

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРНЫХ РЕШЕТОК ПУТЕМ ОБОБЩЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Исследована возможность применения искусственных нейронных сетей для решения задачи определения аэродинамических характеристик компрессорных решеток на основе набора данных продувок плоских решеток. Разработана соответствующая методика проектирования искусственной нейронной сети для определения аэродинамических характеристик решетки. Применяемый метод проектирования основан на модифицированной модели классического генетического алгоритма с обучением сети методом обратного распространения ошибки. Выполнена верификация разработанной методики с использованием имеющихся экспериментальных данных.

Досліджено можливість застосування штучних нейронних мереж для розв'язання задачі визначення аеродинамічних характеристик компресорних решіток на основі набору даних продувок плоских решіток. Розроблено відповідну методику проектування штучної нейронної мережі для визначення аеродинамічних характеристик решітки. Метод проектування, що застосовується, оснований на модифікованій моделі класичного генетичного алгоритму з навчанням мережі методом зворотного розповсюдження похибки. Виконано верифікацію розробленої методики з використанням наявних експериментальних даних.

The possibility of artificial neural networks application for the solution of the problem of compressor cascade aerodynamic characteristics prediction on the basis of the data set of two-dimensional cascades blowdown is considered. The appropriate technique of an artificial neural network design is developed for the cascade aerodynamic characteristics prediction. The applied design method is based on a modified model of a classical genetic algorithm with the network training by the method of an inverse propagation of an error. The verification of the developed technique is carried out using the available experimental data.

**Введение.** Достигнутый в настоящее время уровень развития численных методов позволяет использовать их в инженерной практике наряду с натурным экспериментом. Однако все же эксперимент играет основную роль в процессе определения характеристик проектируемых образцов. В связи с этим, актуальным является развитие соответствующего методического обеспечения, которое применяется для обобщения наборов экспериментальных данных и установления универсальных зависимостей.

Для существенного упрощения процесса проектирования различных образцов техники, когда количество переменных проектирования и связей между ними, устанавливаемых с помощью экспериментальных исследований, достаточно велико, перспективным является использование искусственных нейронных сетей (ИНС) для обобщения экспериментальных данных и оценки характеристик объекта проектирования [1]. Целью настоящей работы является проектирование ИНС с последующим применением для решения задачи определения аэродинамических характеристик компрессорных решеток на основе имеющегося набора данных продувок плоских решеток.

**Постановка задачи проектирования ИНС.** Каждый режим течения в решетке профилей характеризуется вектором  $\vec{g} = [g_1, g_2, \dots, g_n]$  геометрических параметров решетки и векторами  $\vec{r} = [r_1, r_2, \dots, r_m]$  и  $\vec{h} = [h_1, h_2, \dots, h_k]$  режимных параметров потока. Вектор  $\vec{r}$  содержит набор граничных условий для потока, а вектор  $\vec{h}$  – набор параметров течения, определяющих аэродинамические характеристики решетки.

Выберем в качестве архитектуры ИНС многослойный перцептрон [2]. При решении прямой задачи газодинамики компрессорных решеток входной

сигнал ИНС представляет собой вектор  $\bar{g} \cup \bar{r}$ , а выходной сигнал – вектор  $\bar{h}$ . Т.е. нейронную сеть можно определить как некоторую вектор-функцию многих переменных  $Net(\bar{g} \cup \bar{r}, \bar{a}, \bar{w})$ , где  $\bar{a}$  – вектор параметров, определяющих топологическое строение ИНС;  $\bar{w}$  – вектор весовых коэффициентов связей сети, зависящий от  $\bar{a}$ .

Пусть задано обучающее множество  $E$ , каждый элемент которого представляет собой обучающий вектор для ИНС – совокупность заданного входного и искомого выходного сигналов нейронной сети. Определим некоторым случайным образом на множестве  $E$  фиксированное подмножество  $\tilde{E}$ , причем

$$|\tilde{E}|/|E| = \alpha, \quad (1)$$

где  $|E|$  – мощность множества  $E$ ;  $\alpha$  – некоторая наперед заданная константа.

Тогда задача обучения ИНС ставится как задача нахождения

$$\min_{\bar{w}} \left\| Net(\bar{g} \cup \bar{r}, \bar{a}, \bar{w}), \bar{h} \right\|_{E \setminus \tilde{E}}, \quad (2)$$

где  $\| \cdot \|_{E \setminus \tilde{E}}$  – норма, определенная на множестве  $E \setminus \tilde{E}$ .

Задача определения топологического строения нейронной сети ставится как задача нахождения

$$\min_{\bar{a}} \left\| Net'(\bar{g} \cup \bar{r}, \bar{a}, \bar{w}), \bar{h} \right\|_{\tilde{E}}, \quad (3)$$

где  $Net'(\bar{g} \cup \bar{r}, \bar{a}, \bar{w})$  – ИНС, для которой решена задача (2) для соответствующего вектора  $\bar{a}$ .

В процессе решения задачи (3) среди множества всех возможных (в рамках заданной архитектуры) ИНС выбирается такая, которая в процессе обучения выполняет обобщение результатов из обучающего множества  $E$ , соответствующее реальным физическим процессам, что выражается в корректной аппроксимации результатов на контрольном множестве  $\tilde{E}$ .

**Решение задачи проектирования ИНС.** В работах [3, 4] приведен широкий набор экспериментальных данных, который позволяет построить множество  $E$  векторов, а также определить компоненты векторов-элементов данного множества:

$$\bar{r} = [M_1, \beta_1], \quad \bar{h} = [\Delta\beta, \zeta], \quad (4)$$

где  $M_1$  – число Маха на входе в решетку;  $\beta_1$  – угол входа потока в решетку;  $\Delta\beta$  – поворот потока в решетке;  $\zeta$  – коэффициент потерь механической энергии в решетке.

Вектор  $\bar{g}$  геометрических параметров решетки напрямую зависит от выбранного способа параметрического описания решеток профилей. В рамках настоящей работы, основываясь на геометрических характеристиках профилей, используемых в работах [3, 4], в качестве элементов вектора  $\bar{g}$  удобно выбрать:

$$\bar{g} = [\bar{c}, \bar{b}, \varepsilon, \vartheta], \quad (5)$$

где  $\bar{c}$  – относительная толщина профиля;  $\bar{b}$  – густота решетки;  $\varepsilon$  – изгиб профиля;  $\theta$  – угол установки профиля в решетке.

Параметр  $\alpha$  из выражения (1) выберем равным 0,2.

Для решения задачи (3) – задачи проектирования ИНС, в настоящей работе применяется генетический алгоритм на основе классической модели [5] с использованием однородного оператора кроссовера. Функция цели рассчитывается как

$$\|Net(\bar{g} \cup \bar{r}, \bar{a}, \bar{w}), \bar{h}\|_{\bar{E}} = \sum_{j=1}^{|\bar{E}|} \sqrt{\sum_i [Net([\bar{g} \cup \bar{r}]_j, \bar{a}, \bar{w})_i - h_i]^2}. \quad (6)$$

Для обучения каждой ИНС, получаемой в результате генетических операций, применяется метод обратного распространения ошибки [2]. При этом следует учитывать следующую особенность. Процесс обучения нейронной сети имеет смысл до тех пор, пока в процессе обучения минимизируется как погрешность сети, так и функция цели (6). Если уменьшение погрешности сети не приводит к уменьшению функции цели, процесс обучения останавливается.

**Основные результаты.** В процессе проектирования и обучения ИНС использовались приведенные в работах [3, 4] результаты продувок 20 компрессорных решеток, каждая в среднем на 20 – 25 режимах. На рис. 1, 2 представлены полученные в результате обобщения экспериментальных данных зависимости коэффициента потерь полного давления  $\zeta$  (рис. 1) и угла поворота потока  $\Delta\beta$  (рис. 2) от числа Маха на входе в решетку  $M_1$  для решетки № 1 при угле атаки  $-2,5^\circ$ . Видно, что обобщающая кривая (обозначенная сплошной линией) проходит через все экспериментальные точки (обозначенные маркерами). Данный результат подтверждает работоспособность построенной методики.

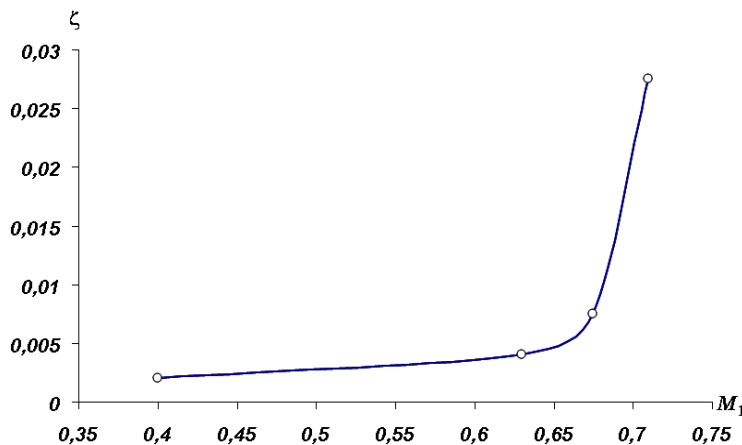


Рис. 1

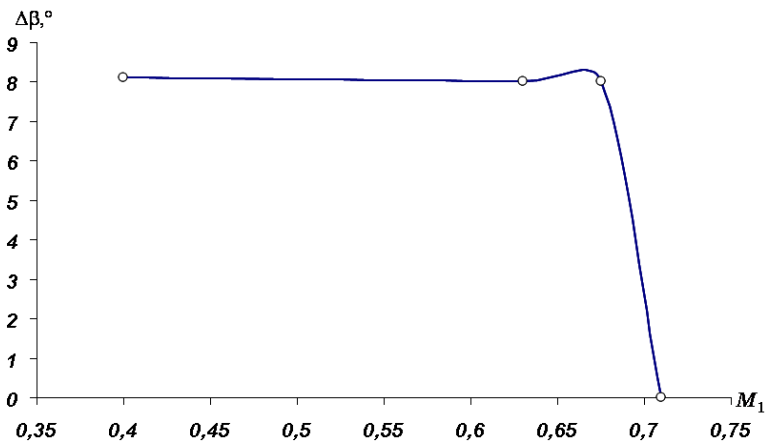


Рис. 2

С целью оценки применимости спроектированной ИНС к решению задачи определения аэродинамических характеристик компрессорных решеток данная нейронная сеть применена к расчету аэродинамических характеристик решетки при режимных параметрах течения, которые не использовались при обучении ИНС ни в обучающем, ни в контрольном множествах. Полученные в результате зависимости коэффициента потерь полного давления и угла поворота потока от числа Маха в решетке № 1 при входе потока под углом атаки  $+2,5^\circ$  представлены на рис. 3, 4 (обозначены сплошной линией). Расхождение с экспериментальными результатами, обозначенными на рисунках маркерами, находится в пределах точности существующих на сегодняшний день методик численного моделирования газовых течений в компрессорных решетках [6, 7]. При этом, скорость получения результатов с использованием нейронной сети в десятки раз превосходит скорость получения результатов с использованием методов численного моделирования. Основные временные затраты уходят на процесс проектирования и обучения нейронной сети, который выполняется один раз.

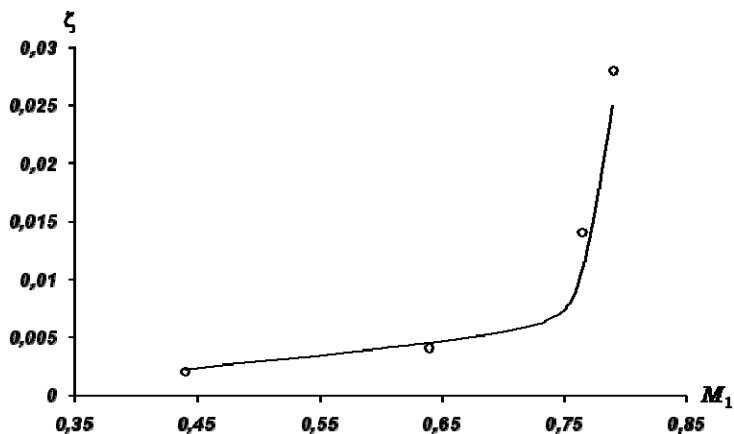


Рис. 3

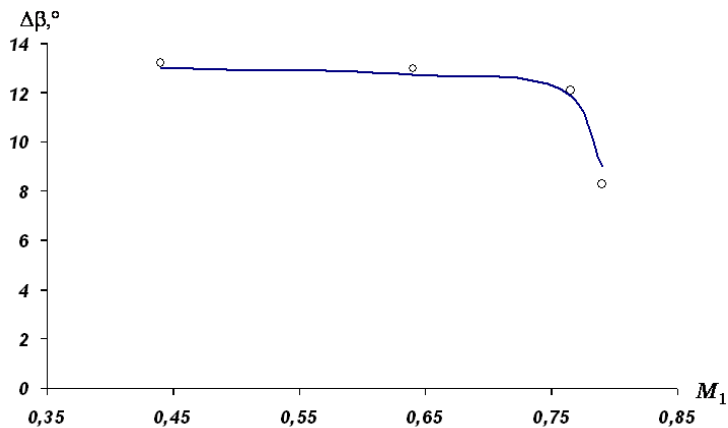


Рис. 4

**Выводы.** В настоящей работе исследована возможность применения ИНС для решения задачи определения аэродинамических характеристик компрессорных решеток путем обобщения экспериментальных данных, в качестве которых используются результаты продувок плоских решеток. Разработана соответствующая методика проектирования ИНС для определения аэродинамических характеристик решетки. В качестве архитектуры ИНС использован многослойный персептрон. Применяемый метод проектирования основан на модифицированной модели классического генетического алгоритма с обучением сети методом обратного распространения ошибки. Выполнена верификация разработанной методики с использованием имеющихся экспериментальных данных. Точность результатов, полученных при решении данной задачи определения аэродинамических характеристик компрессорных решеток с использованием ИНС, находится в пределах точности существующих на сегодняшний день методик численного моделирования газовых течений в компрессорных решетках.

1. Дорощев Е. А. Применение искусственных нейронных сетей в задачах аэродинамического проектирования и определения характеристик летательных аппаратов / Е. А. Дорощев, Ю. Н. Свириденко // Труды ЦАГИ. – 2002. – Вып. № 2655. – С. 73 – 86.
2. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – М. : ООО «И. Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
3. Бунимович А. И. Сборник аэродинамических характеристик плоских компрессорных решеток / А. И. Бунимович, Г. С. Орлова. – Выпуск 1. – М. : ЦИАМ. – 1955. – 98 с.
4. Бунимович А. И. Сборник аэродинамических характеристик плоских компрессорных решеток / А. И. Бунимович, Г. С. Орлова. – Выпуск 2. – М. : ЦИАМ. – 1955. – 83 с.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
6. Приходько А. А. Компьютерные технологии в аэродинамике и тепломассообмене / А. А. Приходько. – Киев : Наукова думка, 2003. – 382 с.
7. Кваша Ю. А. Численное моделирование плоского турбулентного течения газа в компрессорных решетках / Ю. А. Кваша, С. В. Мелашин // Техническая механика. – 2007. – №2. – С. 67 – 73.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 10.10.10,  
в окончательном варианте 10.10.10