

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВ3-117 В ПОЛЕТНЫХ РЕЖИМАХ

Введение

Безопасность полетов воздушного судна – одна из ключевых проблем авиации, во многом зависит от надежности работы их двигателей. В свою очередь, надежная работа двигателя, в частности турбовального двигателя ТВ3-117, обеспечивается комплексом мероприятий, среди которых важное место отводится диагностике его технического состояния. В настоящее время техническая диагностика авиационных двигателей осуществляется только на земле инженерно-техническим составом, в распоряжении которого имеются соответствующие инструментальные средства и методический аппарат. Но большинство отказов, влияющих на безопасность эксплуатации воздушного судна, зарождаются и проявляются именно в полете, что требует наличия эффективной бортовой системы диагностики, определяющей техническое состояние двигателя в режиме реального времени непосредственно на борту воздушного судна. Трудность проведения диагностики авиационного двигателя в автоматическом режиме в полете связана с высокой сложностью конструкций авиационных двигателей, в том числе и турбовального двигателя ТВ3-117, обусловленной многопараметричностью, многосвязностью, нелинейностью протекающих в них процессов, многорежимностью применения, что требует значительных машинных и временных ресурсов.

Анализ последних исследований и публикаций

Создание информационных систем идентификации, в том числе контроля и диагностики технического состояния авиационных двигателей, исследуются в работах В.Г. Августиновича, А. М. Ахмедзянова, И. А. Биргера, В. И. Васильева, Х. С. Гумерова, В. Т. Дедеша, Н. Г. Дубравского, И. В. Егорова, С. В. Епифанова, В. Н. Ефанова, Ю. С. Кабальнова, В. Г. Крымского, Г. Г. Куликова, Д. Ф. Симбирского, Н. Н. Сиротина, А. П. Тунакова, В. Т. Шепеля, С. В. Жернакова и др. [1 – 4]. Но их работы посвящены разработке информационных систем идентификации технического состояния авиационных двигателей в условиях только стендовых испытаний. Таким образом, разработка бортовой системы идентификации, в том числе контроля и диагностирования технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117, является актуальной.

Предпосылки разработки бортовой системы на основе нейронных сетей

Двигатели пятого поколения имеют бортовые системы контроля параметров (рис. 1), осуществляющие выдачу информации об отказах систем и агрегатов, а также о превышении либо понижении допустимых значений некоторых параметров. Эта информация поступает к экипажу посредством показаний бортовых приборов, световых индикаторов либо звуковых сигналов. В итоге существующие системы контроля параметров авиационных двигателей констатируют уже произошедший факт отказа, не давая возможности экипажу его предотвратить. В современных условиях такие системы являются недостаточно эффективными как минимум по двум причинам. Во-первых, наметившаяся устойчивая тенденция перехода от стратегии эксплуатации авиационной техники «по ресурсу» к эксплуатации «по состоянию» требует повышенного внимания к техническому состоянию авиационного двигателя. Во-вторых, постоянное повышение удельных параметров вновь разрабатываемых двигателей происходит за счет снижения запасов прочности, устойчивости и приводит к их работе на предельных режимах, что объективно повышает риски возникновения отказов. Таким обра-

зом, существует проблема создания новых «интеллектуальных» бортовых систем технической диагностики авиационных двигателей, способных эффективно распознавать зарождающиеся отказы и осуществлять прогнозирование технического состояния авиационного двигателя хотя бы на время, достаточное для безопасного завершения полета.

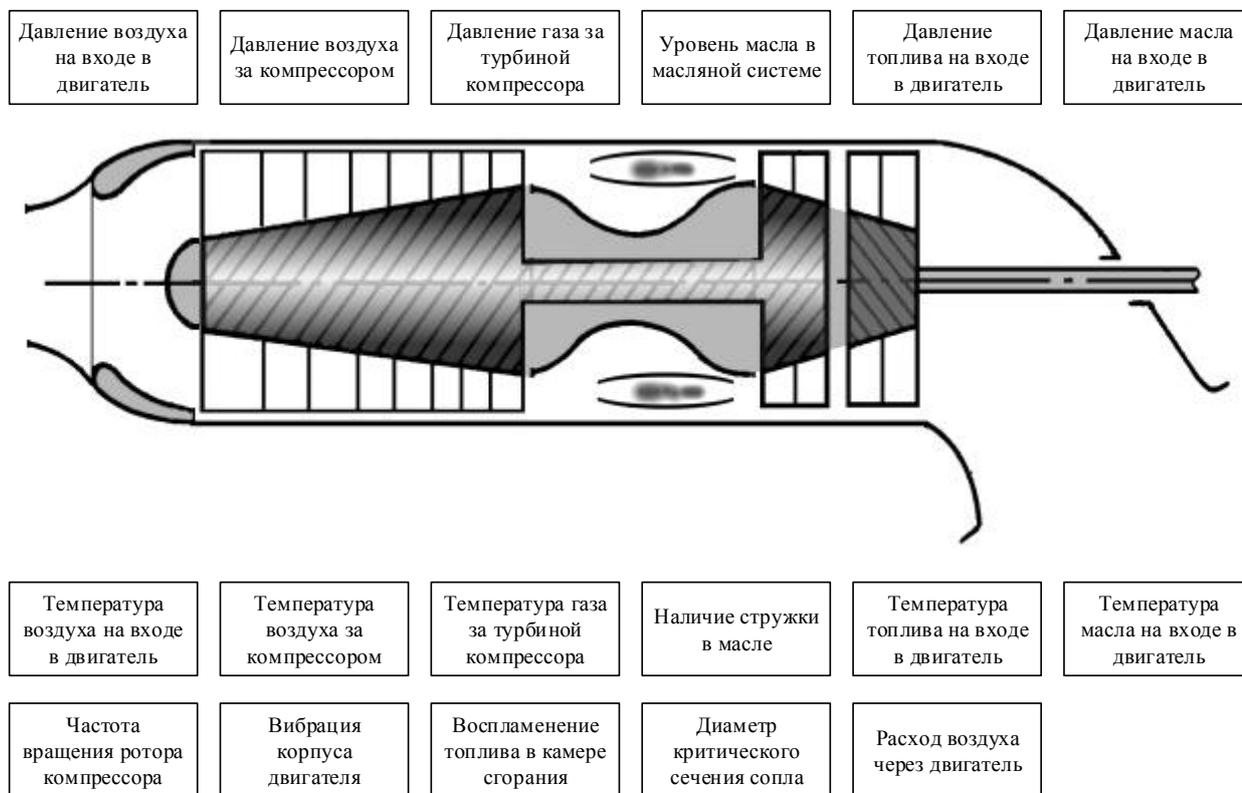


Рис. 1

В данном аспекте диагностика заключается в последовательном решении двух задач: идентификации состояния авиационного двигателя ТВ3-117 в каждый момент времени по измеряемым датчиками параметрам и классификации состояния двигателя, то есть определение соответствия его состояния одному из классов (исправен, неисправен по причине отказа i -го агрегата, работоспособен и т.д.). Учитывая специфические особенности объекта диагностики (авиационного двигателя ТВ3-117) как сложной технической системы с существенно нелинейными характеристиками, обе эти задачи могут быть эффективно решены с применением математического аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС). Это средство было выбрано благодаря наличию у ИНС ряда неоспоримых преимуществ:

- они способны решать плохо формализуемые традиционными математическими методами задачи, к числу которых относится идентификация двигателя ТВ3-117 как объекта диагностирования и классификация его диагностических признаков по классам функциональных состояний;
- решение указанных задач возможно в режиме реального времени за счет высокой скорости работы ИНС, что особенно важно для бортовой системы;
- ввиду многообразия связей в ИНС, ее надежная работа возможна даже при повреждении некоторых из них;
- в процессе своей работы ИНС способна самообучаться в соответствии с изменяющимися в процессе эксплуатации двигателя параметрами.

Создание бортовой системы технической диагностики двигателя на основе ИНС, структурно-логическая схема которой показана на рис. 2, включает следующие этапы:

- идентификацию систем и агрегатов, и двигателя ТВ3-117 в частности, как объекта диагностирования, то есть создание ИНС (включающее выбор ее типа и архитектуры), вход-

ными значениями которой являются функциональные параметры двигателя, зарегистрированные датчиками, а выходными – параметры, определяющие его состояние, с возможностью самообучения и коррекции своих параметров в процессе эксплуатации конкретного двигателя ТВЗ-117;

- создание обучающей выборки для ИНС на основе статистической информации о функциональных параметрах двигателя на всех режимах работы и наиболее вероятных отказах из опыта эксплуатации (для уже эксплуатируемых двигателях) или по результатам стендовых испытаний (для вновь разрабатываемых или модернизируемых двигателях);
- обучение ИНС с использованием обучающей выборки;
- проверку адекватности и корректности созданной и обученной ИНС путем моделирования режимов работы и отказов двигателей, не вошедших в обучающую выборку;
- аппаратную реализацию созданной ИНС в электронных микросхемах, интегрированных в систему автоматического управления двигателя.

Для создания полной обучающей выборки тестовых и тренировочных данных для ИНС необходим предварительный сбор параметров двигателя с учетом широкого диапазона пространства его состояний. Данные измерения накапливаются в базе данных испытаний в течение длительного времени, поэтому применение аппарата ИНС позволяет проанализировать всю совокупность данных. Для определения возможностей ИНС при решении задач диагностики на начальном этапе исследования был выбран один диагностический параметр – вибрация корпуса двигателя. Этот параметр измеряется в течение всего времени работы двигателя и является достаточно информативным, в первую очередь, с точки зрения состояния опор двигателя.

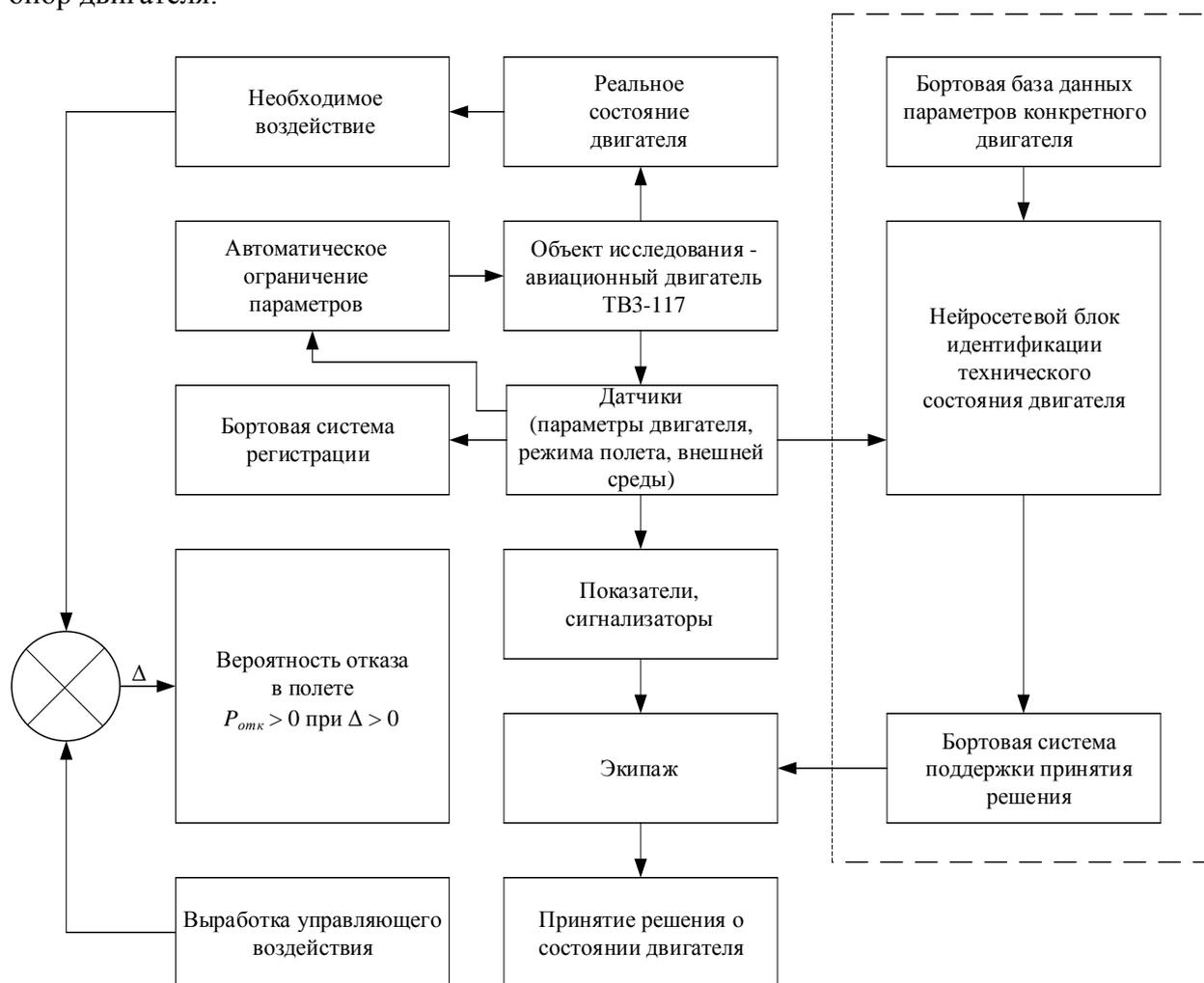


Рис. 2

Поскольку нейросетевой блок идентификации технического состояния двигателя является многозадачным, то для его реализации наиболее эффективно применение нейрорегулятора NN Predictive Controller, реализованного в пакете прикладных программ Neural Network Toolbox системы MATLAB. Регулятор использует модель управляемого объекта в виде нейронной сети для того, чтобы спрогнозировать его будущее поведение. Кроме того, регулятор вычисляет сигнал управления, который оптимизирует поведение объекта на заданном интервале времени. Итак, проектирование нейрорегулятора состоит из двух этапов: этап идентификации управляемого объекта и этапа синтеза закона управления. На этапе идентификации разрабатывается модель управляемого объекта в виде нейронной сети, которая на этапе синтеза используется для синтеза регулятора [5].

На рис. 3 показана структурная схема предлагаемой нейросетевой системы управления двигателем ТВЗ-117, разработанная в Simulink. Эта структура включает блок управляемого объекта (Subsystem) и блок регулятора NN Predictive Controller, а также блоки генерации эталонного ступенчатого сигнала со случайной амплитудой Random Reference, блок построения графиков. Обучение нейрорегулятора с помощью алгоритма обратного распространения [6].

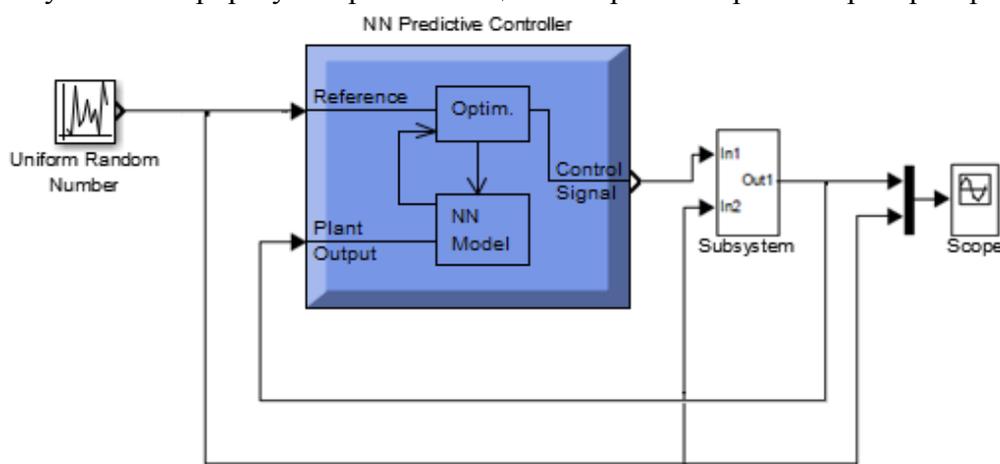


Рис. 3

Применение нейронных сетей в задачи контроля технического состояния авиационного двигателя ТВЗ-117

Целью решения поставленной задачи - показать возможности применения качественных нейросетевых моделей, построенных на основе экспериментальных данных, в качестве модели индивидуального авиационного двигателя ТВЗ-117 для решения задачи контроля его технического состояния. Отличительной особенностью применения нейросетевых технологий к решению данной задачи является отсутствие математической модели, адекватно описывающей сложные физические процессы в двигателе. Допуски на измеряемые параметры, обычно задаваемые в процессе контроля, здесь не задаются в явном виде, а формируются в процессе обучения нейронной сети на обучающей выборке [7 – 9].

Полагается, что все возможные состояния двигателя можно разбить на два класса S_0 и $\overline{S_0}$, объединяющие родственные состояния, близкие между собой по определенным интегральным показателям. Здесь класс S_0 включает в себя все исправные состояния двигателя, а класс $\overline{S_0}$ объединяет все неисправные состояния, характеризующиеся наличием хотя бы одного дефекта в работе авиационного двигателя. Требуется по результатам ограниченного числа измерений вектора выходных параметров двигателя $Y(t_i)$, $t_i \in T$ (t_i – дискретные моменты времени; T – интервал наблюдения), принять решение о принадлежности двигателя к одному из указанных классов состояний.

Решение данной задачи в общем виде сводится к нахождению некоторой разделяющей функции (гиперповерхности) в пространстве контролируемых параметров двигателя. Для

решения данной задачи ниже рассматривается подход, основанный на построении указанного решающего правила с помощью нейронной сети.

В основе примененной методики используется построение эталонной (усредненной) модели двигателя ТВЗ-117, полученной по результатам его летных (или стендовых) испытаний и хранящейся в нейросетевом базисе в качестве его информационного «портрета». При контроле технического состояния авиационного двигателя ТВЗ-117 измеряются его параметры; далее вычисляется метрика, характеризующая различие характеристик конкретного (индивидуального) двигателя и эталонной (нейросетевой) модели двигателя, и по величине этой метрики принимается решение о фактическом состоянии исследуемого двигателя.

Применение алгоритма контроля технического состояния авиационного двигателя ТВЗ-117 заключается в следующем: состояние двигателя представляется точкой в пространстве контролируемых параметров y_1, y_2, \dots, y_n (в данной работе $n = 4$). Для оценки степени работоспособности двигателя, то есть соответствия его характеристик предъявляемым требованиям, необходимо вычислить расстояние от данной точки до эталонной точки, соответствующей эталонному (исправному) двигателю. Если это расстояние равно нулю, то техническое состояние двигателя совпадает с эталонным; чем больше величина указанного расстояния, тем больше различие характеристик контролируемого и эталонного двигателей.

В качестве оценок метрического расстояния (метрик), известных в литературе по математической статистике и кластерному анализу [4, 10, 11], можно выделить следующие:

1. Эвклидова метрика:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{etalon})^2}; \quad (1)$$

где y_i – измеренное значение i -го параметра двигателя; y_i^{etalon} – эталонное значение этого параметра, вычисленное с помощью НС;

2. Метрика Чебышева:

$$d = \max |y_i - y_i^{etalon}|. \quad (2)$$

Физический смысл метрики (1) состоит в том, что она характеризует среднеквадратическое отклонение в пространстве выходов между объектом и его эталонной моделью, а метрика (2) характеризует наибольшее отклонение между этими выходами.

Рассмотрим особенности решения задачи контроля технического состояния авиационного двигателя ТВЗ-117. В качестве исходных данных рассматриваются данные, полученные в процессе летных испытаний двигателя при различных значениях температуры T_0 , К и давления P_0 , мм. рт. ст. окружающей среды. В табл. 1 приведены параметры эталонного (заведомо исправного) двигателя, которые приведены к относительным (безразмерным) значениям; $\bar{T}_0 = 1$ и $\bar{P}_0 = 1$ соответствуют параметры $T_0 = 288$ К и $P_0 = 760$ мм. рт. ст.

Таблица 1

\bar{T}_0	\bar{P}_0	\bar{n}	\bar{T}_4^*	\bar{P}_2^*
1,000	0,951	0,867	0,749	0,255
1,012	1,011	0,894	0,787	0,305
1,005	0,974	0,930	0,809	0,312
1,026	0,974	1,000	0,894	0,353
1,000	0,990	0,858	0,743	0,271
1,022	0,973	0,798	0,721	0,209

В табл. 1 n – частота вращения ротора компрессора, T_4 – температура газа за турбиной; P_2 – давление газа за компрессором.

В табл. 2 приведены данные летных испытаний двигателя, которые в дальнейшем обрабатываются нейронной сетью и по результатам их обработки, последней принимается решение о результатах контроля авиационного двигателя ТВЗ-117.

Таблица 2

Номер	\bar{T}_0	\bar{P}_0	\bar{n}	\bar{T}_4^*	\bar{P}_2^*
1	1,029	0,993	0,827	0,766	0,238
2	1,029	0,995	0,826	0,766	0,239
3	1,022	0,997	0,816	0,748	0,234
4	1,015	0,980	0,819	0,743	0,230
5	1,040	1,041	0,829	0,755	0,250
6	1,008	1,023	0,797	0,740	0,240
7	1,000	1,016	0,796	0,712	0,237
8	0,995	1,015	0,805	0,711	0,243
9	1,000	1,031	0,825	0,726	0,262
10	1,000	0,997	0,844	0,743	0,272
11	0,995	0,991	0,805	0,711	0,233
12	1,000	0,997	0,808	0,713	0,234
13	1,019	1,057	0,815	0,728	0,249
14	1,000	0,984	0,789	0,713	0,231
15	1,005	1,000	0,820	0,728	0,239
16	0,974	0,909	0,826	0,724	0,235
17	1,005	0,991	0,806	0,697	0,210
18	1,012	1,016	0,807	0,725	0,234
19	1,008	0,995	0,811	0,732	0,239
20	1,005	1,003	0,828	0,741	0,250
21	1,001	1,005	0,806	0,720	0,236
22	1,000	0,987	0,822	0,728	0,246
23	0,991	1,043	0,837	0,735	0,270
24	0,995	0,989	0,821	0,721	0,256
25	1,005	0,994	0,824	0,728	0,243
26	1,001	0,993	0,809	0,722	0,233
27	1,000	0,997	0,826	0,731	0,248
28	1,015	0,994	0,813	0,726	0,234
29	0,995	0,980	0,806	0,723	0,230
30	1,000	1,000	0,824	0,724	0,244
31	0,995	1,000	0,842	0,740	0,263
32	1,001	1,002	0,864	0,758	0,309
33	1,001	0,981	0,826	0,733	0,272
34	0,995	0,978	0,816	0,723	0,234
35	1,008	1,004	0,823	0,727	0,248
36	1,005	0,991	0,792	0,712	0,228
37	1,005	1,014	0,823	0,736	0,248
38	1,005	1,016	0,810	0,723	0,244
39	1,019	1,012	0,815	0,733	0,243
40	1,019	1,026	0,810	0,740	0,241
41	1,008	1,007	0,808	0,735	0,241
42	1,012	1,005	0,827	0,743	0,250
43	1,019	1,026	0,806	0,732	0,236
44	1,012	1,031	0,804	0,732	0,242
45	1,015	1,028	0,803	0,727	0,242
46	1,019	1,031	0,805	0,735	0,242
47	1,019	1,031	0,804	0,735	0,242
48	1,019	1,031	0,804	0,735	0,242
49	1,020	1,032	0,803	0,733	0,242
50	1,020	1,032	0,803	0,730	0,242

Результаты проведенных исследований показывают, что для построения эталонной модели на основе нейронной сети необходима оптимальная по сложности структура нейронной сети (рис. 4) – многослойный персептрон, имеющий два входа (значения параметров

окружающей среды – \bar{T}_0 и \bar{P}_0), 12 нейронов в скрытом слое и 3 нейрона на выходе нейронной сети (параметры двигателя \bar{n} , \bar{T}_4^* , \bar{P}_2^*).

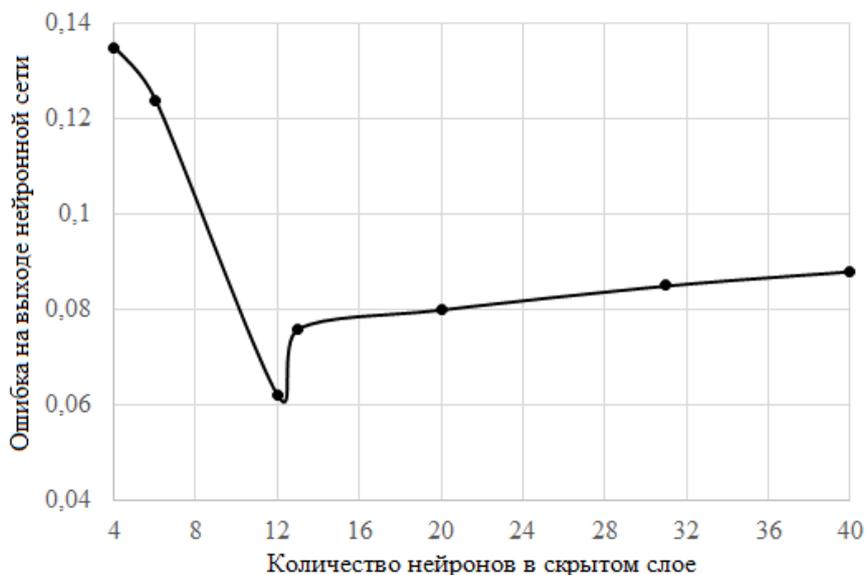


Рис. 4

В рассматриваемом примере контроля технического состояния авиационного двигателя ТВЗ-117 вычислялось метрическое расстояние по (1) и (2) как функция наработки авиационного двигателя с целью оценить степень его работоспособности по сравнению с эталонным двигателем, в течение всего времени испытаний.

Полученный график изменения метрического расстояния d в зависимости от наработки авиационного двигателя ТВЗ-117 приведен на рис. 5, где 1 – эвклидово расстояние, вычисленное в соответствии с (1); 2 – чебышево расстояние, вычисленное в соответствии с (2).



Рис. 5

Процесс принятия решения о техническом состоянии двигателя в результате контроля его параметров, может осуществляться на основе нечеткой логики. При этом функции принадлежности (рис. 6) назначаются экспертно; R – решение об исправности двигателя выдается в виде коэффициентов уверенности.

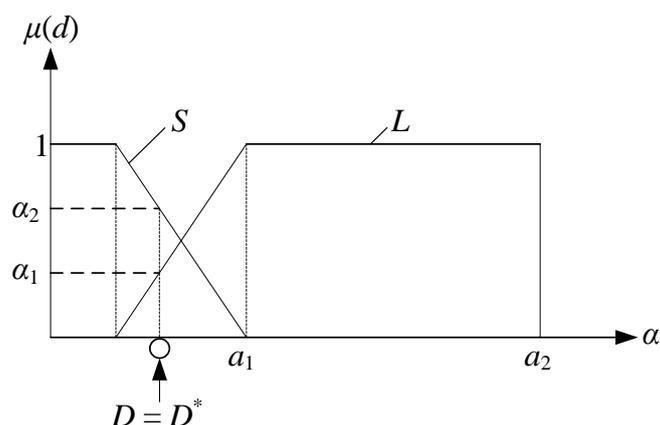


Рис. 6

Решающее правило, на основе которого принимается решение об исправности двигателя, имеет следующий вид:

$$R = \begin{cases} S_o, & \text{если } d = S (\text{Small}); \\ \bar{S}_o, & \text{если } d = L (\text{Large}). \end{cases} \quad (3)$$

Окончательное решение о техническом состоянии авиационного двигателя ТВ3-117 принимается экспертом с учетом полученных значений коэффициентов уверенности (так, на рис. 6 величина α_1 означает коэффициент уверенности выполнения 1-го правила в (3); α_2 – аналогичная величина для 2-го правила).

Выводы

Преимуществом рассмотренного алгоритма является возможность работы с малыми обучающими выборками, назначением мягких допусков, использованием опыта экспертов для оценки технического состояния авиационного двигателя ТВ3-117, что представляется важным в условиях неполноты информации.

Список литературы:

1. Бармин И.В. Концепция управления состоянием сложных технических комплексов за пределами плановых сроков эксплуатации / И.В. Бармин, Р.М. Юсупов, В.Е. Прохорович // Информационные технологии. – 2000. – № 5. – С. 2–7.
2. Нейрокомпьютеры в авиации : монография / А.И. Галушкин, В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов, С.В. Жернаков и др. – Москва : Радиотехника, 2004. – 496 с.
3. Интеллектуальное управление динамическими системами / С.Н. Васильев, А.К. Жерлов, Е.А. Федосов, Б.Е. Федун. – Москва : Физматлит, 2000. – 352 с.
4. Дубровин В.И. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей / В.И. Дубровин, С.А. Субботин, А.В. Богуслаев. – Запорожье : Мотор-Сич, 2003. – 279 с.
5. Синтез нейрорегулятора NN Predictive Controller для управления трехмассовой электромеханической системой / Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломійев, Р.В. Тютюн, Ю.О. Алфьоров, А.О. Власов // Системи обробки інформації. – 2017. – Вип. 3 (149). – С. 88–95.
6. Климова Я.Р. Обучение нейросетевого контроллера для диагностики и прогнозирования состояния двигателя вертолета Ми-8МТВ // IT перспектива : материалы 5-й всеукр. конф. в сфере IT, 21 апреля 2018 г., Кременчуг. – Кременчуг : КрНУ имени Михаила Остроградского, 2018. – С. 66–69.
7. Дегтярев А.Б. Оперативный контроль параметров аварийного динамического объекта на основе нейросетевых алгоритмов / А.Б. Дегтярев, И.А. Кирюхин // Нейроинформатика. – Москва : МИФИ, 2002. – Т. 2. – С. 151–158.
8. Васильев В.И. Нейросетевой контроль параметров газотурбинного двигателя / В.И. Васильев, С.В. Жернаков, Л.Б. Уразбахтина // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – Москва : Радиотехника, 2001. – № 1. – С. 37–43.
9. Жернаков С.В. Контроль и диагностика параметров газотурбинного двигателя нейронными сетями // Нейрокомпьютеры: Разработка и применение. – Москва : Радиотехника, 2003. – № 8–9. – С. 51–66.
10. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – Москва : Финансы и статистика, 1989. – 393 с.
11. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Исследование зависимостей / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – Москва : Финансы и статистика, 1985. – 385 с.