

## МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.143.17

### СИНТЕЗ НЕЙРОННОГО КОНТРОЛЕРА НА ОСНОВІ ОБЕРНЕНОЇ КОНВОЛЮЦІЇ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ ЕТАЛОНА

© Наконечний М.В., Муравчук П.В., 2006  
Національний університет "Львівська політехніка"

*Запропонована методика синтезу нейронного контролера на основі оберненої конволюції вихідного сигналу еталона. Приведено результати моделювання системи автоматичного керування з використанням синтезованого контролера*

При вирішенні задач синтезу нейронних контролерів для одержання навчальних послідовностей використовуються різні способи формування сигналів.

У випадках, коли синтез нейронного контролера здійснюється на основі обернення еталона, для формування навчальних послідовностей використовуються різні моделі обертання еталона, зокрема: обернена неперервна модель еталона, обернена дискретна модель еталона, нейронна мережа оберненого еталона, обернена конволюція тощо. Одним з найбільш точних методів формування навчальних послідовностей є обернена конволюція, при реалізації якої обчислення вхідних сигналів еталона здійснюється на основі імпульсної характеристики еталона і його вихідних сигналів.

Результатом оберненої конволюції є числова послідовність, яка визначається за формулою:

$$r_k = \sum_{i=0}^N h_i y_{k-i}, \quad (1)$$

де  $h_i (i = 0, 1, \dots, N)$  – імпульсна характеристика еталона,  $y_k$  – вихідна послідовність еталона,  $r_k$  – вхідна послідовність еталона.

Якщо задані  $h_i$  і  $y_k$ , то розв'язками системи рівнянь (1) є значення  $r_k$ , які одержані в результаті оберненої конволюції виходів еталона.

Порівняння вхідної послідовності еталона  $r_k$ , яка обчислена шляхом оберненої конволюції дослідно знятого вихідного сигналу еталона  $y_{k\text{досл}}$ , з реальним вхідним сигналом  $r_{k\text{досл}}$  показує, що саме при реалізації оберненої конволюції можна отримати послідовність  $r_k$ , яка найбільш точно наближена до  $r_{k\text{досл}}$ .

Проте система автоматичного керування, в якій

використовувався нейронний контролер, при формуванні навчальних послідовностей якого обернення еталона здійснювалось шляхом оберненої конволюції, є нестійкою у зв'язку з тим, що значення вагових коефіцієнтів кіл оберненого зв'язку нейронної мережі на декілька порядків перевищували значення вагових коефіцієнтів кіл проходження вхідного сигналу.

Для аналізу причин такого явища опишемо еталон передавальною функцією  $W(s)$ , лінеаризований об'єкт – передавальною функцією  $W_0(s)$ , нейронну мережу, на основі якої реалізовано контролер, подамо у вигляді двох лінійних нейронних мереж з передавальними функціями  $W_1(s)$  і  $W_2(s)$  – відповідно, а структурну схему системи керування представимо у вигляді згідно рис. 1.

Передавальна функція такої системи має вигляд:

$$W_{\text{зс}}(s) = \frac{Y(s)}{r(s)} = \frac{[W_1(s) + W_2(s)] * W_0(s)}{1 + W_2(s) * W_0(s)}. \quad (2)$$

Розглянемо випадок, коли еталон заданий у вигляді безінерційної ланки, передавальна функція  $W(s)$  якої дорівнює одиниці. В такому випадку після завершення процесу навчання вагові коефіцієнти першої і другої нейронних мереж приймуть значення, при яких буде виконуватися умова:

$$W(s) = 1. \quad (3)$$

Розкривши у виразі (2) дужки і виконавши ряд перетворень, перепишемо його у вигляді:

$$W_{\text{зс}}(s) = \frac{W_1(s) * W_0(s) - 1}{1 + W_2(s) * W_0(s)} + 1. \quad (4)$$

Очевидно, що на основі співвідношень (3) і (4)

можна записати:

$$\frac{W_1(s) * W_0(s) - 1}{1 + W_2(s) * W_0(s)} + 1 = 1, \quad (5)$$

або

$$\frac{W_1(s) * W_0(s) - 1}{1 + W_2(s) * W_0(s)} = 0. \quad (6)$$

Умова (6) може бути досягнута двома шляхами: синтезом оберненого об'єкта з

передавальною функцією  $W_1(s) = 1/W_0(s)$ , в результаті чого чисельник виразу (6) перетворюється в нуль, або збільшенням  $W_2(s)$ , що викликає зростання знаменника цього виразу і, відповідно, наближення виразу (6) до нуля.

Очевидно, що саме другий варіант реалізується у випадку навчання мережі з використанням оберненої конволюції.

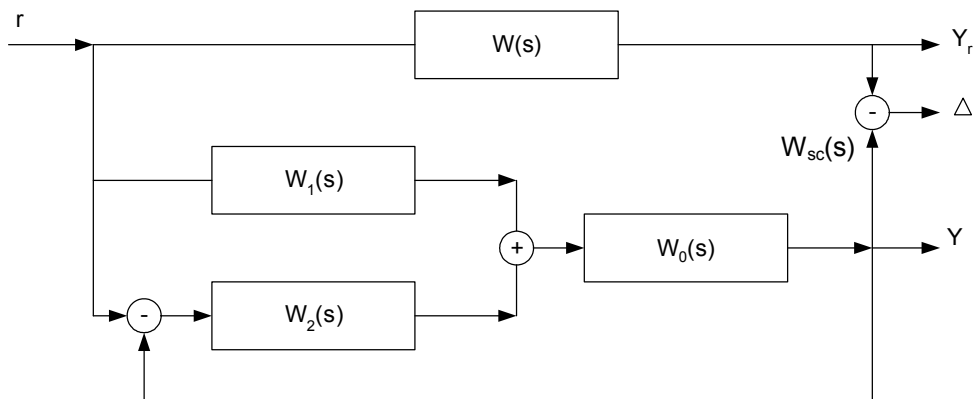


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного керування з використанням контролера, виконаного на базі двох лінійних нейронних мереж

В процесі навчання нейронного контролера вагові коефіцієнти кіл оберненого зв'язку мережі набули достатньо великих значень і тому при моделюванні системи керування, виконаної на базі синтезованого контролера, внаслідок значного підсилення збурень колами оберненого зв'язку, її робота була не стійкою.

Ця обставина зумовлює необхідність застосування при навчанні нейронних мереж методу, при реалізації якого алгоритм навчання вимушений шляхом коригування вагових коефіцієнтів компенсувати вплив збурень, що виникають в процесі навчання мережі.

Методи навчання з використанням обернених моделей еталона або об'єкта забезпечують високу ефективність навчання мережі за рахунок того, що числові послідовності, які використовують при навчанні мережі, представляють собою низькочастотні детерміновані сигнали з накладеними на них високочастотними складовими у вигляді білого шуму, поява яких викликана неточністю реалізації перетворень в процесі формування навчальних послідовностей.

Проте саме завдяки таким особливостям навчальних послідовностей і відсутності обернених зв'язків в середині мережі при її навчанні вказані методи забезпечують високу якість процесу навчання при мінімальних затратах процесорного

часу.

Очевидно, що в загальному випадку навчання нейронної мережі з використанням вказаних методів є ефективним тому, що навчальні послідовності відтворюють не тільки роботу контролера, спрямовану на забезпечення заданого значення вихідної величини об'єкта, але й його дії, направлені на компенсацію збурень, які виникають в реальному об'єкті.

Для знаходження способів формування таких послідовностей розглянемо роботу системи автоматичного керування при наявності збурень.

Якщо збурення, що діють на об'єкт, привести до його входу, то структурна схема системи автоматичного керування може бути представлена у вигляді згідно рис. 2.

В ідеальному випадку для забезпечення незалежності вихідної величини об'єкта від дії збурюючого фактора вихідний сигнал контролера необхідно доповнити рівним за величиною і протилежним за знаком до  $f$  компенсуючим сигналом. Проте в реальному випадку на виході контролера інформація про дію збурюючого фактора буде доступною тільки після порівняння заданого сигналу  $r$  з вихідним сигналом збуреного об'єкта і проходження отриманого різницевого сигналу через контролер.

В зв'язку з тим, що після проходження

вхідного сигналу об'єкта через послідовно включені об'єкт і контролер, які в більшості випадків є нелінійними динамічними ланками, має місце суттєве спотворення форми вихідного сигналу контролера, зокрема, його високочастотної

складової, яка сформована дією збурюючих факторів, то в реальній системі вихідний сигнал контролера, особливо його високочастотна складова суттєво відрізняється від сигналу, який підводиться до входу об'єкта.

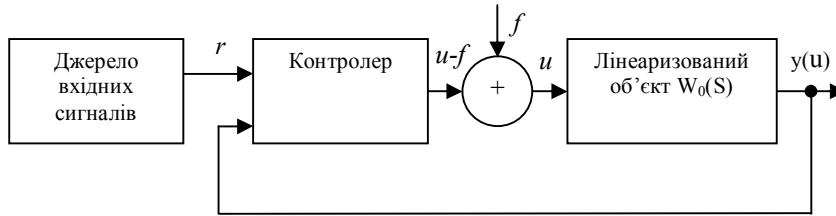


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичного керування при наявності збурень (ідеальний випадок)

Структурна схема системи керування з врахуванням впливу збурюючих факторів на формування керуючого сигналу наведена на рис. 3

Відповідно до наведеної схеми навчання контролера необхідно здійснювати з використанням наступних послідовностей:

- 1) послідовність  $r$ , яка визначається задаючим сигналом системи;
- 2) послідовність  $y_k(U_k + f_k - f'_k)$ , яка відповідає вихідному сигналу об'єкта при дії на

нього збурюючого фактора;

- 3) послідовність  $U_k - f'_k$ , яка відповідає виходу контролера, при дії на об'єкт збурення.

Оскільки згідно з вищевказаним найбільшою точністю при одержанні навчальних послідовностей відзначається метод оберненої конволюції, то формування вхідної послідовності  $r_k$  здійснимо з використанням вказаного методу.

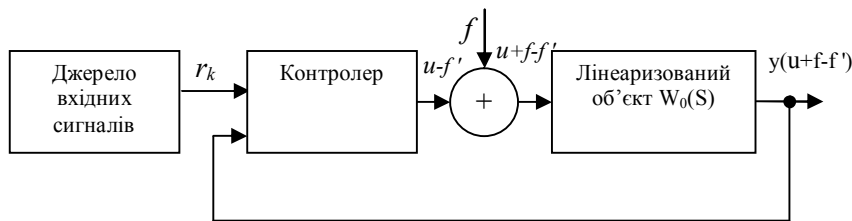


Рис. 3. Структурна схема системи керування при наявності збурень (реальний випадок)

В даному випадку послідовність  $r_k$  – це послідовність, яку необхідно подати на вхід контролера, щоб на виході системи одержати сигнал  $y_k(U_k)$ , і тому вона визначається на основі оберненої конволюції вихідного сигналу  $y_k(U_k)$  незбуреного об'єкта.

Послідовність на виході збуреного об'єкта  $y_k(U_k + f_k - f'_k)$  отримується штучно при подачі на його вхід сигналу  $U_k + f_k - f'_k$ . Треба зазначити, що для одержання послідовності  $U_k + f_k - f'_k$  необхідно попередньо сформувати сигнали  $f_k$  і  $f'_k$ , пам'ятаючи при тому, що до спектрів вказаних сигналів повинні входити як спектральні складові сигналу збурення, так і ті складові, які визначають динаміку системи у високочастотній області.

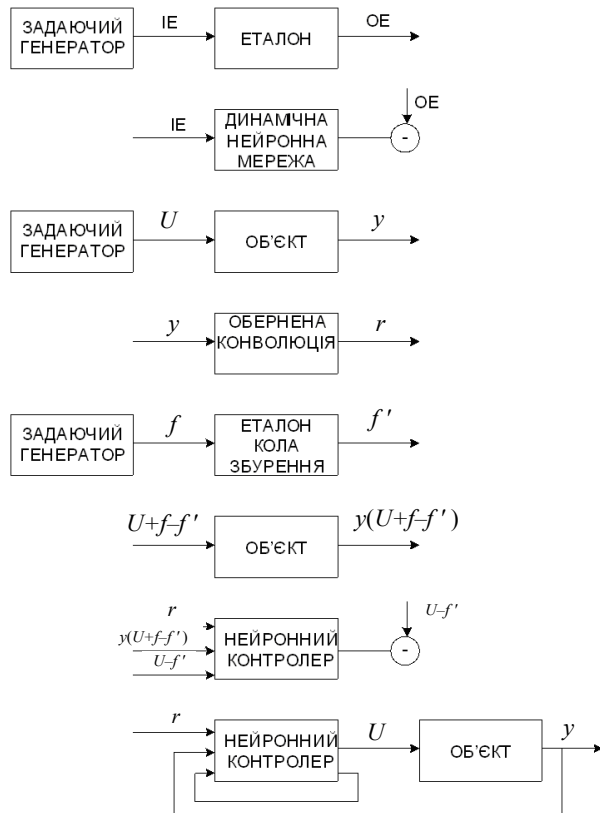
Послідовність  $f'_k$  обчислюється на основі

послідовності  $f_k$  шляхом імітації роботи кола поширення збурюючого сигналу. Тому необхідно наперед задатися певною моделлю кола збурення, подібно до того, як задається модель еталона за задаючим впливом, тобто крім еталона функціонування системи за задаючим впливом необхідно ще вказати еталон її функціонування по реакції на збурення. Очевидно, що при виборі моделі еталона за збуренням необхідно виходити з того, що дія збурюючих впливів повинна відслідковуватися системою набагато швидше, ніж дія сигналів, які викликані задаючим впливом.

Тому, виходячи із сказаного, еталонну модель за збуренням вибрано у вигляді  $b_0 / (a_2 s^2 + a_1 s + a_0)$ .

В загальному випадку структура і числові значення коефіцієнтів моделі еталона за збуренням визначаються на основі результатів моделювання об'єкта. Послідовність операцій, які необхідно виконати при навчанні нейронного контролера на

основі оберненої конволюції і з використанням еталона кола збурення, наведена на рис. 4



$IE_k$  – числова послідовність на вході еталона;  $OE_k$  – числова послідовність на виході еталона

Рис. 4. Схема навчання нейронного контролера на основі конволюції і з використанням еталона кола збурення

Динаміка навчання нейронного контролера з врахуванням впливу збурень на об'єкт наведена на рис.5.

Як видно з рис. 6, нейронний контролер, синтез якого здійснено на основі оберненої конволюції еталона, забезпечує високу якість процесу керування. Значення середньої квадратичної похибки при моделюванні системи становить  $2,93 \cdot 10^{-3}$ , що вказує на високу ефективність вказаного методу.

Крім того, в порівнянні з іншими методами синтезу нейронних контролерів, метод синтезу контролера на основі оберненої конволюції еталона є найменш критичним до вибору навчальних послідовностей.

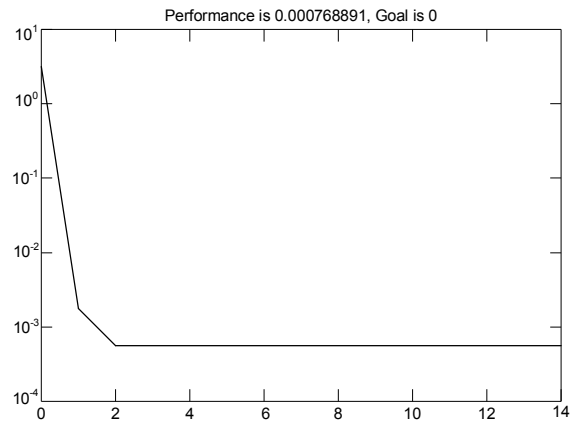


Рис. 5. Динаміка навчання нейронного контролера з врахуванням впливу збурень на об'єкт

Порівняння виходів еталона та об'єкта, керованого нейронним контролером, який синтезовано з врахуванням впливу збурень на об'єкт, наведено на рис.6.

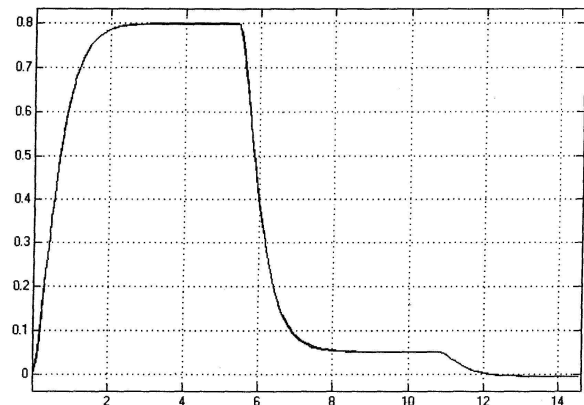


Рис. 6. Порівняння сигналів на виходах еталона і об'єкта, керованого синтезованим нейронним контролером

1. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федун. М.: Физмат лит, 2000. – С. 30-35.
2. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – С.25-37.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. – С. 51-57.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: Диалог-МИФИ, 2002. – С. 41-49.