

УДК 519.6:621.458.3 (045)

В.В. ПАНІН¹, С.В. ЄНЧЕВ², С.О. ТАКУ²¹Київська державна академія водного транспорту імені гетьмана П.К. Сагайдачного, Київ, Україна²Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ АВІАЦІЙНОГО ГТД І ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

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: ідентифікація, класифікація, нейронні мережі, газотурбінний двигун, система керування.

Вступ

В даний час сучасний авіаційний газотурбінний двигун (ГТД) і системи управління ним представляють собою складну динамічну систему. Коректність і безпека функціонування такого об'єкту 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

Створення авіаційних газотурбінних двигунів 5-6 покоління тягне за собою ускладнення конструкції об'єкта та збільшення числа контрольованих параметрів, аналіз яких людиною - оператором пов'язаний з численними помилками контролю та прийняття рішень.

Дослідження в галузі створення автоматизованих систем контролю та керування авіаційними ГТД показують недостатню обґрунтованість застосування систем, заснованих тільки на одному з відомих методів діагностування, оскільки жоден з методів не є універсальним і абсолютно надійним [4]. Природно, що подібні системи контролю та керування, по-

будовані на основі одного класифікатора, не зможуть повною мірою задовольнити зростаючі вимоги до діагностування двигунів. Існує декілька напрямів, які визначають підвищення ефективності бортових технологій контролю стану ГТД. Основним напрямом слід вважати інтелектуалізацію процесів обробки інформації із залученням нейромережевих методів, які здатні забезпечити підвищення якості бортових алгоритмів контролю та керування ГТД.

Нейронні мережі від класичних методів відрізняє швидкодія, універсальність, гнучкість у застосуванні, а також здатність до узагальнення інформації, висока протидія до зовнішніх збурень і здатність до прогнозування. При цьому актуальною проблемою на сьогоднішній день є комплексне керування ГТД на базі моделей нейронних мереж з прогнозом поточних ситуацій.

2. Задачі ідентифікації ГТД і його елементів

Під ідентифікацією в широкому сенсі розуміється отримання або уточнення за експериментальними даними моделі реального об'єкта, вираженої в тих чи інших термінах.

Ідентифікація - один з розділів машинного навчання, присвячений вирішенню наступного завдання. Є множина об'єктів (ситуацій), розділених деяким чином на класи. Задано кінцеву множину об'єктів, для яких відомо, до яких класів вони відносяться. Ця множина називається навчальною вибіркою. Класова приналежність інших об'єктів не відо-

ма. Потрібно побудувати алгоритм, здатний класифікувати довільний об'єкт з вихідної множини.

Класифікувати об'єкт – значить, вказати номер (або найменування класу), до якого відноситься даний об'єкт.

Класифікація об'єкта – номер або найменування класу, що видається алгоритмом класифікації в результаті його застосування до даного конкретного об'єкту.

У машинному навчанні завдання класифікації відноситься до розділу навчання з учителем. Існує також навчання без вчителя, коли поділ об'єктів навчальної вибірки на класи не задається, і потрібно класифікувати об'єкти тільки на основі їх подібності один з одним. У цьому випадку прийнято говорити про завдання кластеризації або таксономії, і класи називати, відповідно, кластерами або таксонами.

В загальному вигляді методи ідентифікації об'єктів можна розділити на дві групи - методи параметричної ідентифікації (визначення параметрів моделі) і методи непараметричної ідентифікації (оцінка частотних характеристик, перехідних характеристик тощо). Ключовою проблемою параметричної ідентифікації залишається завдання вибору структури моделі. Стосовно до ГТД це завдання вирішується шляхом спрощення та лінеаризації побудованих теоретично повних газодинамічних моделей. Оцінка або уточнення параметрів моделі при відомій її структурі є значно менш складним завданням і вирішується за допомогою різних оптимізаційних процедур - від різних модифікацій методу найменших квадратів до використання генетичних алгоритмів (еволюційне програмування). Останні в даний час широко використовуються і для визначення структури моделі.

Непараметрична ідентифікація в останні роки переживає друге народження в зв'язку з появою великої кількості ефективних засобів, таких як нейронні мережі [9], хвильові функції, алгоритми нечіткої логіки [2], що дозволяють виробляти ідентифікацію систем за принципом "чорного ящика". Застосування цих підходів не вимагає великої кількості апріорних знань про структуру досліджуваного об'єкта і дає хороші результати, зокрема, при ідентифікації нелінійних систем.

3. Нейронні мережі. Їх структура та математична модель

Під нейронними мережами маються на увазі обчислювальні структури, що моделюють прості біологічні процеси, зазвичай асоційовані з процесами людського мозку. Вони являють собою розподілені і паралельні системи, здатні до адаптивного навчання шляхом аналізу позитивних і негативних

впливів.

Нейрон є складовою частиною нейронної мережі. На рис. 1 представлена його структура. Він складається з елементів трьох типів: помножувачів (синапсів), суматора і нелінійного перетворювача. Синапси здійснюють зв'язок між нейронами, множать вхідний сигнал на число, що характеризує силу зв'язку, (вагу синапса).

Суматор виконує додавання сигналів, що надходять по синаптичним зв'язках від інших нейронів і зовнішніх вхідних сигналів. Нелінійний перетворювач реалізує нелінійну функцію одного аргументу – виходу суматора. Ця функція називається функцією активації чи передатною функцією нейрона.

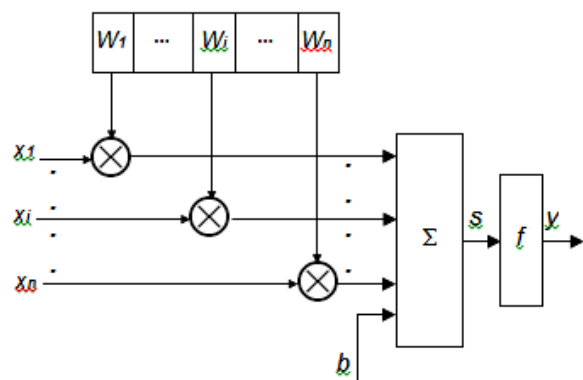


Рис. 1. Структура штучного нейрона

Математична модель штучного нейрона є наступною:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b,$$

$$y = f(s),$$

де w_i – вага (weight) синапса, $i = 1 \dots n$; b - значення зсуву (bias); s – результат сумування (sum); x_i - компонент вхідного вектора (вхідний сигнал), $i = 1 \dots n$; y - вихідний сигнал нейрона; n - число входів нейрона; f - нелінійне перетворення (функція активації).

У загальному випадку вхідний сигнал, вагові коефіцієнти і зсув можуть приймати дійсні значення, а в багатьох практичних задачах - лише деякі фіксовані значення. Вихід y визначається видом функції активації і може бути як дійсним, так і цілим.

4. Методика ідентифікації ГТД 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. 2). Порівнюються вектор

виходів об'єкту y і вектор виходів НМ $y_{\text{НМ}}$ 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:

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

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

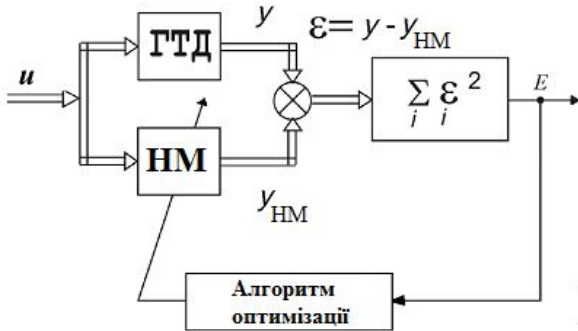


Рис. 2. Схема рішення задачі ідентифікації

У загальному випадку, реалізація алгоритму ідентифікації ГТД та її елементів з допомогою нейромережових 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:

зазвичай сигнали мають різну розмірність і сигнали з максимальною амплітудою стають домінуючими при побудові нейромережової 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-моделю ГТД будується на основі багатошарової нейронної мережі без зворотних зв'язків; динамічна НМ-моделю ГТД на основі рекурентної багатошарової нейронної мережі. Використання багатошарових персептронів 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 помилки навчання $\varepsilon_{\text{зад}}$ як на контрольному так і на тестовому множині.

7. Реалізація НМ-моделі ГТД.

В залежності від вимог до моделі ГТД можлива апаратна і програмна реалізація НМ-моделі [8].

5. Алгоритм розв'язання задачі ідентифікації

Ідентифікація станів ГТД теоретично можлива в просторі станів, якщо використовувати змінні стани як параметри класифікації. Однак, доступними для спостереження є компоненти вектора, що вклю-

чають 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.

В даний час процес класифікації режимів роботи ГТД, як правило, здійснюється вручну, за участю висококваліфікованого фахівця, тривала і монотонна робота якого, з одного боку, може привести до помилок класифікації, а з іншого боку, до значних часових витрат.

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 $t \in (t_1, t_2)$. 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. 3.

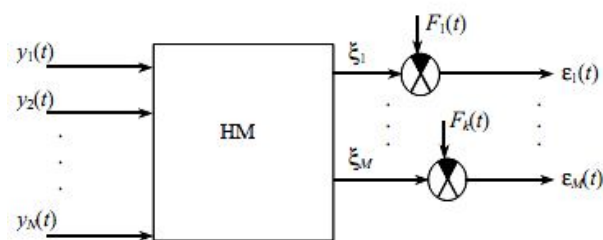


Рис. 3. Схема нейромережевого класифікатора авіаційного двигуна

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

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

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

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. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.Г. Августиневич, и др.; под ред. Дедеша В.Т. – М.: Машиностроение, 1984. – 200 с.
2. Нейроматематика [Текст] / Д.А. Агеев, А.Н. Балухто и др.; кн. 6: учеб. пособие для вузов; общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 448 с.
3. Жернаков, С.В. Архитектура вычислителя для решения задачи восстановления потерянных данных с датчиков на базе нейронной сети [Текст] / С.В. Жернаков, И.И. Муслухов // Нейроинформатика-2006: сб. науч. тр. VIII Всероссийской НТК. – М.: МИФИ, 2006. – Ч. 3. – С. 180 – 188.
4. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики [Текст] / Б.В. Боев, В.В. Бугровский и др. – М.: Наука, 1998. – 168 с.
5. Жернаков, С.В. Бортовая интеллектуальная система контроля и диагностики авиационного ГТД в режиме реального времени [Текст] / С.В. Жернаков, И.И. Муслухов // Актуальные проблемы в науке и технике: сб. матер. региональной школы-семинара аспирантов и молодых ученых. – Уфа:

Ізд-во Уфимс. гос. авиац. техн. ун-та, 2007. – Т. 2. – С. 108–112.

6. *Современные проблемы нейроинформатики [Текст] / А.Н. Васильев, О.Н. Граничин и др.; кн. 23. ч. 2. Коллективная монография; под ред. Ю.И. Нечаева. – М.: Радиотехника, 2006. – 80 с.*

7. *Васильев, В.И. Экспертные системы: Управление эксплуатацией сложных технических объектов [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.И. Васильев, С.В. Жернаков. – Уфа: УГАТУ.- Б.и., 2003. – 106 с*

8. *Применение нейросетевых моделей реально-го времени в системах управления ГТД [Текст] / В.И. Васильев, С.С. Валеев и др. // Нейроинформа-*

тика-2000: тр. 2-й Всероссийской НТК. – М.: МИ-ФИ, 2000. – Ч.1. – С. 236–242.

9. *Головко, В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение [Текст] / В.А. Головко; кн. 4: учеб. пособие для вузов; общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.*

10. *Клейман, Е.Г. Идентификация нестационарных объектов [Текст] / Е.Г. Клейман, И.А. Мочалов // Автоматика и телемеханика. - 1994. - № 2. - С. 3–22.*

11. *Клейман, Е.Г. Идентификация нестационарных объектов [Текст] / Е.Г. Клейман // Автоматика и телемеханика. - 1999. - № 10. - С. 3–45.*

Поступила в редакцию 01.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан механіко-енергетичного факультету А.В. Самков, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АВИАЦИОННОГО ГТД И ЕГО ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

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: идентификация, классификация, нейронные сети, газотурбинный двигатель, система управления.

IDENTIFICATION OF AIRCRAFT GTE AND ITS COMPONENTS BASED ON NEURAL NETWORKS

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: identification, classification, neural networks, a gas turbine engine, the control system.

Панін Владислав Вадимович – д-р техн. наук, професор, ректор Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана П.К. Сагайдачного, Київ, Україна, e-mail: reception@maritime.kiev.ua.

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

Таку Сергій Олегович – аспірант кафедри автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: taku_777@ukr.net.