

УДК 681.5

## НАСТРОЮВАННЯ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА ПІД ЧАС КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Д. П. Кучеров, д-р техн. наук, старш. науков. співроб.

Національний авіаційний університет

d\_kuchеров@ukr.net

*Розглянуто настроювання нейроконтролера, який використовується під час керування динамічними об'єктами з невідомими параметрами. Настроювання нейроконтролера здійснюється шляхом зміни вагових коефіцієнтів за результатами чергового випробування, під яким розуміють крок самонавчання. Інформація про помилкові ситуації керування вводиться в алгоритм самонавчання на етапі введення вхідних даних. Пропонований алгоритм навчання забезпечує квазіоптимальність за часом і точністю керування в системі керування динамічним об'єктом. Подано варіант технічної реалізації системи керування з нейроконтролером, а також наведено результати її чисельного моделювання.*

**Ключові слова:** динамічний об'єкт, нейроконтролер, алгоритм настроювання, помилкова ситуація, квазіоптимальність за часом.

*The paper considers the problem of setting neurocontroller taking part in the control of a dynamic object with unknown parameters. Setting neurocontroller carried out by his learning as a result of the next test. Feature of the algorithm is to fix the faulty control situations that are introduced in the learning algorithm, giving it the properties of the self-learning. The proposed algorithm provides a quasi-optimal on time and accuracy of control in the control of a dynamic object. A version of the technical implementation of the control system neurocontroller is proposed, as well as the results of its modeling.*

**Keywords:** dynamic plant, neurocontroller, algorithm control, error situation, quasioptimal to time.

### Постановка проблеми

Нині в машинобудуванні широко використовується побудова систем керування динамічними об'єктами з нейромережевим регулятором у контурі керування. Основною перевагою таких систем є забезпечення заданої якості керування, коли відбуваються зміни умов функціонування системи або ж зміни параметрів об'єкта, що викликані зміною навантаження на виконавчі механізми системи. Такі умови функціонування виникають у пристроях керування літальних апаратів, робототехнічних пристроях, системах керування ядерними реакторами тощо.

Система керування з нейромережевим регулятором являє собою деяку інформаційно-керувальну систему, яка включає обчислювальні пристрої, регулятори, виконавчі пристрої й інші елементи, що можуть використовуватися для автоматичного керування деяким динамічним об'єктом, математична модель якого може бути представлена системою диференціальних рівнянь.

Найпоширеніші вимоги, що ставляться до системи керування, — це точність і час відпрацювання завдань об'єктом керування. Значення цих показників суттєво залежать від корисного

навантаження, виконавчого елемента й застосованих методів керування, а також від умов функціонування.

Розрізняють методи керування з повною інформацією про параметри виконавчого елемента й навантаження та адаптивні підходи, які дають змогу системі функціонувати в умовах зміни її параметрів в широкому діапазоні або ж у цілому допускають відсутність апріорної інформації про ці параметри, що доволі найпоширено. Різка зміна параметрів і збурювань дестабілізує систему керування, яка задовільно працює в середніх розрахункових умовах, ціль керування при цьому може не досягатися. Саме в таких випадках доцільне використання адаптивних підходів.

До адаптивних належить і підхід, заснований на побудові нейромережевого регулятора, що забезпечує корекцію параметрів регулятора з метою оптимізації його роботи в умовах функціонування. Перевагами регулятора даного типу є відсутність еталонної моделі, можливість функціонування зі збурювальними впливами різної природи та простота технічної реалізації. У зв'язку з цим актуальним є завдання синтезу нейромережевого керування динамічним об'єк-

том в умовах варіювання параметрів виконавчого елемента, навантаження й збурювальних впливів.

### Аналіз останніх публікацій

Відомі підходи реалізації адаптивних систем ґрунтуються на методах побудови самонастроювальних систем, таких як методи побудови екстремальних і нейромережових систем. Доцільність використання того або того способу побудови системи визначається особливостями об'єкта керування й умовами його функціонування. Так, у разі наявності екстремальної залежності параметрів об'єкта від сигналу керування й за умови безперервної зміни параметрів устаткування існує можливість використання екстремальних способів керування. У тих же системах, де екстремальність характеристик не виявляється, доцільно використовувати методи, які базуються на регулюванні за нейромережовими принципами.

Більшість розробок, пов'язаних з побудовою нейроконтролерів у контурі керування [1–4], спираються на результати праці [5], у якій наведено результати роботи системи “Adaline” при керуванні динамічними об'єктами. Система Adaline (Adaptive linear neurone) складається з підсилювачів зі змінними коефіцієнтами передачі (ваговими коефіцієнтами, настроювальними параметрами), які налаштовують у процесі функціонування, і суматора сигналів. Ідея корекції вектора параметрів заснована на результатах чергового випробування й застосування їх до еталонної функції вирішального блоку системи “Adaline”. За результатами порівняння отриманої реакції з очікуваною приймається рішення про корекцію вектора параметрів. Основним недоліком такого способу налаштування є тривалість настроювання й точність відпрацьовування завдання динамічним об'єктом після проведення настроювання. Спосіб настроювання суттєво спирається на відмінності, які закладені у вирішальну функцію еталонної моделі й системи “Adaline”.

Наявність цих відмінностей визначає величину й напрямок зміни вагових коефіцієнтів, а також для забезпечення точності налаштування необхідно здійснювати корекцію малим кроком, що в цілому визначає тривалість процесу їх настроювання. При цьому підстроювання здійснюється до параметрів навчальної моделі, яка не враховує динамічні властивості об'єкта керування в умовах функціонування. Таким чином, якщо параметри еталонної моделі відрізняються від параметрів керованого об'єкта, то бажаної точності й швидкодії досягнуто не буде.

У праці [1] система “Adaline” застосована для керування ядерним реактором. Керуючий пристрій складається з нейроконтролера й ПД-регулятора, що використовується як еталонна модель. Для настроювання нейроконтролера (виконаного по принципах побудови системи “Adaline”) як еталонна моделі застосовано ПД-регулятор. Для настроювання вагових коефіцієнтів нейроконтролера використовуються вихідні дані ПД-регулятора, які відповідно до алгоритму роботи нейроконтролера змінюють його вагові коефіцієнти. Коли реакція нейроконтролера стає такою ж, як і вихід ПД-регулятора, ПД-регулятор вимикається.

Недоліками підходу слід уважати низьку швидкість настроювання вагових коефіцієнтів і недостатні як точність, так і швидкодію запропонованої системи керування, у якій ПД-регулятор використовується як еталонна модель для настроювання нейроконтролера. Точність і швидкодія системи значною мірою визначаються якістю настроювання ПД-регулятора й впливають на швидкість налаштування нейрорегулятора за необхідним часом для навчання.

Праця [2] представляє стратегію керування прямої адаптації нейронної мережі для нелінійної системи з невідомими параметрами типу регресії. Передбачається, що система навчається шляхом мінімізації вихідних значень нейронної моделі. Для систем зі змінною структурою в [3] передбачається використання ковзного режиму з метою підвищення стійкої роботи системи керування.

Як показано в праці [4] при нейрорегуляторному керуванні динамічним об'єктом існує можливість позбутися необхідності використання ковзного режиму, який призводить не лише до затягування процесу керування, але й забезпечує ощадливий режим функціонування виконавчої частини системи керування за рахунок приведення до мінімуму числа перемикачів сигналу керування.

### Цілі

Мета статті — синтез алгоритму настроювання вагових коефіцієнтів нейроконтролера в контурі керування динамічного об'єкта, що забезпечує достатні показники точності й швидкодії в разі відсутності еталонної моделі.

### Формулювання завдання керування

Розглядається динамічний об'єкт, описуваний диференціальним рівнянням вигляду

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), \quad (1)$$

у якому  $x(t) \in R^n$  — вектор змінних стану;  $u(t)$  — керуючий сигнал;  $A$  —  $n \times n$  матриця й  $b$  —  $n$ -вимірний вектор, тобто

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ k \end{pmatrix}. \quad (2)$$

У праці (2) коефіцієнти  $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$  визначаються параметрами системи, які конструкторові системи заздалегідь невідомі. Передбачається тільки, що система (1), (2) не має комплексних коренів, а коефіцієнти  $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$  можуть перебувати в інтервалах

$$\underline{a}_{ni} \leq a_{ni} \leq \bar{a}_{ni}, \quad \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \quad (3)$$

границі  $\underline{a}_{ni}, \bar{a}_{ni}, \underline{k}, \bar{k}$  вважаються відомими.

Відомо також, що об'єкт у момент, пов'язаний із пуском системи, тобто коли  $t = 0$ , перебуває в стані  $x(0)$ . Уважається, що вимір станів системи проводиться датчиками, що дають малу кількість шумів, або ж стани системи можуть бути з достатньою точністю оцінені. Ставиться завдання про переміщення об'єкта з початкового стану  $x(0)$  у кінцевий  $x(t_k)$  за мінімальний час  $T \in [0, t_k]$ .

### Моделювання алгоритму керування

Відповідно до вимог завдання, і ввівши припущення про відомість параметрів, будемо вважати, що алгоритм керування повинен забезпечити оптимальний режим роботи системи за часом за рахунок використання сигналу управління виду  $u(t) = \{+U, -U\}$ , а також його перемиканні в деякі моменти часу з числом інтервалів керування, зумовлених відомою теоремою про  $n$ -інтервали. Припустимо, що й в умовах завдання з невизначеними параметрами система, що розглядається, має близький до оптимального режим роботи, причому число перемикань сигналу керування не повинне значно перевищувати  $n$ .

Такий режим роботи системи, в якому кількість перемикань сигналу керування наближається до оптимального та забезпечує потрібну якість керування, будемо називати квазіоптимальним. У цьому випадку керування ковзний режим динамічної системи не передбачається.

Як і в [1; 2] нейроконтролер за даними  $c_0$  і  $\Delta(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  обчислює значення деякої вирішальної функції  $F(c, X(t))$ , де  $X(t)$  — вектор, компоненти якого визначаються цифровим кодом сигналів  $\Delta(t) = x_3(t) - x(t)$  і  $\dot{x}(t)$ .

Знак функції  $F(c, X(t))$  визначає знак сигналу керування  $u(t)$ , який формується комутуючим елементом, а саме

$$u(t) = \begin{cases} +U, & \text{якщо } F(c, X(t)) > 0, \\ -U, & \text{якщо } F(c, X(t)) < 0, \\ u(t-0), & \text{якщо } F(c, X(t)) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Комутуючий елемент перемикає напругу з величини  $+U$  на  $-U$ , або навпаки на вході динамічного об'єкта за законом (4). У системі (4) значення керуючого впливу  $u(t)$  також зберігається рівним попередньому значенню, якщо фазова точка системи перебуває на поверхні перемикань, тобто коли  $F(c, X(t)) = 0$ .

Функція  $F(c, X(t)) = 0$  у фазовому просторі геометрично інтерпретується поверхнею перемикань (рис. 1), яка ділить увесь фазовий простір на області керувань протилежних знаків.

На рис. 2 уведені позначення  $e_1, e_2, e_3$  — координати фазового простору;  $U_+$  — керуючий вплив позитивного знака;  $U_-$  — керуючий вплив негативного знака;  $O$  — початок координат.

Сигнал  $u(t)$  змушує об'єкт рухатися вбік зменшення помилки  $\Delta(t)$ , що відповідає положенню точки  $O$  рис. 2.

Основною складністю підходу є визначення виду функції  $F(\cdot)$ . Якщо відомий точний вигляд математичної моделі (1), (2) і  $n \leq 3$ , то функцію  $F(\cdot)$  знаходять в аналітичному виді. В інших випадках функція  $F(\cdot)$  впливає або спрощує математичну модель процесу керування або будує її у вигляді лінійної моделі щодо вимірюваних координат  $X(t)$ .

При організації обчислювального процесу слід виключити вплив кінцевої точності обчислень, що проявляється в нескінченному циклі керування в околиці початку координат. Усунення таких циклів приводить до необхідності введення в околиці початку координат деякої області  $\Omega_{\text{ц}}$ , де чинність закону керування (4) припиняється, будемо називати областю досяжності.

Невизначеність параметрів об'єкта (1), (2) зумовлює довільну установку вагових коефіцієнтів з функції  $F(\cdot)$ , що може приводити до таких ситуацій в роботі системи:

- 1) ковзний режим;
- 2) режим автоколиваний;
- 3) влучення об'єкта в коло припустимих помилок  $|\Delta_i(t)| \leq \Delta^*$  за необхідне кількість перемикань  $N^*$  керуючого впливу  $u(t)$ .

Перші дві ситуації є помилковими, остання є бажаною.

Відмінність помилкових ситуацій здійснюється на підставі логіки, що опирається на розрахунок кількості перемикань комутуючого елемента й вимірі сигналу помилки  $\Delta(t)$ . Якщо в результаті розрахунку числа перемикань фіксується зміна керуючого впливу з високою частотою  $N \gg N^*$ , а сигнал помилки  $\Delta(t)$  зменшується за величиною, але знак її відносно  $\Delta^*$  не змінюється, то розпізнається ситуація 1, тобто система керування функціонує в ковзному режимі.

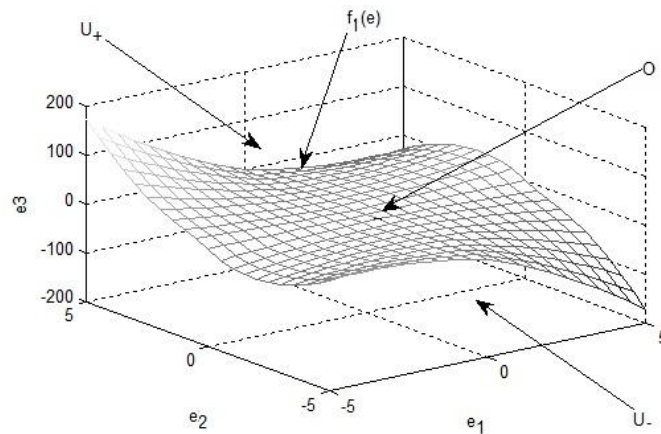


Рис. 1. Вид функції  $F(\cdot)$  у просторі координат  $e_1, e_2, e_3$ .

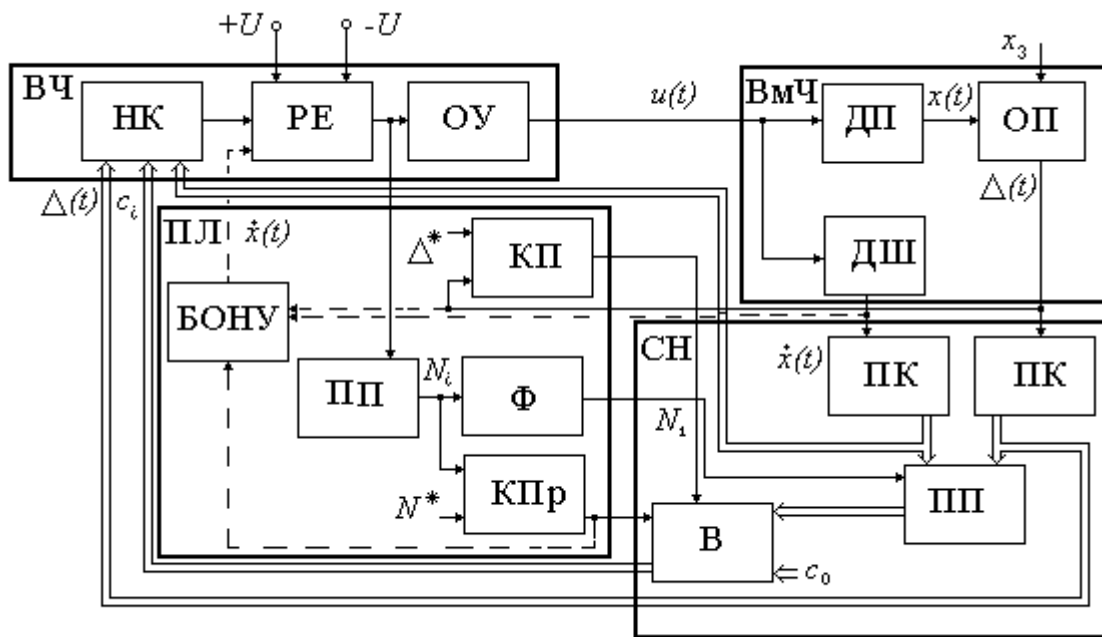


Рис. 2. Структура системи керування з нейроконтролером

Якщо разом зі зміною знака керуючого впливу здійснюється зміна знака сигналу помилки  $\Delta(t)$  відносно  $\Delta^*$ , то розпізнається ситуація 2 — режим автоколивань.

Корекцію вагових коефіцієнтів слід проводити за правилом навчання одношарового персептрона

$$c_i = c_{i-1} - X_1(t) \text{sign} \Delta_{i-1}, \quad (5)$$

де  $X_1(t)$  — значення фазової точки;  $c_{i-1}$  — вагові коефіцієнти на  $(i-1)$ -м кроці настроювання системи;  $\Delta_i$  — значення помилки корекції, а функція  $\text{sign}(\cdot)$  має вигляд

$$\text{sign}(l) = \begin{cases} +1, & \text{якщо } l > 0, \\ -1, & \text{якщо } l < 0, \\ 0, & \text{якщо } l = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Вибір  $X_1(t)$  і  $\Delta_i$  суттєво впливає на збіжність процесу навчання. З метою підвищення швидко-

сті збіжності до правильного розв'язку пропонується фіксувати значення координат  $\Delta(t)$  і  $\dot{x}(t)$  першого перемикання. Тоді розрахунки вагових коефіцієнтів  $c_i$  відбуватимуться не за вихідними значеннями, а за значеннями зафіксованих координат.

Правило (5) діє щоразу, коли не задовольняються умови оптимального режиму об'єкта, тобто не виконуються умови  $N \leq N^*$  і  $\Delta \leq \Delta^*$ . Робота системи може бути завершена, якщо задовольняються умови  $N \leq N^*$  і  $\Delta \leq \Delta^*$ .

У випадку, коли розпізнано одну з помилкових ситуацій, не слід чекати, коли система зупиниться й кінцевих значень фазового вектора, які перебувають у зоні припустимих помилок  $\Delta^* \in \Omega_{ц}$ , тому, що інформація для проведення корекції обчислювачем уже є, тобто числа  $N$  і  $X_1$  вже відомі. Отже, при розпізнаванні помилкової

ситуації система може бути зупинена й зведена до початкового стану для наступного випробування. Таким чином, алгоритм роботи системи полягає в тому, що на кожному випробуванні проводиться розрахунок кількості зміни знака сигналу керування й фіксування помилки системи. Ця інформація використовується у виразі (5), якщо результати випробування відрізняються від очікуваних.

### Реалізація системи керування

Описаний підхід керування динамічним об'єктом можна реалізувати за допомогою приладу, який містить (рис. 2) як варіант конструктивного виконання виконавчу частину ВЧ, у складі нейроконтролера НК, релейного елемента РЕ, динамічного об'єкта ОУ; вимірального каналу ВмЧ, який складається з датчика положення ДП, датчика швидкості ДШ, обчислювача помилки ОП; системи настроювання нейроконтролера СН, що складається із блоків кодування ПК, блоку пам'яті ПП, обчислювача В; логічного пристрою ПЛ, у складі лічильника кількості перемикань КП, фіксатора першого перемикання Ф, компаратора числа перемикань КПр, компаратора помилки КП, а також можуть бути включені блоки зупинника й початкових уставок БОНУ.

Операція переведення об'єкта в початковий стан  $X(0)$  здійснюється блоком зупинника й початкових уставок, у які інформація надходить від обчислювача помилки, датчика швидкості й компаратора кількості перемикань. Вихідний сигнал блоку діє на релейний елемент, який устанавлює динамічний об'єкт у початковий стан, при цьому фазовий вектор дорівнюватиме початковому значенню  $X(t) = X(0)$ . Пристрій, за допомогою якого реалізується даний підхід настроювання вагових коефіцієнтів системи "Adaline" при керуванні динамічним об'єктом, працює так.

Перед початком роботи системи керування (рис. 2) об'єкта, який перебуває в початковому стані  $x(0)$ , устанавлюють припустиме значення помилки  $\Delta^*$  і точне значення мінімальної кількості перемикань  $N^*$ . Устанавлюють також довільні значення вагових коефіцієнтів нейрорегулятора  $c_0$ . На вхід системи подають завдання  $x_3$  для відпрацювання. Момент часу  $t$  подачі завдання на систему керування вважають як початковий, тобто  $t = 0$ . Із цього моменту здійснюють розрахунки помилки за положенням й швидкістю навантаження за допомогою датчиків положення, швидкості й обчислювача помилки. Їхні значення надходять на блоки кодування, які перетворюють поточні значення помилок положення й швидкості навантаження об'єкта в цифровий код. Цей код надходить на сигнальні входи  $\Delta(t)$  і

$\dot{x}(t)$  нейроконтролера. На входи вагових коефіцієнтів  $c_i$  нейроконтролера надходять значення  $c_0$  від обчислювача.

### Дослідження основних властивостей алгоритму

Для моделювання системи настроювання й дослідження основних властивостей алгоритму вивчалася динаміка об'єкта (1), у якому матриця  $A$  і вектор  $b$  мають вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ k \end{pmatrix}. \quad (7)$$

У цьому випадку елементи матриці  $a_{21}$ ,  $a_{22}$ ,  $k$  відповідно до умов експерименту вважаються невідомими. Функція  $F(\cdot)$  для об'єкта (1), (7) має вигляд

$$F(c, X(t)) = c_1 \Delta(t) + c_2 \dot{x}(t).$$

Результати моделювання запропонованого алгоритму настроювання подано на рис. 3–7.

Так, на рис. 3 репрезентовано первісне розбалансування вагових коефіцієнтів нейроконтролера  $c_1$ ,  $c_2$  вбік збільшення, яка приводить до ковзного режиму динамічного об'єкта; розбалансування  $c_1$ ,  $c_2$  вбік зменшення коефіцієнтів приводить до режиму автоколивань (рис. 7).

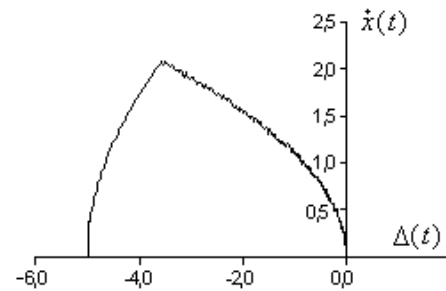


Рис. 3. Ковзний режим динамічного об'єкта у фазовій площині

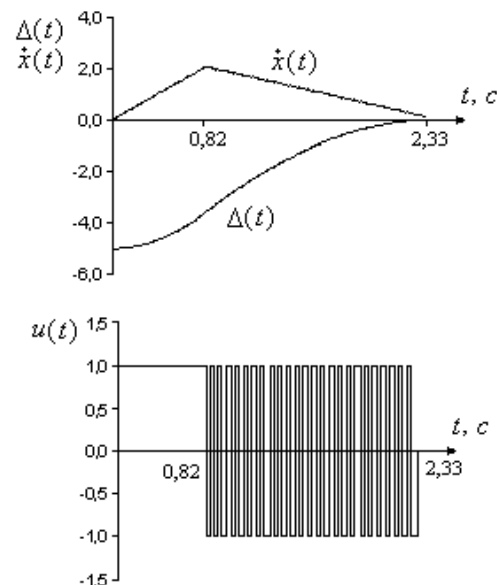


Рис. 4. Сигнали  $\Delta(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  і  $u(t)$  динамічного об'єкта в часовій площині при ковзному режимі

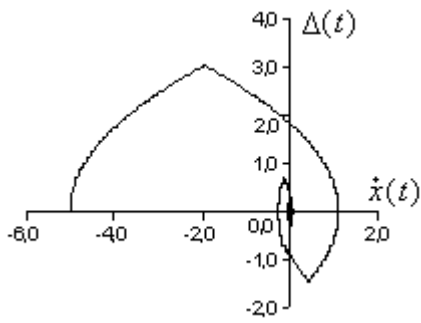


Рис. 5. Автоколивальний режим динамічного об'єкта у фазовій площині

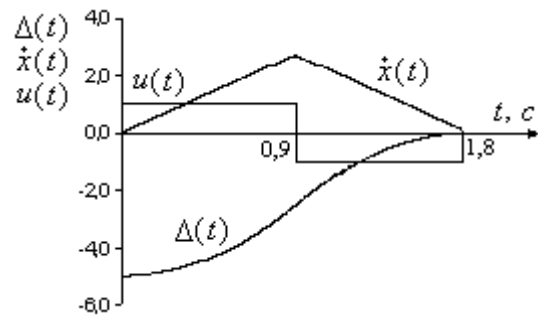


Рис. 8. Сигнали  $\Delta(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  і  $u(t)$  динамічного об'єкта в оптимальному режимі

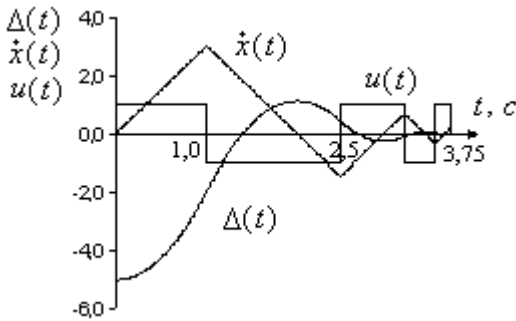


Рис. 6. Сигнали  $\Delta(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  і  $u(t)$  динамічного об'єкта в тимчасовій площині при автоколивальному режимі

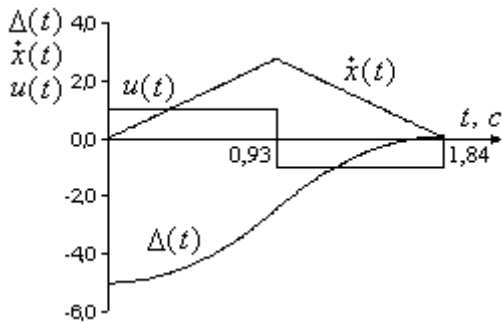


Рис. 7. Сигнали  $\Delta(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  і  $u(t)$  динамічного об'єкта у квазіоптимальному режимі

Після завершення процесу настроювання отримується квазіоптимальний за швидкістю процес керування (див. рис. 7).

Порівняння ковзного режиму (див. рис. 3) з оптимальним (рис. 8) дає змогу оцінити програш у тривалості ковзного режиму, у цьому випадку він становить 29 %.

Водночас квазіоптимальний режим роботи, отриманий після процесу настроювання, програє оптимальному режиму тільки 3 %.

На процес навчання нейроконтролера для досліджуваного динамічного об'єкта, витрачено п'ять ітерацій при початковому розбалансуванні вагових коефіцієнтів у 100 %, яку показано на рис. 9.

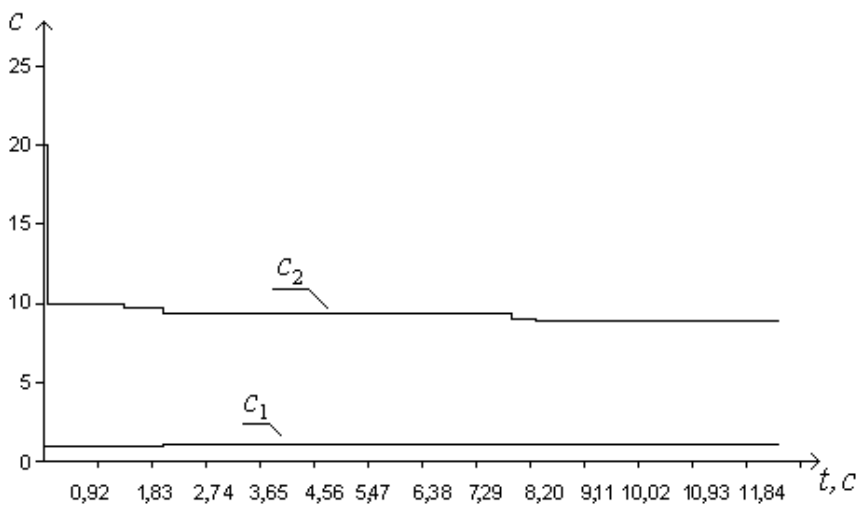


Рис. 9. Корекція коефіцієнтів  $c_i$  нейрорегулятора в процесі навчання

### Висновки

Підвищення ефективності настроювання вагових коефіцієнтів системи "Adaline" під час керування динамічним об'єктом в запропонованому алгоритмі, порівняно з відомими, полягає в тому, що досягається точність відпрацювання завдань із мінімальними часовими витратами, а також зменшується тривалість настроювання нейроконтролера за рахунок додаткового контролю кількості перемикачів і використання як навчальної точки — фазових координат точки першого перемикачів сигналу керування. При цьому інформація для навчання нейроконтролера береться по поточній лінії перемикачів  $F(c, X(t))$ , яка вибудовується на кожному кроці навчання.

Такий алгоритм настроювання, крім кращих характеристик відпрацювання об'єктом завдання, має додаткову можливість навчатися в процесі функціонування системи при зміні параметрів об'єкта, які проявляються, наприклад, при зміні навантаження або його початкового стану.

У випадку постійно діючого завдання можна значно зменшити час навчання нейроконтролера за рахунок визначення помилкових ситуацій і

дострокової корекції вагових коефіцієнтів нейроконтролера.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Ashour M.* Adaptive neural control of NPR / M. Ashour, A. Aboshosha // Proceeding of A1 Azhar Engineering Fifth International Conference AEIC-97, Cairo, Egypt, December 19–22, 1997.

2. *Noriega J. R.*, A direct adaptive neural network control for unknown nonlinear system and its application / J. R. Noriega, H. Wang // IEEE Trans. Neural networks. — 9. — № 1. — 1998. — P. 27–34.

3. *Efe M. O.* A novel error critic for variable structure control with an ADALINE / M. O. Efe // Transactions of the Institute of Measurement and Control 24,5. — 2002. — P. 403–415.

4. *Пат. № 81997* Україна, МПК G 05 B 13/00, G 05 B 11/00. Спосіб настроювання вагових коефіцієнтів системи "Adaline" при керуванні динамічними об'єктами / Кучерів Д. П.; заявник та патентовласник ЦНДІ ОБТ ЗС України. — Заявл. 2.06.06; опубл. 25.02.08, Бюл. № 4. — 6 с.

5. *Widrow B.*, Groner G. F., Hu M. J., Smith F. W., Specht D., Talbert L. R. Practical application for adaptive data processing systems. — WESCON Techn. Papers, No 7, 11/4, 1963.

Стаття надійшла до редакції 16.06.2014.