

УДК 629.7:004.3

## ОТЛАДКА ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. В. ЖЕРНАКОВ<sup>1</sup>, А. В. КИНАРСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>zhsviit@mail.ru, <sup>2</sup>kinarskiy@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 02.04.2013

**Аннотация.** Рассматривается один из подходов к отладке параметров авиационного газотурбинного двигателя на этапах стендовых и доводочных испытаний с использованием технологии нейронных сетей. Разработана инженерная методика, которая может быть применена для отладки параметров ГТД.

**Ключевые слова:** отладка; авиационный двигатель; нейронные сети.

Отладка параметров авиационного двигателя является важным и необходимым этапом в процессе его эксплуатации, особенно в период планово-профилактических и ремонтных работ. Известно, что процесс проведения таких работ занимает значительное время и требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Кроме этого, процесс отладки сопряжен с большими трудностями «согласования» в работе различных агрегатов, узлов и подсистем двигателя. Наличие погрешностей определения параметров при стендовых испытаниях, в ряде случаев соизмеримых с допусками на отладку, создает ситуации, когда после отладки часть двигателей, имеющих параметры в пределах норм, признается негодной и проходит переотладку, и наоборот – параметры другой части двигателей, признанных годными, – не в норме. В первом случае растягивается во времени и удорожается процесс отладки, во втором – снижается его качество. Поэтому задача удешевления процесса стендовой отладки, повышения его качества и, как следствие, сокращения рассеивания высотно-скоростных характеристик двигателей является актуальной.

Анализ работ в данной области показывает [1–3], что существующие в настоящее время алгоритмы и программы, реализующие этот процесс, не лишены недостатков, среди которых основными являются:

- отсутствие универсальной методики, реализующей данную задачу (большинство предприятий отрасли ориентируется на собственные разработки);
- требование наличия больших объемов априорной и апостериорной информации по парку ГТД;
- назначение жестких допусков для каждого отлаживаемого параметра;
- значительные временные затраты на процесс отладки параметров ГТД, связанные с необходимостью решения оптимизационной задачи: минимизация функционала качество/время и т. д.

С целью устранения указанных недостатков ниже предлагается метод решения задачи отладки параметров ГТД, основанный на использовании нейросетевых технологий. Особенность постановки и решения этой задачи заключается в том, что при построении НС, как и ранее, используется лишь экспериментально полученная информация, в то время как классические методы решения данной задачи [1–3] требуют применения среднестатистических математических моделей ГТД, описания физики протекающих процессов и т. д.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Допустим, что параметры отрегулированного, нормально функционирующего ГТД в пространстве контролируемых параметров, например на плоскости параметров  $P_2^*$  и  $T_4^*$  (рис. 1),

соответствуют заданному номинальному режиму работы двигателя:  $P_2^* = P_{2\text{ном}}^*$ ;  $T_4^* = T_{4\text{ном}}^*$ .

Будем полагать, что характеристики парка исправных двигателей для тех же измеряемых параметров дают некоторый разброс относительно указанной номинальной точки, образуя эллипс (в многомерном пространстве – эллипсоид) рассеяния (рис. 1). Выход рабочей точки за пределы этого эллипса соответствует аномальным изменениям параметров индивидуального двигателя. Тогда целью отладки параметров ГТД является возвращение «выпавшей» точки в эллипс (эллипсоид) путем плавной регулировки элементов конструкции ГТД, например, путем корректировки площади критического сечения соплового аппарата двигателя  $F_C$  (или диаметра сопла  $D$ ) [2].



Рис. 1. Эллипс рассеяния параметров ГТД

Решение данной задачи на основе метода статистического моделирования, подробно изложенного в работах [1, 3], предполагает выполнение следующей последовательности шагов:

- в процессе экспериментальных исследований (в ходе стендовых испытаний) выделяются параметры, максимально влияющие на процесс отладки: тяга  $R$ , температура газа перед турбиной  $T_3^*$ , удельный расход топлива  $C_{\text{уд}}$ ;

- определяется выполнение условия нахождения перечисленных параметров в поле допуска:

$$\begin{aligned} R_{\text{н}} &\leq R \leq R_{\text{в}}; \\ T_{3\text{н}}^* &\leq T_3^* \leq T_{3\text{в}}^*; \\ C_{\text{удн}} &\leq C_{\text{уд}} \leq C_{\text{удв}}; \end{aligned} \quad (1)$$

где индексы «н» и «в» – нижняя и верхняя допустимые границы указанных параметров соответственно;

- определяются параметры среднестатистического по парку ГТД:  $R_S$ ,  $T_{3S}^*$  и  $C_{\text{удS}}$ ;

- формируется целевая функция:

$$I = (\bar{R} - \bar{R}_S)^2 + (\bar{T}_3^* - \bar{T}_{3S}^*)^2 + (\bar{C}_{\text{уд}} - \bar{C}_{\text{удS}})^2, \quad (2)$$

где значения параметров приведены к относительным (безразмерным):

$$\bar{R} = R / R_{\text{max}};$$

$$\bar{T}_3^* = T_3^* / T_{3\text{max}}^*;$$

$$\bar{C}_{\text{уд}} = C_{\text{уд}} / C_{\text{удmax}};$$

- находится такое значение варьируемого параметра (в данном случае, диаметра реактивного сопла  $D$ ), при котором достигается минимум целевой функции (2) при выполнении ограничений (1).

Решение данной задачи в нейросетевом базисе может быть представлено в виде следующей последовательности шагов:

- формирование обучающей выборки по результатам испытаний парка ГТД;

- определение границ изменения варьируемого параметра:

$$D_{\text{н}} \leq D \leq D_{\text{в}};$$

- построение нейросетевой модели среднестатистического ГТД, входными параметрами которой является величина диаметра реактивного сопла  $\bar{D}$ , а выходами – параметры двигателя  $\bar{R}$ ,  $\bar{T}_3^*$  и  $\bar{C}_{\text{уд}}$ ;

- построение регулировочной кривой

$$I = f(\bar{D}),$$

где  $I$  – целевая функция (невязка) (2);  $\bar{D}$  – относительное значение диаметра реактивного сопла:

$$\bar{D} = D / D_{\text{max}};$$

- вычисление требуемой поправки диаметра реактивного сопла индивидуального ГТД

$$\Delta D = D - D_{\text{опт}},$$

где  $D_{\text{опт}}$  – оптимальное значение диаметра реактивного сопла  $D$ , соответствующее минимуму целевой функции (2);

- уточнение значений параметров отрегулированного двигателя  $\bar{R}$ ,  $\bar{T}_3^*$  и  $\bar{C}_{\text{уд}}$  для скорректированного значения диаметра реактивного сопла:

$$D = D_{\text{опт}}.$$

На рис. 2 приведена схема НС, реализующей вышеописанный алгоритм.

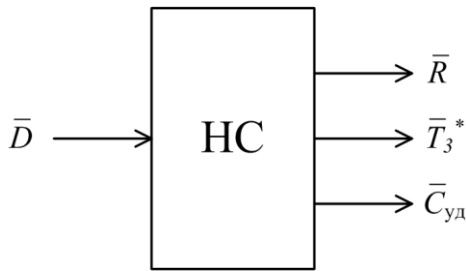


Рис. 2. Структура нейронной сети

Данная сеть хранит информационный «портрет» среднестатистического ГТД на одном из режимов его работы (например, максимальном) и при подаче на ее вход значения  $\bar{D}$  вычисляет значения приведенных параметров  $\bar{R}$ ,  $\bar{T}_3^*$  и  $\bar{C}_{уд}$ .

Таблица 1  
Фрагмент обучающей выборки

0,9982	0,9876	0,9718	0,9663
0,9982	0,9941	0,9783	0,9747
0,9927	0,9937	0,9642	0,9658
0,9927	0,9807	0,9837	0,976
0,9908	0,992	0,9978	0,9867
0,9927	0,9856	0,9794	0,9697
0,9945	0,9895	0,9696	0,9661
0,9908	0,9861	0,9902	0,9796
0,9945	0,9846	0,9653	0,961
0,9908	0,9985	0,9902	0,9881
0,9963	0,9902	0,9674	0,9708
0,9982	0,9937	0,9642	0,9674
0,9954	0,9934	0,9674	1
0,9954	0,9873	0,9685	0,9672
0,9945	0,9946	0,9783	0,9767
0,9982	0,989	0,9577	0,9569
0,989	0,9949	0,987	0,9805
0,9973	0,9988	0,9707	0,9674
0,989	0,9827	0,9805	0,9701

Рассмотрим более подробно пример решения задачи отладки.

В качестве обучающей выборки будем использовать результаты стендовых испытаний

парка авиационных двигателей на максимальном режиме работы, представленные в табл. 1, где значения диаметра реактивного сопла  $\bar{D}$ , тяги  $\bar{R}$ , температуры газов перед турбиной  $\bar{T}_3^*$  и удельного расхода топлива  $\bar{C}_{уд}$  приведены в относительных единицах.

Параметры среднестатистического по парку двигателя приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Параметры среднестатистического ГТД

Параметр	Значение
—	0,9889
—	0,9762
—	0,9714
—	0,9937

В качестве архитектуры НС принималась трехслойная сеть прямого распространения. График изменения ошибки обучения НС в зависимости от числа нейронов скрытого слоя приведен на рис. 3, откуда следует, что ошибка обучения НС минимальна при числе нейронов скрытого слоя, равном 3.



Рис. 3. Зависимость ошибки обучения НС от числа нейронов скрытого слоя

Наилучшая сходимость процесса обучения НС обеспечивается при использовании алгоритма сопряженных градиентов [4, 5]. Зависимость целевой функции (2) от параметра  $\bar{D}$  приведена на рис. 4.

В данном случае:  $D_{\text{опт}} = 0,9918$ ;  $I_{\text{мин}} = 2,14 \cdot 10^{-6}$ . Допустим, что индивидуальный ГТД имеет диаметр реактивного сопла  $\bar{D} = 0,9945$ , тогда из графика на рис. 4 следует:  $\Delta \bar{D} = 0,0027$ , что эквивалентно в свою очередь изменению диаметра реактивного сопла:

$$\Delta D = \Delta \bar{D} \cdot D_{\text{max}} = 1,5 \text{ мм.}$$

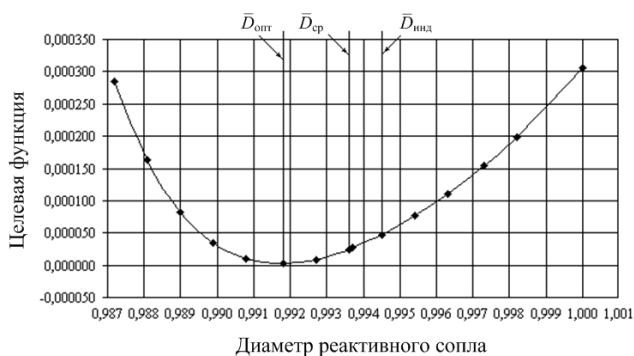


Рис. 4. Зависимость целевой функции от диаметра реактивного сопла

Отлаженному двигателю (после корректировки параметра  $D$ ) будут соответствовать параметры, приведенные в табл. 3.

Таблица 3  
Параметры отлаженного ГТД

Параметр	Значение
—	0,9876
—	0,9755
—	0,9707

Разработанный нейросетевой метод отладки параметров ГТД отличается простотой реализации и универсальностью применения [6–8].

## ВЫВОДЫ

1. Применение аппарата нейронных сетей оказывается эффективным при решении широкого круга плохо формализуемых задач, связанных с отладкой параметров авиационного двигателя.

2. Результаты решения задачи отладки параметров ГТД показывают, что:

- процесс отладки параметров ГТД легко формализуется в нейросетевом базисе;
- для вычисления требуемого значения диаметра реактивного сопла можно воспользоваться регулировочной кривой, построенной на основе обучения нейронной сети по результатам стендовых испытаний парка авиационных двигателей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арьков Ю. Г., Алаторцев В. П. Об отладке основного контура ТРДФ на форсажных режимах в стендовых условиях. // Испытания авиационных двигателей. Уфа: УАИ, 1978. № 6. С. 51–59.

2. Гумеров Х. С., Алаторцев В. П., Горюнов И. М. Оценка и отладка параметров турбореактивного двигателя на самолетах. // Авиационная техника. 1998. № 3. С. 72–77.

3. Дегтярев Ю. Д., Алаторцев В. П., Гумеров Х. С., Афанасьев И. П. Статистическое моделирование технологического процесса отладки одновальных ГТД при стендовых испытаниях. // Испытания авиационных двигателей. Уфа: УАИ, 1982. № 10. С. 97–102.

4. Васильев В. И., Ильясов Б. Г., Кусимов С. Т., Жернаков С. В. и др. Нейрокомпьютеры в авиации. М.: Радиотехника, 2004. 496 с.

5. Галушкин А. И. Теория нейронных сетей. М.: Радиотехника, 2000. 416 с.

6. Жернаков С. В. Применение нейросетей для отладки параметров ГТД в процессе эксплуатации. // Нейрокомпьютеры и их применение: VII Всеросс. конф. с междунар. участием. М.: ИПУ, 2001. С. 161–165.

7. Жернаков С. В. Отладка параметров авиационного газотурбинного двигателя на основе нейронных сетей. // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. М.: Научтехлитиздат, 2003. № 12. С. 33–40.

8. Жернаков С. В., Иванова Н. С., Равилов Р. Ф. Контроль и диагностика технического состояния масляной системы ГТД с использованием технологии нейронных сетей // Вестник УГАТУ: науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 210–220.

## ОБ АВТОРАХ

**ЖЕРНАКОВ Сергей Владимирович**, проф., зав. каф. электроники и биомедицинских технологий. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1984). Д-р техн. наук по системному анализу, управл. и обраб. информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. интеллектуальных систем.

**КИНАРСКИЙ Анатолий Владимирович**, асп. той же каф. Дипл. инж. по выч. машинам, компл., сист. и сетям (УГАТУ, 2010). Готовит дис. о борт. интел. системе контроля и диагн. авиац. ГТД.

## METADATA

**Title:** Debugging of aviation gas turbine engine parameters based on the neuronet technology.

**Authors:** S. V. Zhernakov, A. V. Kinarskiy

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** zhsviit@mail.ru, kinarskiy@yandex.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, No. 5 (58), pp. 26-30, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** One of the approaches, based on the neural network technology, to debugging of aviation gas turbine engine parameters during bench testing was described. The engineering technique for GTE parameters debugging was developed.

**Key words:** Debug; aviation engine; neural networks.

## References (English Transliteration):

1. Yu. G. Ar'kov and V. P. Alatorstev, «Debugging of augmented turbojet engine main circuit in afterburning modes under bench conditions,» (in Russian), *Ispytaniya*

- Aviacionnyh Dvigatelye* (Aviation Engine Testing), Ufa, no. 6, pp. 51–59, 1978.
2. Kh. S. Gumerov, V. P. Alatortsev, and I. M. Goryunov, «Measure and debugging aircraft turbojet engine parameters», (in Russian), *Aviacionnaya Tehnika* (Aviation Engineering), no. 3, pp. 72–77, 1998.
  3. Yu. D. Degtyarev, V. P. Alatortsev, Kh. S. Gummerov, and I. P. Afanas'ev, «Statistical modelling of single-shaft GTE debugging technologic process during bench testing», (in Russian), *Ispytaniya Aviacionnyh Dvigatelye* (Aviation Engine Testing), no. 10, pp. 72–77, 1998.
  4. V. I. Vasil'ev, B. G. Il'yasov, S. T. Kusimov, S. V. Zhernakov *et al.*, *Neurocomputers in Aviation*, (in Russian). Moscow: Radiotekhnika (Radio Engineering), 2004.
  5. A. I. Galushkin, *Neural Networks Theory*, (in Russian). Moscow: Radiotekhnika (Radio Engineering), 2000.
  6. S. V. Zhernakov, «Applying of neuronets for debugging of GTE parameters during exploitation process», (in Russian), in *Neyrokomp'yutery i ih Primenenie* (Neurocomputers and their Application: Proc. 7th All-Russian conference with international participation), Moscow, 2001, pp. 161–165.
  7. S. V. Zhernakov «Aviation gas turbine engine parameters debugging based on neural networks», (in Russian), *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika*. (Devices and systems. Handling. Control. Diagnostic), no. 12, pp. 33–40, 2003.
  8. S. V. Zhernakov, N. S. Ivanova, and R. F. Ravilov, «Control and diagnostic of GTE oil system based on neural network technology applying», (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 210–220, 2012.

**About authors:**

**ZHERNAKOV, Sergey Vladimirovich**, Prof., Dept. of Electronics and Biomedical Technology. Dipl. Engineer of Industrial Electronics (UGATU, 1984). Cand. (PhD) Tech. Sci. (UGATU, 1993), Dr. (Habil.) Tech. Sci. (UGATU, 2005).

**KINARSKIY, Anatoliy Vladimirovich**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Electronics and Biomedical Technology. Dipl. Engineer of Computing Machines, Complexes, Systems and Networks (UGATU, 2010).