

УДК 519.6:621.458.3 (045)

В. В. ПАНІН¹, С. В. ЄНЧЕВ², С. О. ТАКУ²¹ Київська державна академія водного транспорту ім. П. Конашевича-Сагайдачного² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ГІДРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМИ ДВИГУНАМИ

Розвиток теорії управління характеризується все більшою увагою до питань побудови моделі об'єкта управління за даними «вхід-вихід», отриманими в умовах функціонування об'єкта. Це пояснюється тим, що для складних об'єктів апріорна інформація про закономірності їх функціонування завжди є неповною і створення системи управління пов'язано з низкою теоретичних і практичних труднощів. Тому необхідно попереднє вивчення об'єкта, отримання його математичного опису за даними «вхід-вихід», яке і становить зміст теорії ідентифікації, спрямованої на розробку методів і засобів отримання моделі об'єкта управління.

Ключові слова: гідромеханічна система, автоматичне керування, газотурбінний двигун, нейронна мережа, нейромережевий регулятор.

Вступ

В даний час сучасний авіаційний газотурбінний двигун (ГТД) і системи керування ним представляють собою складну динамічну систему. Коректність і безпека функціонування такого об'єкта вимагають постійного і безперервного аналізу його параметрів. Класифікація і розпізнавання класу станів динамічного об'єкта необхідні для узгодження стратегії оптимального управління зі станом об'єкта. Ефективність контролю стану авіаційного двигуна істотно залежить від імовірності правильного розпізнавання технічного стану двигуна та його елементів, яка безпосередньо впливає на якість систем управління ГТД, що в кінцевому підсумку визначає економічність і безпеку польотів.

1. Постановка проблеми

На сьогодні активно використовується підхід до ідентифікації складних динамічних об'єктів, що базується на використанні нейромережевих моделей (НМ-моделей) [1-4]. Такі властивості нейронної мережі, як нелінійність, можливість апроксимації довільних функцій з будь-яким ступенем точності, здібність до навчання і самонавчання, паралельна організація, можливість апаратної реалізації, у тому числі й на основі спеціалізованих нейропроцесорів, дозволяють використовувати їх для побудови НМ-моделей газотурбінних двигунів (ГТД) [5-7].

Загальна ідея алгоритму ідентифікації ГТД та його елементів на основі нейронних мереж базується на представленні моделі ГТД у вигляді «чорного

ящика» за допомогою НМ із заданою структурою і з великим числом коефіцієнтів, що настроюються (вагів синаптичних зв'язків).

На рис. 1 приведено узагальнену структурну схему процесу настройки параметрів (процедури навчання) НМ - моделі ГТД, де $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ - вектор вхідних дій, $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ - вектор вихідних параметрів ГТД, $Y^{HM} = (y_1^{HM}, y_2^{HM}, \dots, y_n^{HM})^T$ - вектор виходів НМ. Перетворення вхідного вектора ГТД у вихідний описується оператором

$$Y = F^{ГТД}(X).$$

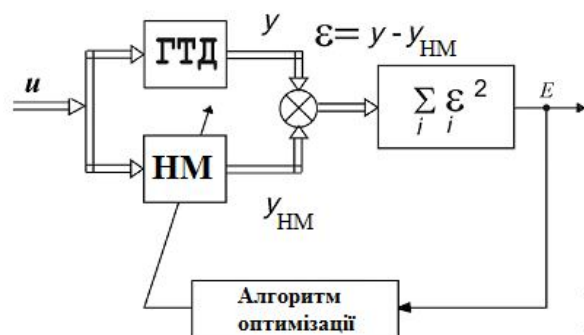


Рис. 1. Схема рішення задачі ідентифікації

Завдання ідентифікації ГТД за допомогою НМ може бути сформульоване таким чином. На основі безлічі векторів X і Y , отриманих експериментальним шляхом для реального ГТД, необхідно вказати оператора F^{HM} , в класі нейромережевої архітекту-

ри, який найкращим чином представляв би (апроксимував) оператора $F^{ГТД}$.

Апроксимація оператора $F^{ГТД}$ оператором $F^{НМ}$ може вважатися якнайкращою, якщо деякий функціонал від різниці $(Y - Y^{НМ})$ прагне до мінімуму. Процес навчання мережі зводиться до мінімізації даного функціоналу: $E = \|Y^{ГТД} - Y^{НМ}\| \rightarrow \min$.

2. Методика ідентифікації ГТД та його елементів на основі нейронних мереж

Ідентифікація ГТД за допомогою нейронних мереж (НМ) полягає в побудові оптимальної нейромережевої моделі по результатам спостережень над вхідними та вихідними змінними ГТД [1].

Схема рішення задачі ідентифікації приймає наступний вигляд (рис. 1). Порівнюються вектор виходів об'єкту y і вектор виходів НМ $u_{НМ}$ при одному і тому ж векторі вхідних впливів u . Процедура навчання НМ полягає в зміні ваги її зв'язків таким чином, щоб зменшити суму квадратів нев'язок до прийнятної (досить малої) величини:

$$E = \sum_{ij} \epsilon_i^2 < E_{\text{доп.}}$$

де $E_i = y_i - u_{НМ}$ нев'язка на i -му кроці; $E_{\text{доп.}}$ – допустима величина помилки навчання.

У загальному випадку, реалізація алгоритму ідентифікації ГТД та її елементів з допомогою нейромережевих структур складається з наступних етапів:

1. Постановка завдання ідентифікації.

На даному етапі визначаються ідентифіковані параметри ГТД (змінні «вхід-вихід»), вид моделі (динамічна або статична), точність НМ-моделі, вибір частоти дискретизації, спосіб реалізації (апаратний, програмний).

2. Планування (проведення) експерименту.

Основне завдання даного етапу - отримання безлічі даних про функціонування ГТД, необхідних для подальшої параметричної оптимізації обраної НМ-моделі. Достовірність та інформативність вхідних і вихідних даних визначає якість моделі.

3. Попередня обробка даних.

Попередня підготовка даних є ефективним засобом отримання адекватної моделі ГТД [5]. Існує кілька різних способів попередньої обробки експериментальних даних з метою отримання найбільш значимої інформації. До них відносяться фільтрація, видалення надлишкових даних і викидів сигналів. Це в кінцевому підсумку, забезпечує складання

навчальної та тестової вибірки НМ-моделі.

Перші три етапи характерні для всіх способів ідентифікації і добре описані, тому в роботі не розглядалися.

До попередньої обробки даних також необхідно віднести масштабування. Це пояснюється тим, що:

заввичай сигнали мають різну розмірність і сигнали з максимальною амплітудою стають домінуючими при побудові нейромережевої моделі;

масштабування позитивно позначається на обчислювальній здібності алгоритмів навчання НМ. Практика показує, що при використанні масштабованих даних виходять більш точні НМ-моделі.

4. Вибір структури моделі.

Залежно від наявності або відсутності фактора динаміки, вимоги до моделі ГТД пропонують використання двох підходів до вибору типу НМ. Статична НМ-моделі ГТД будується на основі багатошарової нейронної мережі без зворотних зв'язків; динамічна НМ-моделі ГТД на основі рекурентної багатошарової нейронної мережі. Використання багатошарових перцептронів в якості базису побудови НМ-моделі передбачає необхідність вирішення проблеми вибору внутрішньої структури НМ [10].

5. Оптимізація параметрів НМ-моделі.

Для реалізації процедури навчання НМ-моделей ГТД рекомендується використовувати комбінацію алгоритмів швидкого та зворотного поширення. При цьому коли навчання НМ починається за допомогою алгоритму Quick Propagation і закінчується із застосуванням алгоритму Back Propagation. Цим досягається необхідна точність процесу навчання, швидка збіжність до точки мінімуму цільової функції, до того ж, алгоритми прості в застосуванні. Так як функція мінімуму має в загальному випадку безліч локальних мінімумів, рекомендується повторювати процес навчання НМ 5-7 разів, змінюючи початкові значення вагових коефіцієнтів.

6. Прийняття рішення про адекватність моделі.

Підтвердження моделі великою мірою залежить від особливостей поставленої задачі та її передбачуваного практичного застосування. У загальному випадку бажано, щоб працездатність моделі підтверджувалася оцінкою середньої похибки навчання $\epsilon_{\text{зад}}$ як на контрольному так і на тестовому множині.

7. Реалізація НМ-моделі ГТД.

3. Побудова нейромережевої моделі

Для побудови НМ-моделі гідромеханічної системи автоматичного керування (ГМСАК) ГТД необхідно виконати її декомпозицію або за структурни-

ми, або функціональними ознаками. Основні функції, які виконують сучасні ГМСАК:

1. Регулювання подачі палива в основну камеру згоряння.
2. Регулювання подачі палива у форсажну камеру згоряння.
3. Управління механізацією авіадвигуна:
 - управління вхідними напрямними апаратами, напрямними апаратами компресора;
 - управління клапанами перепуску повітря;
 - управління напрямними апаратами турбіни;
 - регулювання площі горловини сопла;
 - регулювання площі перерізу сопла;
 - зміна вектора тяги;
 - реверс.

Структурна схема САК з гідромеханічним регулятором для турбореактивного двоконтурного двигуна з форсажною камерою (ТРДДФ), з елек-

тронним регулятором з повною відповідальністю FADEC, наведено на рис. 2.

Побудову нейромережевої моделі можна здійснювати для кожного структурного елементу ГМСАК або для каналу управління. Розглянемо канал регулювання подачі палива в основну камеру згоряння, вхідними величинами є: $\alpha_{ВКД}$ - кут встановлення ВКД (режим роботи); V - швидкість польоту (прилада); H - висота польоту; R - тяга ТРДДФ; φ - положення напрямних апаратів і клапанів перепуску повітря, вихідною – кількість робочого палива $G_{П}$, що подається до основної камери згоряння. Нейромережева модель наведена на рис. 3.

Топологія використовуваної у розрахунках НМ, наведено на рис. 4.

Наступним етапом розробки НМ є ідентифікація вагових коефіцієнтів НМ та їх оптимізація.

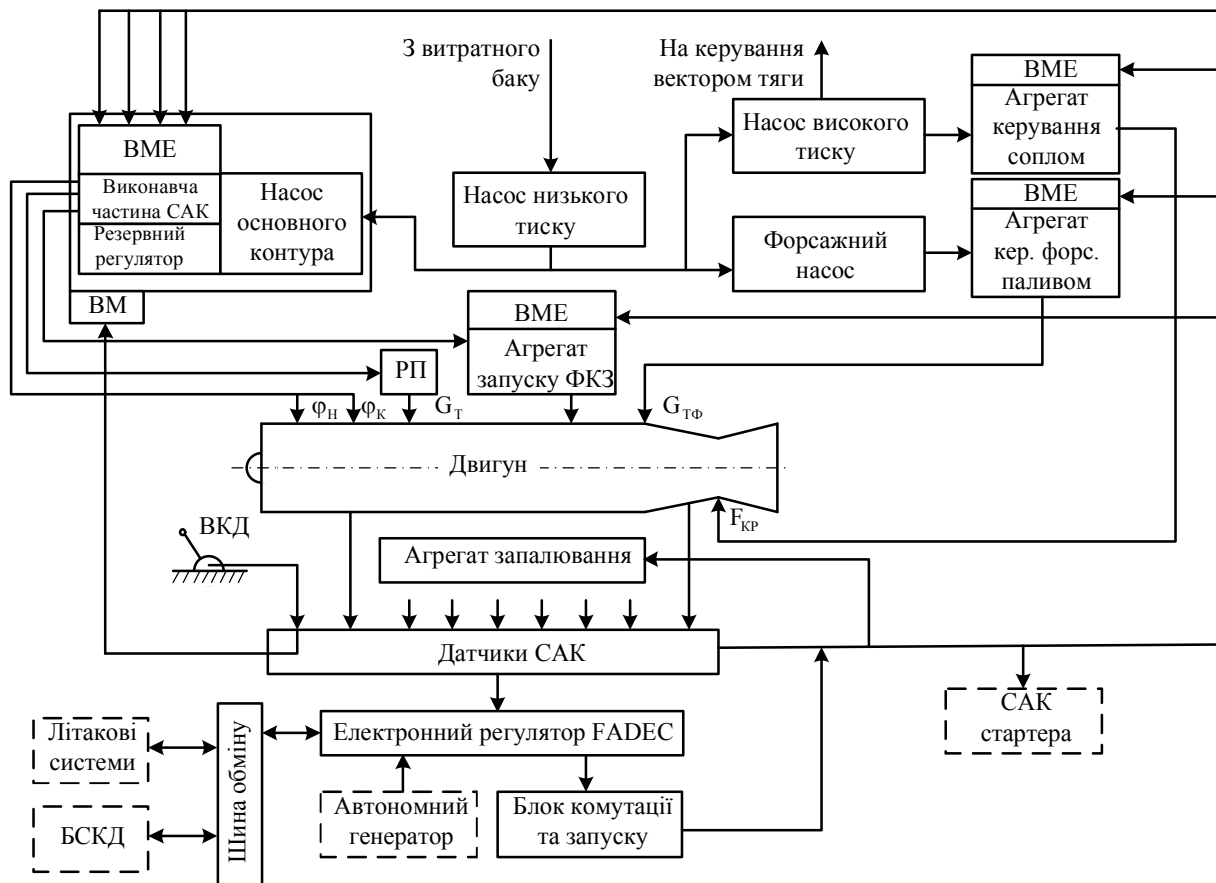


Рис. 2. Базова САК з гідромеханічним регулятором для ТРДДФ: ВКД – важіль керування двигуном; БСКД – бортова система контролю двигуна; ВМ - виконавчий механізм; ВМЕ - виконавчий механізм з електронним керуванням; РП – регулятор палива; ФКЗ – форсажна камера згоряння; φ_H - кут установки вхідних напрямних апаратів; φ_K - кут установки напрямних апаратів компресора; G_T - робоче паливо; G_{TF} - паливо до форсажної камери; F_{KP} - площа критичного перерізу сопла

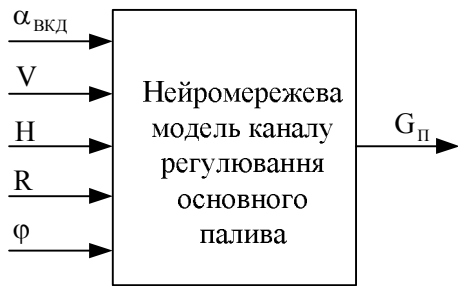


Рис. 3. Нейромережева модель каналу регулювання основного палива

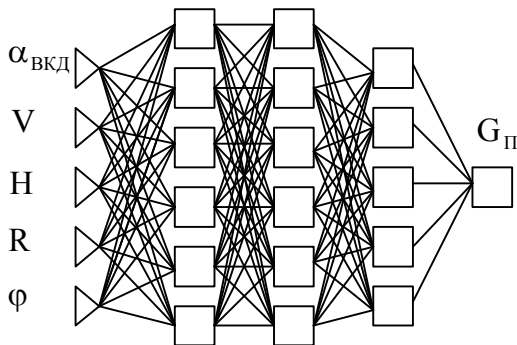


Рис. 4. Топології НМ

4. Алгоритм розв'язання задачі ідентифікації

Ідентифікація станів ГТД теоретично можлива в просторі станів, якщо використовувати змінні стану як параметри класифікації. Однак, доступними для спостереження є компоненти вектора, що включають адитивні випадкові шуми вимірювань. Отже, існує проблема визначення робочого набору ознак для побудови вирішальних правил, інваріантних до випадкових шумів спостережень. Іншою проблемою підвищення якості розпізнавання є підвищення точності визначення меж класів станів авіаційного двигуна. Ця проблема обумовлена тим, що вони істотно залежать від співвідношень між динамічними параметрами ГТД і спектральними характеристиками всіх видів впливу і збурень, які мають випадковий характер і, отже, є умовними.

Для поставлених вище вимог пропонується алгоритм розв'язання задачі класифікації режимів роботи ГТД на основі нейронних мереж.

Постановку задачі можна звести до наступного. Є часовий ряд, утворений наборами даних за результатами вимірювання термогазодинамічних параметрів двигуна $y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)$ на деякому інтервалі спостереження $t \subset (t_1, t_2)$. Потрібно виділити характерні ділянки часового ряду, що відповідають певним класам S_1, S_2, \dots, S_k станів авіаційного двигуна:

$$\bigcup_{\alpha=1}^k S_{\alpha} = S_0,$$

де S_0 - клас можливих режимів (справних станів) ГТД.

Процедура вирішення даної задачі за допомогою нейронної мережі показана на рис. 5. Тут $F(t)$ – вектор бажаних вихідних реакцій НМ: $F(t) = \{F_1(t), F_2(t), \dots, F_M(t)\}$; ξ_1, \dots, ξ_M - виходи НМ; $E_1(t), \dots, E_M(t)$ - значення вектора похибки на виході НМ. Навчання НМ зводиться до наступного. На входи НМ подаються "відрізки" часового ряду

$$y_1(t), \dots, y_N(t), t \subset (t_i, t_{i+1}),$$

що належать завідомо відомим класам (режимам роботи) двигуна $S_{\alpha}, (\alpha = 1, 2, \dots, k)$ [2]. Бажаними реакціями НМ в кожному випадку буде значення, рівне одиниці, на одному з виходів нейронної мережі, що відповідає розпізаному режиму. Наприклад, класу сталих режимів ГТД відповідає вихід 1, класу перехідних режимів - вихід номер 2, класу несталих режимів - вихід номер 3.

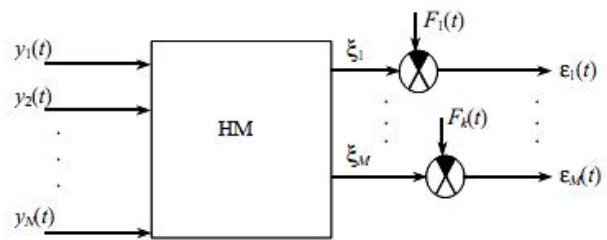


Рис. 5. Схема нейромережевого класифікатора авіаційного двигуна

Похибка навчання НМ визначається таким чином:

$$E = \varepsilon_i^2(t) \rightarrow \min.$$

Мінімуму похибки відповідає навчена мережа, яка вирішує задачу розпізнавання (ідентифікації) режимів роботи ГТД і його елементів.

Висновки

Застосування нейронних мереж дозволяє побудувати ефективний алгоритм ідентифікації ГТД та їх елементів на основі великих масивів експериментальних даних. Вибір структури і параметрів нейромережевої моделі при цьому має проводитися на основі принципу декомпозиції моделі, що призводить до модульної організації НМ та підвищення якості її навчання з урахуванням заданих вимог до точності ідентифікації.

Література

1. Амосов, О. С. Интеллектуальные информационные системы. Нейронные сети и нечеткие системы [Текст] : учеб. пос. / О. С. Амосов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2005. – 106 с.
2. Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy and Adaptive Approaches [Text] / Ed.: David A. Write, Donald A. Sofge. – N.Y. : Van Nostrand Reinhold, 1992. – 558 p.
3. Бодянский, Я. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения [Текст] / Я. В. Бодянский. – Харьков : ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 369 с.
4. Панін, В. В. Ідентифікація авіаційного ГТД і його елементів на основі нейронних мереж [Текст] / В. В. Панін, С. В. Єнчев, С. О. Таку // *Авіаційно-*

космічна техніка і технологія. – 2012. – № 8(95). – С. 227-231.

5. Галушкин, А. И. Теория нейронных сетей. [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. И. Галушкин. – М. : ИПРЖР, 2000. – 416 с.

6. Кусимов, С. Т. Управление динамическими системами в условиях неопределенности [Текст] / С. Т. Кусимов, Б. Г. Ильясов, В. И. Васильев. – М. : Наука, 1998. – 452 с.

7. Панін, В. В. Формування структури інтелектуальної системи автоматичного керування авіаційним ГТД [Текст] / В. В. Панін, С. В. Єнчев, С. О. Таку // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2013. – № 7(104). – С. 181-185.

Надійшла до редакції 3.06.2014, розглянута на редколегії 16.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, професор, декан механіко-енергетичного факультету О. В. Самков, Національний авіаційний університет, Київ.

ФОРМИРОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

В. В. Панин, С. В. Енчев, С. О. Таку

Развитие теории управления характеризуется все большим вниманием к вопросам построения модели объекта управления по данным «вход-выход», полученным в условиях функционирования объекта. Это объясняется тем, что для сложных объектов априорная информация о закономерностях их функционирования всегда является неполной и создание системы управления связано с рядом теоретических и практических трудностей. Поэтому необходимо предварительное изучение объекта, получение его математического описания по данным «вход—выход», которое и составляет содержание теории идентификации, направленной на разработку методов и средств получения модели объекта управления.

Ключевые слова: гидромеханическая система, автоматическое управление, газотурбинный двигатель, нейронная сеть, нейросетевой регулятор.

FORMING OF NEURON-NETWORK MODEL OF HYDRAULIC-MECHANICAL AUTOMATIC CONTROL AVIATION ENGINES SYSTEM

V. V. Panin, S. V. Enchev, S. O. Taku

The development of management theory is characterized by increasing attention to the issues of constructing a model of control object according to the "input-output" obtained in the operation of the object. This is explained by the fact that for complex objects a priori information about the patterns of their operation is always incomplete, and the creation of the control system associated with a number of theoretical and practical difficulties. Therefore it is necessary a preliminary study of the object, getting his mathematical description of the data "input-output", which is the content of the theory of identification, aimed at developing methods and means of obtaining a model of control object.

Key words: hydraulic-mechanical system, automatic control, gas-turbine engine, neuron network, neuron-network regulator.

Панін Владислав Вадимович – д-р техн. наук, професор, ректор, Київська державна академія водного транспорту ім. гетьмана П. Сагайдачного, Київ, Україна, e-mail: academy@maritime.kiev.ua.

Єнчев Сергій Васильович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту, Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: esw@ukr.net.

Таку Сергій Олегович – аспірант кафедри автоматизації та енергоменеджменту, Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: Taku_777@ukr.net.