ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 19, 2007

УДК 62-52

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОБУДОВИ І МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ КОНТРОЛЕРІВ НА БАЗІ ДИНАМІЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

М.В. Наконечний, Ю.М. Наконечний

Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (8-067)309-16-60

Рассмотрены особенности реализации пропорционально-интегрально-дифференциального закона управления с помощью динамической нейронной сети и обоснованно целесообразность использования нейронного пропорционально-интегрально-дифференциального контролера для управления нелинейным объектом. Осуществлено моделирование системы управления с использованием нейронного контролера с разделенными входами. Показано, что анализ стойкости такой системы управления можно осуществлять методом корневого годографа или методом частотных характеристик.

The features of realization of proportional-integral-differential law of management are considered by a dynamic neuron network and grounded expedience of the use of neuron proportional-integral-differential inspector for a management a nonlinear object. The design of control the system is carried out with the use of neuron inspector with part entrances. It is rotined that the analysis of firmness of such control the system can be carried out the method of root hodograph or method of frequency descriptions.

При реалізації пропорціонально-інтегрально-диференціального (ПІД) закону керування функціональна залежність між похибкою розузгодження і керуючим впливом, який підводиться до входу об'єкта керування, має вигляд:

$$U(t) = K_p \Delta y(t) + K_I \int \Delta y(t) dt + K_D \frac{d\Delta y(t)}{dt}, \qquad (1)$$

де $\Delta y(t)$ – сигнал похибки розузгодження; $U(t)$ – керуючий вплив; K_p, K_I, K_D – коефіцієнти при пропорційній, інтегральній і диференціальній складових відповідно.

Передавальна функція аналогового ПІД-контролера є такою:

$$W(s) = \frac{U(s)}{\Delta y(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s, \qquad (2)$$

а дискретний варіант реалізації ПІД-закону керування можна одержати шляхом підстановки в рівняння (2) виразу $s=(1-z^{-1})/\Delta t$, в результаті чого

$$W(z) = K_p + K_I \frac{\Delta t}{\left(1 - z^{-1}\right)} + K_D \frac{\left(1 - z^{-1}\right)}{\Delta t}. \qquad (3)$$

Звівши праву частину виразу (3) до спільного знаменника, згрупувавши доданки при від'ємних степенях z та ввівши позначення $W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}$ одержимо, що:

$$W(z) = \frac{W_{11} + W_{12} z^{-1} + W_{13} z^{-2}}{1 - W_{14} z^{-1}}, \qquad (4)$$

де $W_{11} = \frac{K_D}{\Delta t} + K_p + K_I \Delta t$; $W_{12} = -\left(2\frac{K_D}{\Delta t} + K_p\right)$;

$W_{13} = \frac{K_D}{\Delta t}$; $W_{14} = 1$,

а різницеве рівняння, яке відповідає виразу (4) , буде мати такий вигляд:

$$U(k) = W_{11}\Delta y_k + W_{12}\Delta y_{k-1} + W_{13}\Delta y_{k-2} + W_{14} U_{k-1}. \qquad (5)$$

Найпростіша нейронна мережа, на базі якої можна відтворити різницеве рівняння (5) має вигляд нейрона з лінійною функцією активації на виході та двома лініями затримки на першому вході і однією лінією затримки в колі оберненого зв'язку нейрона. Схема такої нейронної мережі наведена на рис.1.

Проте більш ефективним з огляду забезпечення високої якості процесу керування і швидкої реакції системи на вплив факторів зовнішнього середовища є нейронний контролер з розділеними входами. Схема такого

контролера наведена на рис. 2, а різницеве рівняння, яке описує його роботу, має вигляд:

$$U_k = W_{11}r_k + W_{12}r_{k-1} + W_{13}r_{k-2} + \\ + W_{14}y_k + W_{15}y_{k-1} + W_{16}y_{k-2} + W_{17}U_{k-1}. \quad (6)$$

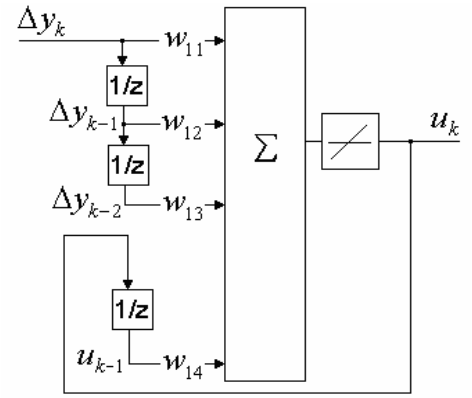


Рисунок 1 – Схема нейронної мережі для реалізації ПІД-закону керування

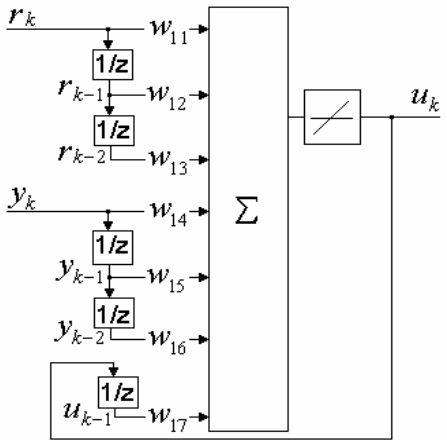


Рисунок 2 – Схема нейронного контролера з розділеними входами

Очевидно, що при $W_{14} = -W_{11}$, $W_{15} = -W_{12}$, $W_{16} = -W_{13}$ наведена схема буде еквівалентна схемі, представленій на рис. 1, але при тому після закінчення процесу навчання мережі коефіцієнти на входах r_k і y_k встановляться незалежно один від одного, що, в разі необхідності, дозволить подавати керуючу дію на об'єкт поза межами кола зворотного зв'язку. Значення вагового коефіцієнта W_{17} будемо вважати завжди фіксованим і рівним одиниці.

Для аналізу архітектури нейронного контролера з розділеними входами перетворимо рівняння (6) до такого виду, щоб окремо виділити коло зворотного зв'язку $(\Delta y_k = r_k - y_k)$.

В результаті отримаємо, що:

$$U_k = (W_{11} + W_{14})r_k + (W_{12} + W_{15})r_{k-1} + \\ + (W_{13} + W_{16})r_{k-2} - W_{14}\Delta y_k - W_{15}\Delta y_{k-1} - \\ - W_{16}\Delta y_{k-2} + W_{17}U_{k-1}. \quad (7)$$

Якщо ліву частину виразу (7) подати у вигляді

$$U_k = U_{1k} + U_{2k}, \quad (8)$$

де

$$U_{1k} = (W_{11} + W_{14})r_k + (W_{12} + W_{15})r_{k-1} + \\ + (W_{13} + W_{16})r_{k-2} + W_{17}U_{k-1}, \quad (9)$$

$$U_{2k} = -W_{14}\Delta y_k - W_{15}\Delta y_{k-1} - \\ - W_{16}\Delta y_{k-2} + W_{17}U_{2k-2} \quad (10)$$

то схема нейронного контролера, яка відповідає рівнянням (9) і (10) , буде мати вигляд, що представлений на рис. 3.

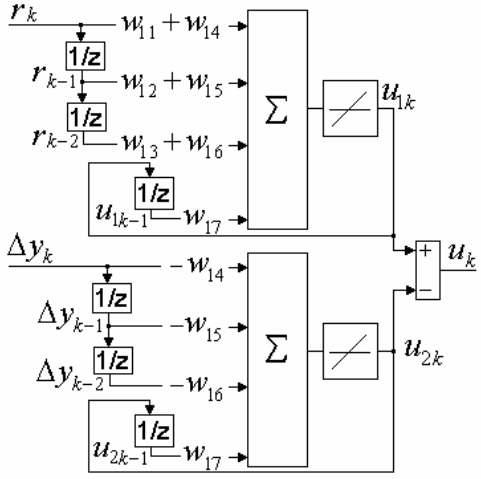


Рисунок 3 – Схема контролера з розділеними входами на базі двох нейронних мереж

Завдяки функціональній ідентичності схем, які наведено на рис. 2 і рис. 3, дослідження схеми на рис. 2 можна здійснювати, використовуючи для досліджень схему на рис. 3.

Схема системи автоматичного керування з використанням контролера на базі двох нейронних мереж наведена на рис. 4.

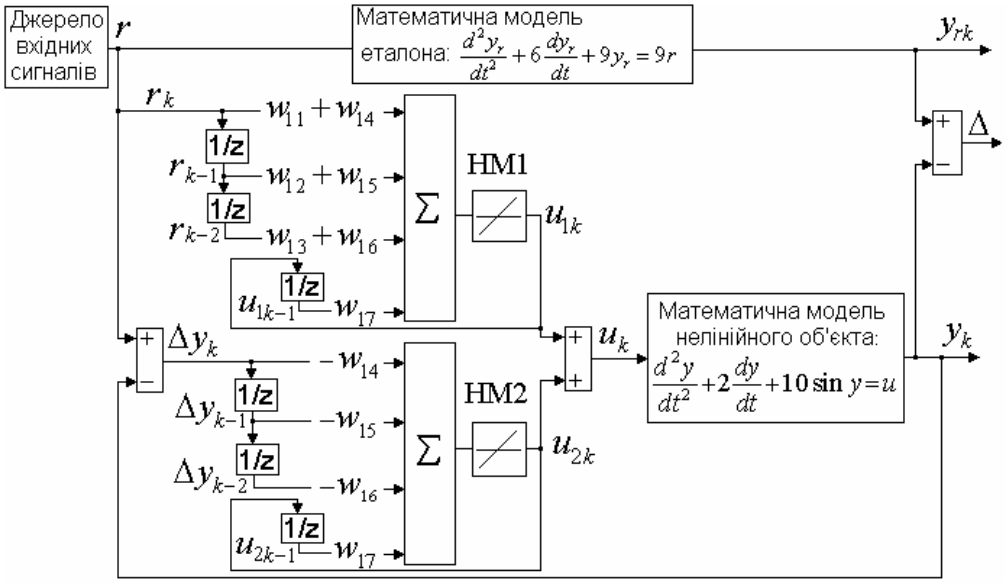


Рисунок 4 – Структурна схема системи автоматичного керування з використанням розділеного контролера на базі двох нейронних мереж

В такій системі процес керування здійснюється за допомогою двох нейронних мереж з однаковою структурою, вихідні сигнали яких додаються і сумарний сигнал подається на вхід керованого об'єкта. Значення сигналу на виході першої нейронної мережі НМ-1 є тільки функцією задаючого впливу r_k і не залежить від значень регульованої величини, а вихід другої нейронної мережі НМ-2 формується на основі сигналу похибки розузгодження Δy_k, яка визначається різницею задаючого впливу r_k і вихідного сигналу об'єкта y_k, що через коло оберненого зв'язку подається на другий вхід схеми порівняння, яка підключена до входу мережі НМ-2.

Для моделювання процесів в системі автоматичного керування, виконаній на базі нейронного контролера з розділеними входами, використовувалася математична модель нелінійного об'єкта у вигляді:

$$\frac{d^2y}{dt^2}+a_1\frac{dy}{dt}+A\sin y=U\,. \qquad (11)$$

На рис. 5 наведені графіки процесів, які отримані при моделюванні системи автоматичного керування, виконаної на базі нейронної мережі, до входу якої підводиться сигнал похибки розузгодження Δy (*крива* - y_1) і системи, в якій для формування керуючого впливу на об'єкт використовується нейронний контролер з розділеними входами (*крива* - y_2). Вихід еталона представлений кривою y_r.

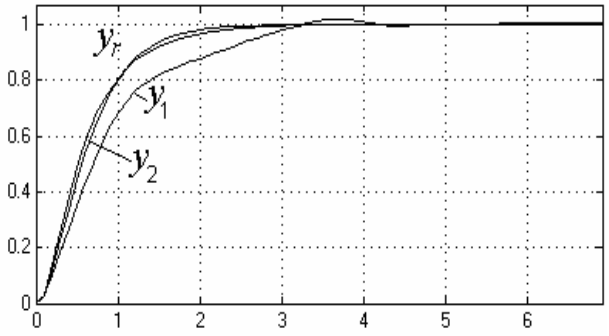


Рисунок 5 – Сигнали на виходах моделей еталона і систем керування з використанням традиційного контролера (крива y_1) і контролера з розділеними входами (крива y_2)

Порівняння кривих y_1 і y_2 показує, що система автоматичного керування, в якій використовується нейронний контролер з розділеними входами функціонує більш ефективно в порівнянні з системою, яка реалізована на базі нейронного контролера з традиційним способом формування вхідного сигналу.

Для аналізу динамічних характеристик системи з використанням методів лінійної теорії автоматичного керування проведемо лінеаризацію

диференціального рівняння об'єкта (11), представивши його у вигляді

$$\frac{d^2y}{dt^2}+a_1\frac{dy}{dt}+a_0y=U \qquad (12)$$

і прийнявши, що $a_1=2$ і $a_0=10$.

Тоді передавальна функція об'єкта керування в дискретній формі буде такою:

$$W_0(z)=\frac{(\Delta t)^2}{1+2\Delta t+10(\Delta t)^2-2(1+\Delta t)z^{-1}+z^{-2}}. \qquad (13)$$

Враховуючи, що на основі співвідношень (9) і (10) передавальні функції нейронних мереж НМ-1 і НМ-2 в дискретній формі можуть бути представлені у такому вигляді:

$$W_1(z)=\frac{U_1(z)}{r(z)}= \\ =\frac{(W_{11}+W_{14})+(W_{12}+W_{15})z^{-1}+(W_{13}+W_{16})z^{-2}}{1-W_{17}z^{-1}}, \qquad (14)$$

$$W_2(z)=\frac{U_2}{\Delta y(z)}=\frac{-W_{14}-W_{15}z^{-1}-W_{16}z^{-2}}{1-W_{17}z^{-2}}, \qquad (15)$$

одержимо таку структурну схему дискретної системи керування, яка наведена на рис. 6.

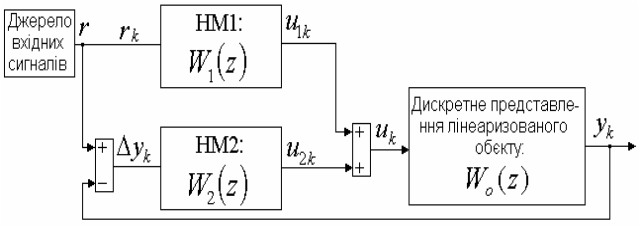


Рисунок 6 – Структурна схема дискретної системи автоматичного керування на базі нейронного контролера з розділеними входами

З рис. 3 видно, що нейронні мережі НМ-1 і НМ-2 за архітектурою ідентичні. Вони відрізняються тільки числовими значеннями вагових коефіцієнтів і, по суті, обидві мережі відповідають дискретному представленню ПІД-контролера (рис.1). Тому, прирівнявши розташовані на певних позиціях вагові коефіцієнти нейронних мереж НМ-1 і НМ-2 (див. рис.3) до відповідних передавальних функцій виразу (4), одержимо співвідношення:

$$W_{11}+W_{14}=\frac{K_{D_1}}{\Delta t}+K_{p_1}+K_{l_1}\Delta t; \qquad (16)$$

$$W_{12}+W_{15}=-\left(2\frac{K_{D_1}}{\Delta t}+K_{p_1}\right); \qquad (17)$$

$$W_{13}+W_{16}=\frac{K_{D_1}}{\Delta t}; \qquad (18)$$

$$-W_{14}=\frac{K_{D_2}}{\Delta t}+K_{p_2}+K_{l_2}\Delta t; \qquad (19)$$

$$-W_{15}=-\left(2\frac{K_{D_2}}{\Delta t}+K_{p_2}\right); \qquad (20)$$

$$-W_{16}=-\frac{K_{D_2}}{\Delta t}, \qquad (21)$$

розв'язавши які відносно K_{D_1}, K_{p_1}, K_{l_1}, K_{D_2}, K_{p_2}, K_{l_2} дістанемо для нейронної мережі НМ-1 такі значення коефіцієнтів:

$$K_{D_1}=(W_{13}+W_{16})\Delta t; \qquad (22)$$

$$K_{p_1}=-W_{12}-W_{15}-2(W_{13}+W_{16}); \qquad (23)$$

$$K_{l_1}=\frac{W_{11}+W_{12}+W_{13}+W_{14}+W_{15}+W_{16}}{\Delta t}, \qquad (24)$$

і відповідно для нейронної мережі НМ-2:

$$K_{D_2}=-W_{16}\Delta t; \qquad (25)$$

$$K_{p_2}=W_{15}+2W_{16}; \qquad (26)$$

$$K_{l_2}=-\frac{W_{14}+W_{15}+W_{16}}{\Delta t}. \qquad (27)$$

Таким чином передавальні функції нейронних мереж НМ1 та НМ2 будуть мати вигляд :

$$W_1(s)=K_{D_1}S+K_{p_1}+\frac{K_{l_1}}{S}; \qquad (28)$$

$$W_2(s)=K_{D_2}S+K_{p_2}+\frac{K_{l_2}}{S}. \qquad (29)$$

Передавальна функція за задаючим впливом для такої системи буде такою:

$$W(s)=\frac{Y(s)}{R(s)}=\frac{[W_1(s)+W_2(s)]W_0(s)}{1+W_2(s)W_0(s)}= \\ =\frac{(K_{D_1}+K_{D_2})S^2+(K_{p_1}+K_{p_2})S+K_{l_1}+K_{l_2}}{S^2+(K_{D_2}+2)S^2+(K_{p_2}+10)S+K_{l_2}}. \qquad (30)$$

В наведеній системі можна виділити дві основні частини: першу – у вигляді ланки з передавальною функцією $W_1(s)$, за допомогою якої задаючий сигнал *r* перетворюється в першу складову керуючого впливу - U_1, що подається на вхід об'єкта

керування і другу – представлену у вигляді замкненого кола охоплених від'ємним оберненим зв'язком послідовно з'єднаних ланок з передавальними функціями $W_2(s)$ і $W_0(s)$, в якому на основі інформації про значення сигналу похибки розузгодження - Δy формується складова у вигляді керуючого впливу U_2.

Реалізація контролера у вигляді, представленому на рис. 2, дозволяє проаналізувати утворену систему, як неперервну. Так, зокрема, для такої системи можна побудувати кореневий годограф, або обчислити її частотні характеристики в розімкненому стані і на основі одержаних результатів давати оцінку стійкості системи або досліджувати вплив зміни параметрів об'єкта на її динамічні характеристики. Таким чином в даному випадку такі критерії як визначення стійкості замкненої системи по розташуванню на комплексній площині амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи, або оцінка стійкості системи за допомогою логарифмічних характеристик можуть бути використані для визначення якості функціонування синтезованого контролера.

На рис. 7 наведено кореневий годограф системи автоматичного керування з використанням зведеного до неперервного нейронного контролера, який отримано при її моделюванні в середовищі MATLAB.

Як видно з рис. 7, траєкторії коренів характеристичного рівняння розташовані в лівій площині комплексної площини коренів, що вказує на те, що система є стійкою при будь-яких значеннях її коефіцієнта.

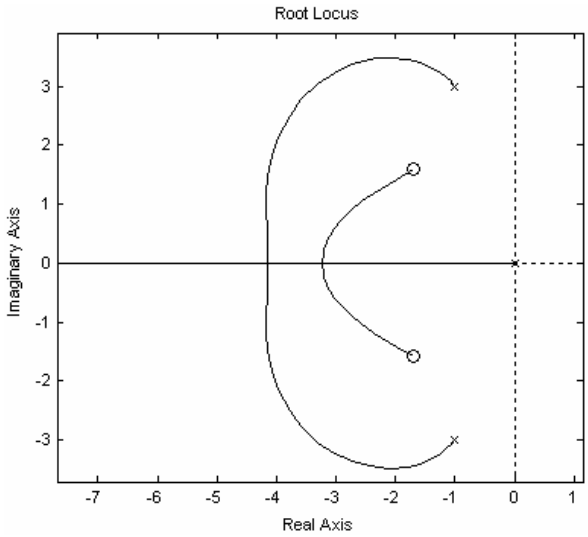


Рисунок 7 – Кореневий годограф системи автоматичного керування з зведеним до неперервного нейронним контролером

Вище наведені методи досліджень є справедливими для аналізу системи автоматичного керування, виконаної на базі лінійного нейронного контролера, схема якого наведена на рис. 2, проте вони можуть бути узагальненими для дослідження систем керування з нелінійними контролерами, якщо активацію нейронів контролера здійснювати на основі лінійного функціонального перетворення.

Література

1. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. - М. : ИПРЖР, 2000. – 342 с.

2. Руденко О. Г. , Бодянский Е.В. Основы искусственных нейронных сетей. – Харьков: Телетех, 2002. – 317с.

3. Сигеру Омату, Мазурки Халид, Рубия Юсоф. Нейроуправление и его приложения (Перевод с английского Н. В. Батина . – М.: ИПРИЖР, 2000. –272с.