

УДК 629.735.03:681.5.013(045)

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО РЕГУЛЯТОРА АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

С. В. Єнчев, канд. техн. наук, доц., А. М. Гашко

Національний авіаційний університет

aliona.gashko@yandex.ua

*Проведено аналіз способів побудови багаторежимних регуляторів для керування авіаційним двигуном, а також побудови їх аналогів на основі нейронних мереж. Розв'язано задачу синтезу структури нейромережевого регулятора авіаційного газотурбінного двигуна.*

**Ключові слова:** адаптивний регулятор, нейронна мережа, авіаційний газотурбінний двигун, алгоритм структурного синтезу, синтез регулятора.

*The analysis of methods construction multimode regulators is conducted for the aviation engine running, and also construction of their analogues on the basis of neurons networks. The task of synthesis of structure of neurons networks regulator of aviation turbo-engine decides.*

**Keywords:** adaptive regulator, neuron network, aviation turbo-engine, algorithm of structural synthesis, synthesis of regulator.

### Постановка проблеми

Швидкий розвиток авіаційної техніки нерозривно пов'язаний з досягненнями в багатьох галузях науки, в тому числі, з успіхами в області теорії і практики двигунобудування, а також систем автоматичного управління авіаційними двигунами.

Безупинно підвищуються вимоги до льотно-тактичних характеристик літальних апаратів (ЛА), ускладнення умов їх польоту викликають необхідність поліпшення характеристик газотурбінних двигунів (ГТД), у першу чергу, підвищення питомої й абсолютної тяги, зменшення питомої витрати палива, питомої маси і габаритів двигунів, забезпечення сталого функціонування ГТД у широкому діапазоні зміни робочих режимів. Відмінними ознаками сучасних ГТД є необхідність одночасного регулювання відразу декількох вихідних параметрів, широкий діапазон зміни динамічних характеристик, зміна якісного та кількісного складу підсистем управління в процесі функціонування, нелінійність і нестаціонарність характеристик двигуна.

### Аналіз досліджень і публікацій

З використанням нейронних мереж стало можливим проведення обчислень у сферах, що до цього відносилися лише до сфери людського інтелекту. З'явилися можливості створення систем, які здатні вчитися, запам'ятовувати та аналізувати інформацію, що дуже нагадує розумові здібності людини.

Типовими задачами, що можуть бути розв'язані за допомогою нейронних мереж та нейрокомп'ютерів є: класифікація, автоматизація прогнозування, автоматизація процесу ухвалення рішень, управління, кодування і декодування інформації, розпізнавання образів та ін.

Разом з тим, аналіз сучасної літератури, присвяченої нейронним мережам і нейромережевим системам управління, показує, що, незважаючи на активні розробки, які ведуться в цій галузі, дотепер не вирішено багато питань, пов'язаних з розробленням алгоритмів і методик ідентифікації нелінійних об'єктів на основі нейромережових моделей, синтезу структури та алгоритмів адаптації (навчання) параметрів нейромережових регуляторів, особливості їх реалізації в багаторежимних системах управління нелінійними динамічними об'єктами. Все вищесказане повною мірою належить і до такого складного в динамічному відношенні класу об'єктів управління, якими є ГТД різних схем.

### Цілі

Мета роботи — розроблення алгоритмів і методик нейромережевої ідентифікації характеристик ГТД та їх елементів, синтез і навчання багаторежимних нейромережових регуляторів ГТД, а також реалізації запропонованих нейромережових алгоритмів управління в реальному часі.

### Алгоритм структурного синтезу багаторежимного нейромережевого регулятора ГТД

Будемо вважати, що динаміка ГТД як об'єкта управління описується диференціальним рівнянням «вхід – вихід», заданим у неявному вигляді:

$$\varphi(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y; u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u) = 0, \quad (1)$$

де  $u = u(t)$  і  $y = y(t)$  — відповідно вхід і вихід досліджуваного об'єкта;  $m$  і  $n$  — максимальні порядки похідних  $u^{(i)}$ ,  $y^{(j)}$  для вхідної і вихідної змінних  $u(t)$  і  $y(t)$ , ( $m \leq n$ ).

На даному етапі передбачається, що об'єкт є одновимірним, повністю керованим і наглядним.

Потрібно побудувати такий регулятор (у класі нейромережових структур), який забезпечував би управління об'єктом (1) при дотриманні таких вимог до синтезованої САУ:

- астатизм (нульова статична помилка);
- фізична реалізація регулятора;
- стійкість і задана якість процесів управління на фіксованій безлічі  $M = \{M_1, \dots, M_R\}$  режимів об'єктів управління (ОУ);
- мінімальна складність регулятора.

Зупинимося докладніше на цих вимогах.

*Астатизм.* Дана вимога забезпечується звичай шляхом включення інтегруючої ланки (інтегратора) до складу системи управління.

Прийmemo в якості базового варіанта побудови САУ послідовну схему управління об'єктом

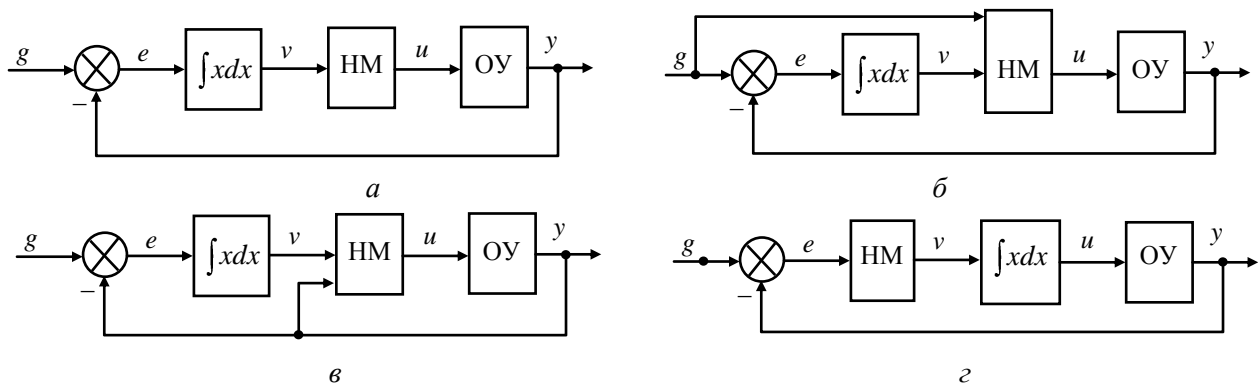


Рис. 1. Включення інтегратора до складу системи управління

Зауважимо, що інтегратор на рис.1,  $г$  описується тими самими рівняннями, з тією лише відмінністю, що змінні  $u$  і  $v$  у (2) - (3) замінюються відповідно на  $i$  і  $v$ . Інше зауваження до схеми на рис. 1,  $г$  — нелінійна функція, реалізована НМ, повинна задовольняти умову:  $v = 0$  при  $e = 0$ , що забезпечує нульовий сигнал на вході інтегратора при рівності нулю статичної помилки САУ.

*Фізична реалізація.* Будемо вважати, що як НМ на рис. 1,  $а-г$  у загальному випадку береться динамічна (рекурентна) нейронна мережа на базі перцептрона, структура якого зображена на рис. 2 (зауваження щодо позначень координат вхід – вихід НМ на рис. 1,  $г$  залишається в силі).

Досліджувана НМ включає в себе  $(p + q + 1)$  нейронів у вхідному шарі,  $\sigma$  нейронів у прихованому шарі і один нейрон у вихідному шарі, зв'язки між якими здійснюються за допомогою настроюваних (навчальних) вагів  $W_{\alpha\beta}$ ,

$$W_{\beta}(\alpha = 1, 2, \dots, p + q + 1; \beta = 1, 2, \dots, \sigma).$$

Динаміка даної мережі описується різницеvim рівнянням:

$$u[k] = F(u[k-1], \dots, u[k-q], v[k], \dots, v[k-p]), \quad (4)$$

де  $F(\cdot)$  — нелінійна функція щодо зазначених  $(p+q+1)$  аргументів

(рис. 1). Тоді можливі варіанти включення інтегратора в САУ відповідають рис. 1,  $а-г$ .

Найбільш простий варіант побудови інтегратора, що реалізує операцію чисельного інтегрування в дискретному часі  $k = 1, 2, \dots$ , описується різницеvim рівнянням:

$$v[k] = v[k-1] + T_0 \cdot e[k-1], \quad (2)$$

або дискретною передавальною функцією

$$W_{ИИТ}(z) = \frac{V(z)}{E(z)} = \frac{T_0}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

де  $z^{-1} = e^{-sT_0}$  — оператор часового зсуву;  $s$  — змінна перетворення Лапласа;  $T_0$  — період дискретизації в часі.

$$u[k-1], \dots, u[k-q], v[k], \dots, v[k-p].$$

Конкретний вид функції  $F(\cdot)$  залежить як від числа нейронів у вхідному і прихованому шарі, обраних активаційних функцій нейронів, так і від значень вагів синаптичних зв'язків  $W_{\alpha\beta}, W_{\beta}$  між шарами НМ.

Як видно з рис. 2, побудова такої НМ не пов'язана з необхідністю використання майбутніх (тобто тих, які ще не з'явилися) значень вхідного сигналу  $v[k]$ , що гарантує фізичну реалізованість регулятора.

### Синтез адаптивного нейромережового регулятора ГТД

Вважатимемо, як і раніше, що динаміка ГТД як об'єкта управління описується диференціальним рівнянням «вхід – вихід», заданим у неявному вигляді (1).

Потрібно побудувати адаптивний регулятор у класі нейромережових структур, який забезпечував би стабілізацію режимів роботи одновимірного об'єкта (1) при дотриманні вимог до синтезованої САУ ГТД з можливістю автоматичного (*on-line*) налаштування параметрів регулятора у разі зміни параметрів (або режимів роботи) об'єкта.

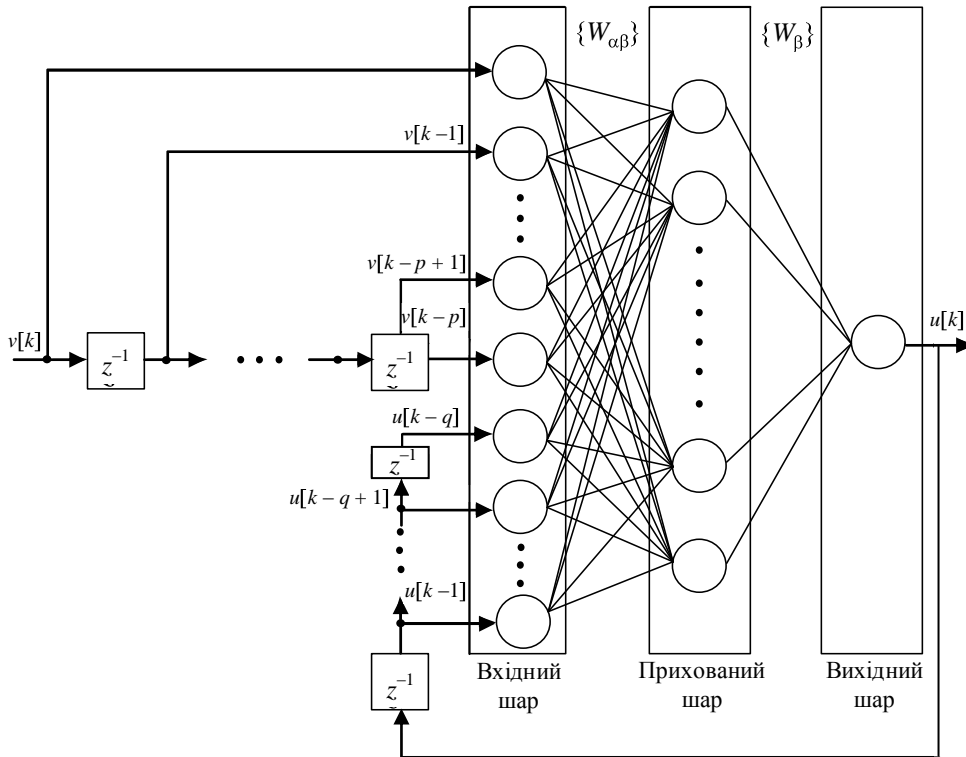


Рис. 2. Динамічна нейронна мережа на базі перцептрона

Найбільш очевидний варіант побудови такої системи ґрунтується на використанні НМ як пристрою адаптації параметрів лінійного ПІ-регулятора (рис. 3, а).

Метою алгоритму навчання тут є формування таких коефіцієнтів підсилення  $K_1$  і  $K_2$  регулятора, при яких досягається наближення виходу об'єкта до виходу еталонної моделі

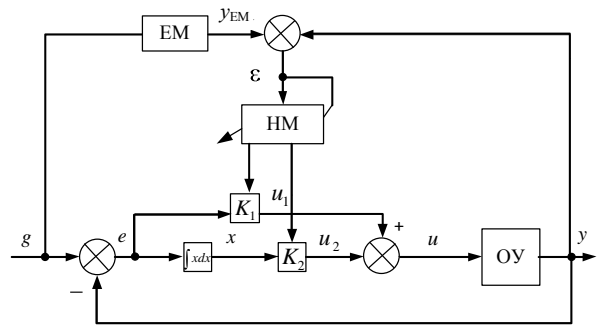
$$EM \ni y(t) \rightarrow y_{EM}(t).$$

Недолік даної схеми — обмеженість її застосування при високих порядках диференціального рівняння (1), тобто неможливість отримання в цьому випадку заданих показників якості шляхом впливу тільки на 2 параметри системи  $K_1$  і  $K_2$ .

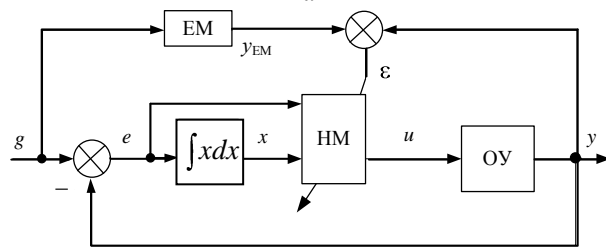
Наведена на рис. 3, б схема має більші можливості, оскільки НМ тут виконує не тільки функції обчислення коефіцієнтів підсилення за сигналом помилки  $e$  та інтегралу від сигналу помилки  $x$ , але й формування інверсної моделі об'єкта.

Слід зауважити, що для вирішення останнього завдання необхідно вибирати структуру НМ у класі динамічних нейронних мереж, причому складність цієї структури повинна співвідноситися зі складністю ОУ.

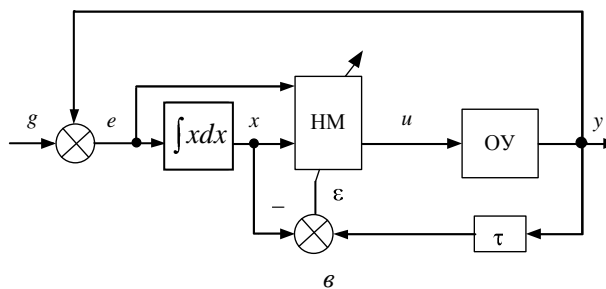
Мета навчання НМ — та сама: забезпечити близькість (в ідеалі, збіг) перехідних процесів  $y(t)$  і  $y_{EM}(t)$ .



а



б



в

Рис. 3. Варіанти побудови адаптивних регуляторів

Ще один перспективний варіант побудови адаптивної системи показано на рис. 3, в. На відміну від схем на рис. 3, а–б, еталонна модель системи тут наведена лише в неявному вигляді і задається за допомогою коефіцієнта зворотного зв'язку. Дійсно, зменшуючи помилку навчання НМ до нуля, можна виконати умову:

$$\varepsilon(t) = \tau y(t) - \int e(t) dt \rightarrow 0. \quad (5)$$

Аналогічна умова виконується і для похідної:  $\varepsilon(t) = \tau y(t) - e(t) \rightarrow 0$ , звідки, враховуючи вираз для сигналу помилки  $e(t) = g(t) - y(t)$ , отримуємо остаточно:

$$\tau y(t) + y(t) = g(t). \quad (6)$$

Таким чином, величина коефіцієнта  $\tau$  визначає бажаний час регулювання  $t_{\text{дв}} = (3...4)\tau$  при обробці східчастого впливу  $\Delta g(t)$ , що задається.

### Висновки

У ході виконання роботи було проведено аналіз можливих схем включення НМ у САУ, в результаті якого виявлено переваги та недоліки основних способів побудови систем управління ГТД з нейромережевими регуляторами.

Розроблено алгоритм структурного синтезу багаторежимного НМ-регулятора ГТД на основі принципу мінімальної складності з урахуванням вимог до астатизму, фізичної реалізованості, стійкості та якості перехідних процесів у замкненій САУ ГТД. Запропоновано узагальнення алгоритму структурного синтезу багаторежимних НМ-регуляторів на випадок багатовимірної системи управління ГТД. Показано, що застосування даного алгоритму дає змогу обґрунтовано вибрати клас одновимірних та багатовимірних структур НМ-регуляторів мінімальної складності (включаючи число шарів НМ, кількість нейронів і зв'язків між ними), які адекватні щодо розв'язуваної задачі і функціонуючих спільно з лінійними регуляторами ГТД.

Проведено порівняння синтезованих багаторежимних регуляторів на базі традиційного ПІ-алгоритму управління і в рамках нейромережевого підходу.

Результати синтезу та моделювання САУ з багаторежимними НМ-регуляторами ГТД показали ефективність застосування НМ у завданнях управління авіаційними двигунами, тому що

синтезовані нелінійні регулятори на основі НМ прості, легко навчаються і забезпечують необхідні показники якості на заданій безлічі усталених режимів роботи ГТД.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Бодянский Е. В. Адаптивный нейрорегулятор для нелинейного динамического объекта // Известия РАН. Теория и системы управления / Е. В. Бодянский, О. В. Запорожец. — № 2. — 2002. — С. 92–96.
2. Ефанов В. Н. Пути повышения эффективности применения летательных аппаратов на базе быстросчетных моделей и средств искусственного интеллекта // Мир авионики / В. Н. Ефанов, С. Д. Бодунов. — № 2. — 2002. — С. 33–36.
3. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления : учебник / под ред. Н. Д. Егупова. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 744 с.
4. Многорежимные и нестационарные системы автоматического управления / Б. Н. Петров, А. Д. Александров, В. П. Андреев [и др.]; под ред. акад. Б. Н. Петрова. — М. : Машиностроение, 1978. — 240 с.
5. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А. А. Шевяков, Т. С. Мартыанова, В. Е. Рутковский, Б. Г. Ильясов [и др.]; под общей ред. А. А. Шевякова и Т. С. Мартыановой. — М. : Машиностроение, 1989. — 256 с.
6. Солодовников В. В. Принцип сложности в теории управления (о проектировании технически оптимальных систем и проблеме корректности) / В. В. Солодовников, В. Ф. Бирюков, В. И. Тумаркин. — М. : Наука, 1977. — 344 с.
7. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. Кн. 8 : учеб. пособие для вузов; под. общей ред. А. И. Галушкина. — М. : ИПРЖР, 2002. — 480 с.
8. Гашко А. М. Характеристика авіаційного газотурбінного двигуна як багаторежимного об'єкта управління / Збірник тез доповідей студентів та молодих учених «Наукоємні технології – 2011». — К. : НАУ, 2011. — 1 с.
9. Гашко А. М. Інтелектуальні методи ідентифікації математичних моделей авіаційних газотурбінних двигунів / Збірник тез доповідей студентів та молодих учених «Політ–2012». — К. : НАУ, 2012. — 1 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.2012.