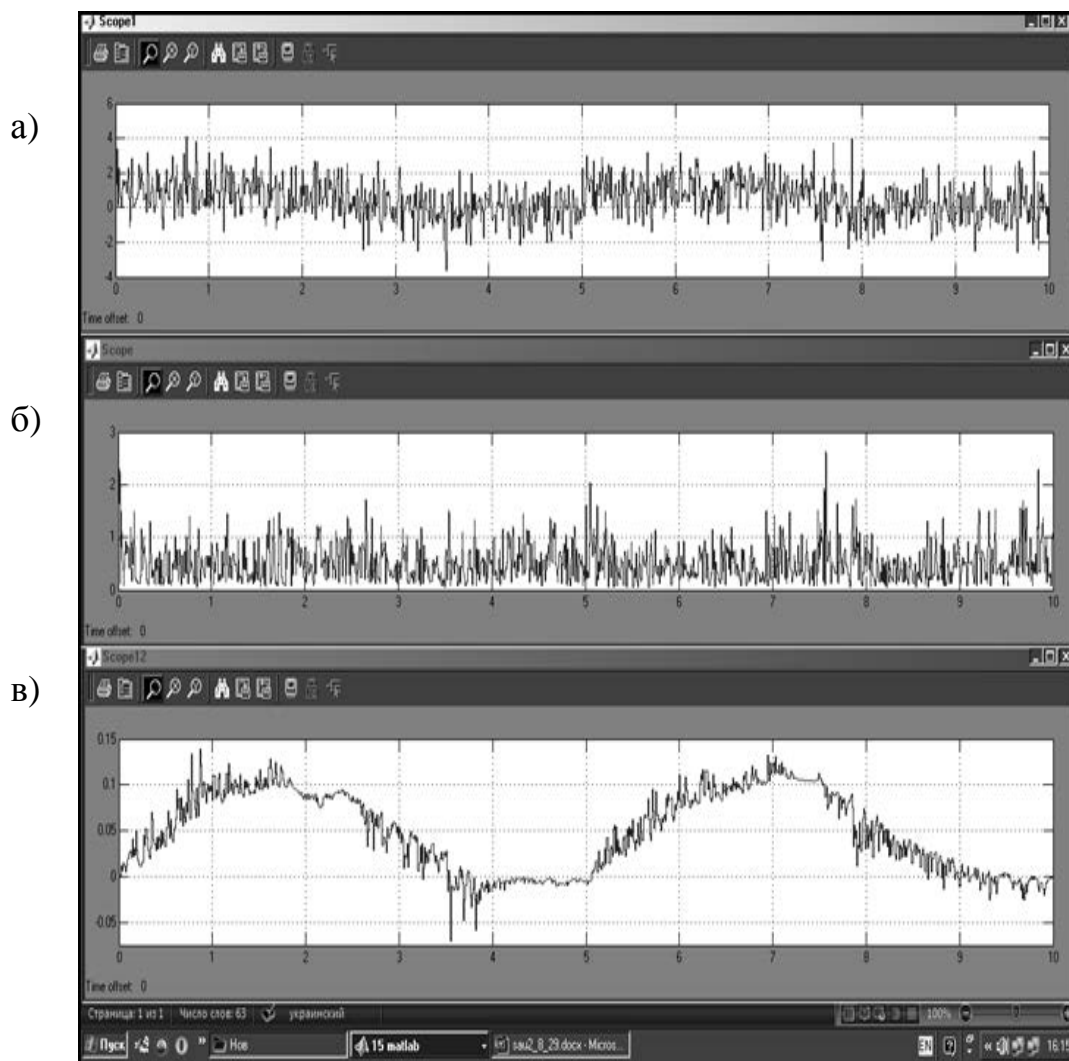


Рис. 5. Сигнали у КК з адаптацією: а) адитивна суміш вхідного сигналу та випадкової завади; б) оптимальна стала часу адаптивного фільтра; в) сигнал керування електроприводом; базові параметри настроювання моделі: вхідний сінусоїдальний сигнал  $1(t)$ ; період 5 у.о.; завада  $\zeta(t)$  з параметрами: потужність 0,01, період 0,01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтра  $\omega_{сфр}=1,5$  рад/ у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau = 0,25$  у.о.;  $\text{Tau} = 0,25$  у.о.; коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0=10$

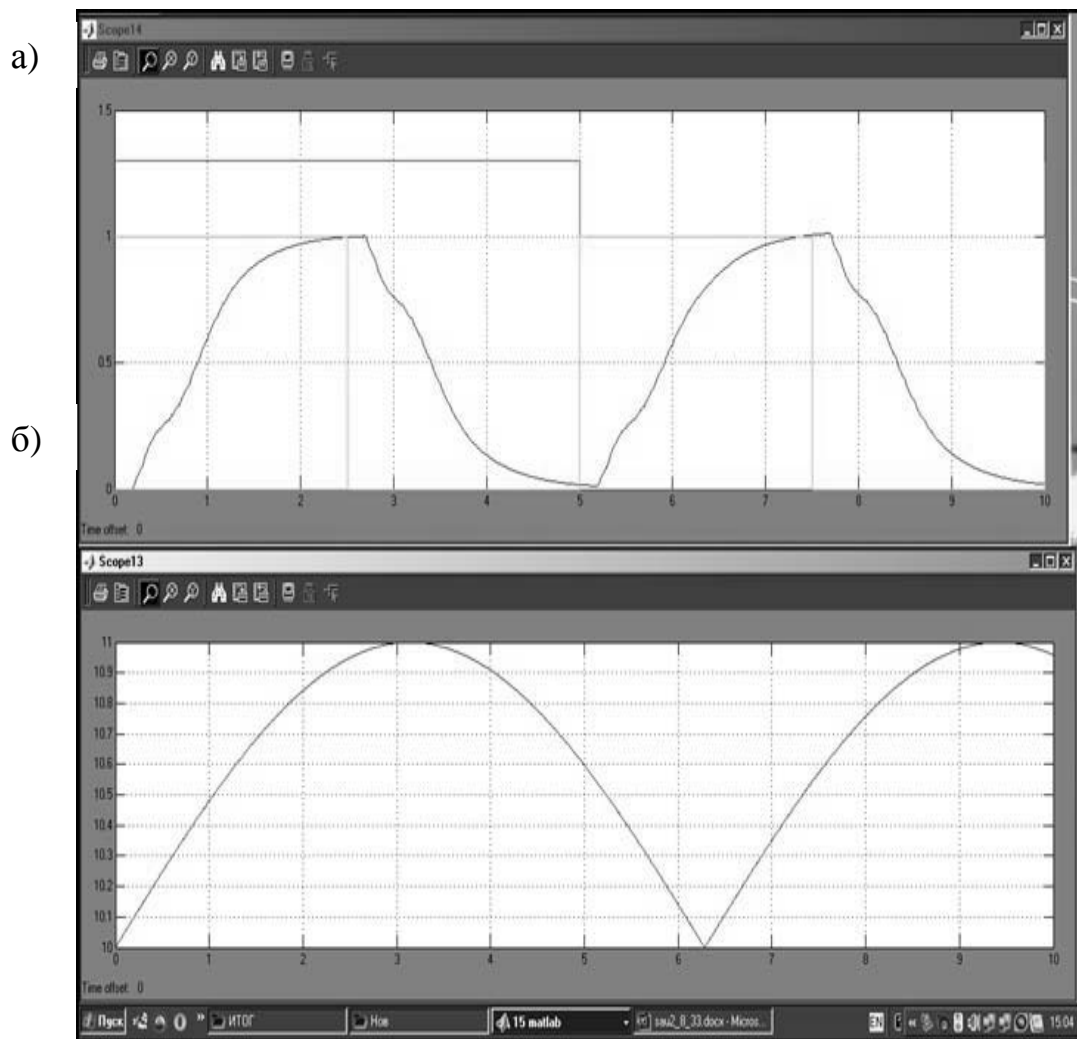


Рис. 6. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний та вихідний сигнали;  
 б) сигнал збурення  $1\sin 0.5t$ ; базові параметри настроювання моделі: вхідний  
 східчастий сигнал  $1(t)$ , період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного  
 фільтра  $\omega_{comp}=1,5$  рад/ у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau=0,25$  у.о.;  $Tau = 0,25$  у.о.;  
 коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0=10$ ;

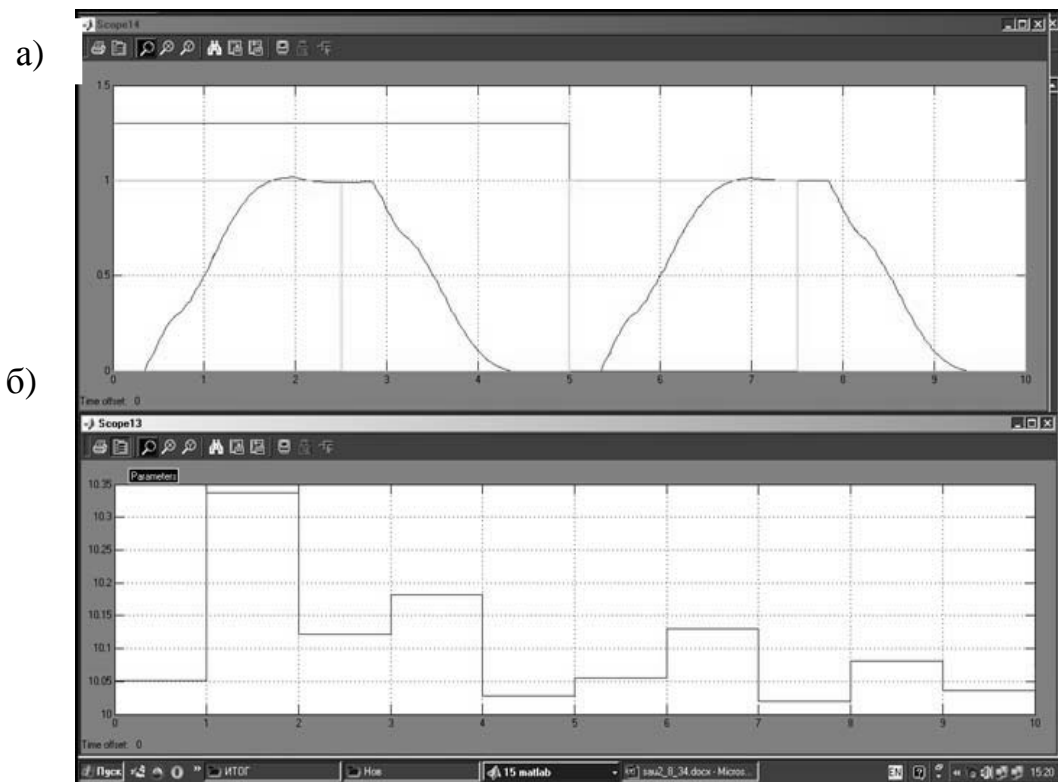


Рис. 7. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний та вихідний сигнали;  
 б) сигнал збурення випадковий: амплітуда 0,02, період формування 0,1, seed 23341; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал  $1(t)$ ; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтра  $\omega_{comp}=1,5$  рад/ у.о.; запізнювання об'єкта  $\tau$  0,25 у.о.;  $Tau = 0.25$  у.о.; коефіцієнт передачі об'єкта  $K_0=10$

### Висновки

1. На основі синтезу закону безпосереднього цифрового керування для КК з бажаними характеристиками показано, що для моделі РО у вигляді двох аперіодичних ланок із запізнюванням оптимальним є ПД-регулятор. Одержано співвідношення для параметрів  $k_P$ ,  $k_I$ ,  $k_D$  настроювання ПД-регулятора залежно від оптимальної сталої часу адаптивного фільтра  $T_{opt}$  та еквівалентного запізнювання РО

$$\tau(x) = \left( \frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2. Розроблено процедуру розрахунку параметрів адаптивних регуляторів за критерієм максимального ступеня стійкості. Отримані вираження для критерію максимального ступеня стійкості та параметрів настроювання регуляторів залежно від відношень рівнів завади до корисного сигналу та еквівалентного запізнювання, яке є функцією координати  $x$  вздовж РО. Обґрунтовано вибір періоду квантування

цифрового закону керування залежно від критерію максимального ступеня стійкості.

3. Розроблено структуру адаптивного контуру керування РО із еквівалентним запізнюванням, ПІ - регулятором та його універсальну MatLab - модель. До складу моделі входять: адаптивний фільтр, стала часу якого визначається блоком настроювання фільтра; адаптивний регулятор з блоком настроювання регулятора. Останній використовує сигнали з бази даних та сигналів, а також з моделі РО, яка містить блок еквівалентного запізнювання та інерційну ланку. В моделі також передбачено формування різних збурень. Зворотний зв'язок організовано за сигналом швидкості, який знімається з точки поточної координати  $x$  поїзда. База даних та сигналів містить детерміновані та випадкові сигнали та збурення. Така модель реалізує режим динамічної адаптації та дає можливість досліджувати різні режими функціонування контурів керування швидкістю РО.

4. Дослідження поведінки адаптивних контурів керування довело їх високі динамічні властивості, при цьому забезпечується реалізація аперіодичних процесів зміни швидкості, що є важливим при керуванні різними рейковими засобами залізниць. На основі виконаних досліджень можуть бути сформовані необхідні дані для використання в контурах керування швидкістю РО залізничного транспорту мікропроцесорних контролерів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Панченко С. В. Моделирование адаптивных дискретных систем. Оптимизация параметров управляющих импульсных последовательностей нечетких регуляторов / С.В. Панченко, Б.Т. Ситник, С. И. Яцко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №4. – С. 69-73.
2. Загарий Г.И. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости / Г.И. Загарий, А.М. Шубладзе. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.
3. Загарий Г.И. Адаптивная фильтрация сигналов в системах измерения и управления / Г.И. Загарий, С.В. Панченко, Б.Т.Сытник, В.А.Брыксин / Вісник Донецького національного університету, сер.А: Природничі науки. –2009. - Вип.1. – С. 496 - 499.
4. Загарий Г.И. Синтез адаптивных дискретных регуляторов для подвижных объектов с распределенными параметрами и запаздыванием/ Г.И.Загарий, С.В.Панченко, Б.Т.Сытник, В.А. Брыксин. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №5. – С. 44-55.
5. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А.Пегат.- М.: Бином, 2009. – 798 с.
6. Панченко С.В. Контроллеры и процессоры с параллельной архитектурой: Учебник для ВУЗов. / И. А. Фурман, В. А. Краснобаев, М. Л. Малиновский, С. В. Панченко /Под ред.Г.И. Загария.- Харьков.: УкрГАЗТ, 2006. – 416 с.