

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

© 2012 Д.С. Легконогих

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Поступила в редакцию 10.10.2012

В статье приводится описание подхода к технической диагностике авиационных силовых установок с применением математического аппарата искусственных нейронных сетей. Применение такой системы диагностики позволит выявлять отказы двигателей на ранних стадиях и предотвращать их, что положительно скажется на уровне безопасности полетов.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель, техническая диагностика, искусственная нейронная сеть.

Безопасность полетов воздушных судов (ВС), одна из ключевых проблем авиации, во многом зависит от надежности работы их силовых установок (СУ). В свою очередь, надежная работа СУ и, в частности, газотурбинного двигателя (ГТД) обеспечивается целым комплексом мероприятий, среди которых важное место отводится диагностике его технического состояния. В настоящее время техническая диагностика ГТД, в широком смысле этого понятия, осуществляется только на земле инженерно-техническим составом, в распоряжении которого имеются соответствующие инструментальные средства и методический аппарат. Но большинство отказов, влияющих на безопасность эксплуатации ВС, зарождаются и проявляются именно в полете, что требует наличия эффективной бортовой системы диагностики, определяющей техническое состояние ГТД в режиме реального времени непосредственно на борту ВС. Трудность проведения диагностики СУ в автоматическом режиме в полете связана с высокой сложностью авиационных ГТД, обусловленной многопараметричностью, многосвязностью, нелинейностью протекающих в них процессов, многорежимностью применения, что требует значительных машинных и временных ресурсов.

На сегодняшний день двигатели 4-го 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 ГТД констатируют

уже произошедший факт отказа, не давая возможности экипажу его предотвратить. В современных условиях такие системы являются не достаточно 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 ГТД. Во-вторых, постоянное повышение удельных параметров вновь разрабатываемых ГТД происходит за счет снижения запасов прочности, устойчивости и приводит к работе двигателей на предельных режимах, что объективно повышает риски возникновения отказов. Таким образом, существует проблема создания новых «интеллектуальных» бортовых систем технической диагностики ГТД, способных эффективно распознавать зарождающиеся отказы и осуществлять прогнозирование технического состояния ГТД хотя бы на время, достаточное для безопасного завершения полета.

В данном аспекте диагностика заключается в последовательном решении двух задач: идентификации состояния ГТД в каждый момент времени по измеряемым датчиками параметрам и классификации состояния ГТД, т.е. определение соответствия состояния ГТД одному из классов (исправен, неисправен по причине отказа  $i$ -го агрегата, работоспособен и т.д.). Учитывая специфические особенности объекта диагностики (авиационного ГТД), 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:

*Легконогих Денис Сергеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры авиационных двигателей. E-mail: stav-leg@mail.ru*

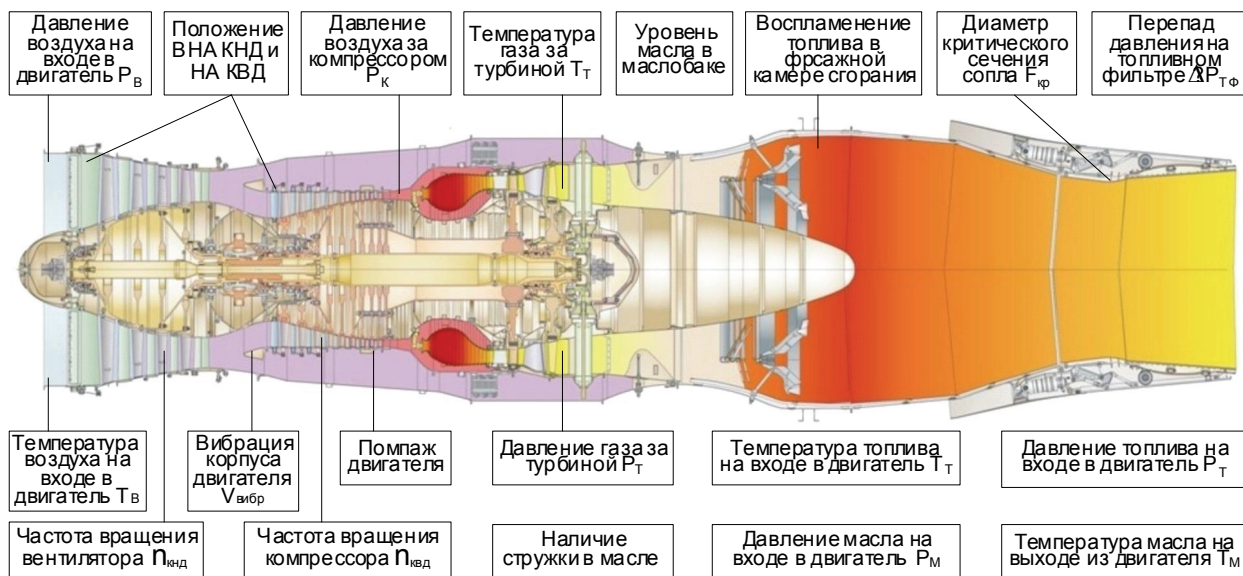


Рис. 1. Регистрируемые параметры ГТД

- они способны решать плохо формализуемые традиционными математическими методами задачи, к числу которых относится идентификация ГТД 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 ГТД параметрами.

Создание бортовой системы технической диагностики ГТД на основе ИНС, структурно-

логическая схема которой показана на рисунке 2, включает следующие этапы:

- идентификацию СУ, и ГТД в частности, как объекта диагностирования, т.е. создание ИНС (включающее выбор ее типа и архитектуры), входными значениями которой являются функциональные параметры ГТД, зарегистрированные датчиками, а выходными – параметры, определяющие состояние ГТД, с возможностью самообучения и коррекции своих параметров в процессе эксплуатации конкретного ГТД;

- создание обучающей выборки для ИНС на основе статистической информации о функциональных параметрах ГТД на всех режимах работы и наиболее вероятных отказах из опыта эксплуатации (для уже эксплуатируемых ГТД) или по результатам стендовых испытаний (для вновь разрабатываемых или модернизируемых ГТД);

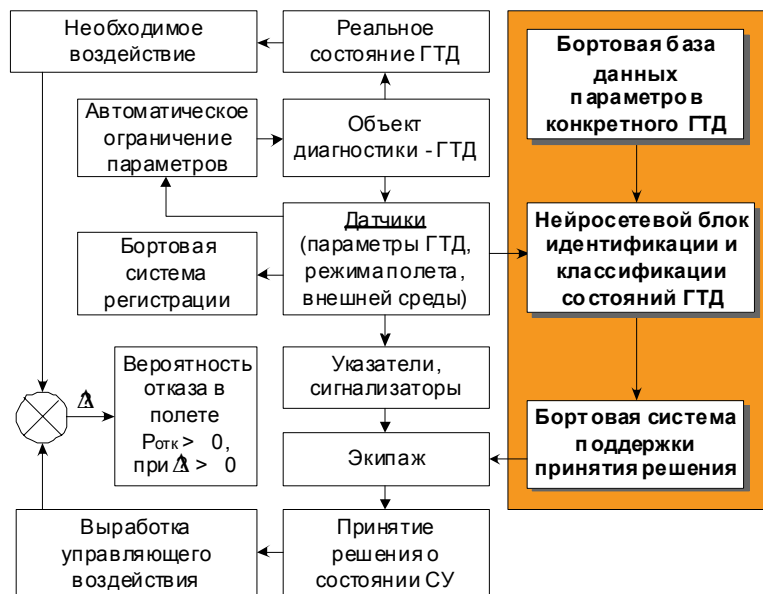
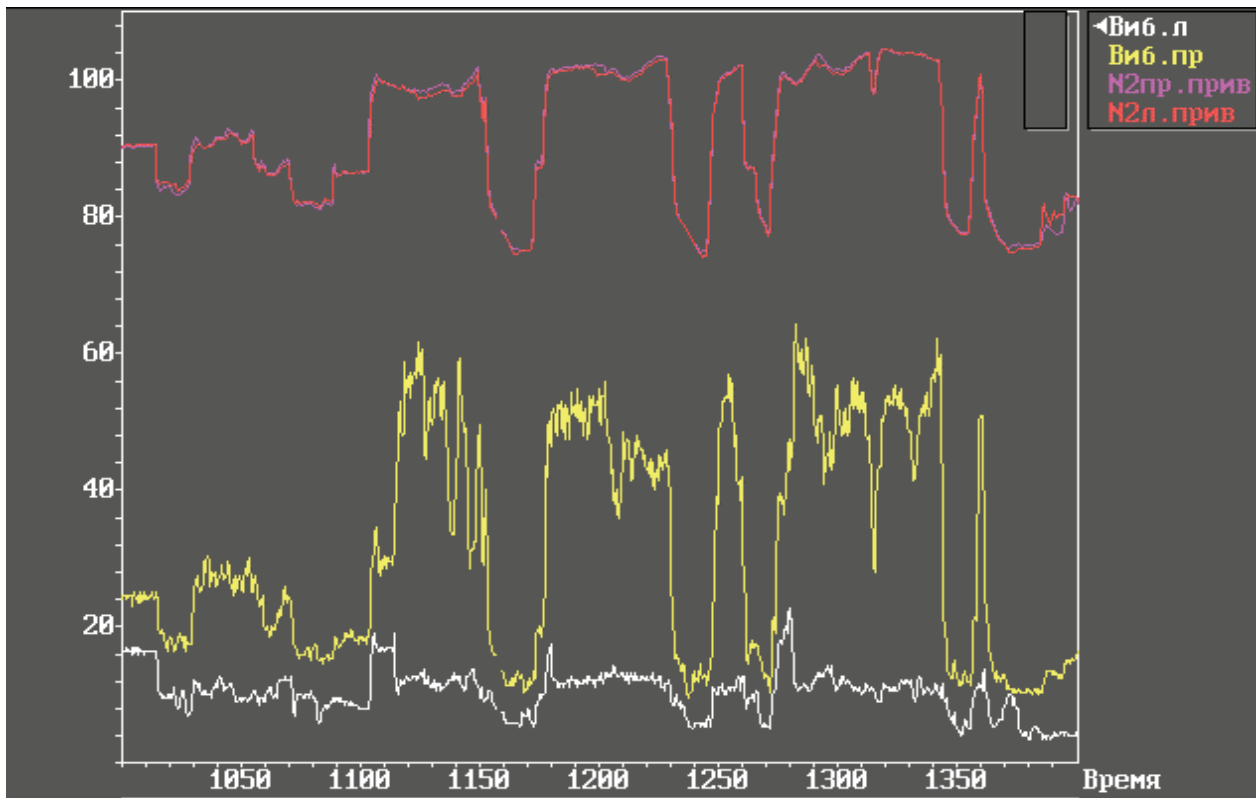


Рис. 2. Структурно-логическая схема системы диагностики ГТД



**Рис. 3.** Сигналограмма приведенных частот вращения роторов высокого давления и виброскорости корпусов ГТД в полете

- обучение ИНС с использованием обучающей выборки;

- проверку адекватности и корректности созданной и обученной ИНС путем моделирования режимов работы и отказов ГТД, не вошедших в обучающую выборку;

- аппаратную реализацию созданной ИНС в электронные микросхемы, интегрированные в систему автоматического управления ГТД.

Для создания полной обучающей выборки тестовых и тренировочных данных для ИНС необходим предварительный сбор параметров ГТД 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 ГТД. Этот параметр измеряется в течение всего времени работы ГТД и является достаточно информативным, в первую очередь с точки зрения состояния опор ГТД.

Рассмотрим данные системы объективного контроля ВС военного назначения, в состав СУ которого входят два турбореактивных двухконтурных двигателя с форсажными камерами сгорания. На рис. 3 показана сигналограмма одного

из этапов реального полета за отрезок времени, равный 400 сек. В верхней части показано изменение приведенных частот вращения роторов высокого давления левого и правого двигателей (в процентах) в течение выбранного этапа полета. Эти частоты практически совпадают. В нижней части показан уровень виброскорости корпусов ГТД (в мм/сек). И хотя для обоих двигателей изменение вибрации на качественном уровне повторяет изменение оборотов, количественно эти параметры значительно отличаются. Анализ данных системы объективного контроля показал, что действительно в течение полета летчику неоднократно выдавались разовые команды о превышении вибрации правого двигателя, что говорит о имеющейся неисправности.

Если представить значение виброскорости двигателей как функцию приведенной частоты вращения, то получим следующую картину (рис. 4). Видно, что для исправного левого двигателя имеем примерно линейную зависимость с незначительным возрастанием вибрации, тогда как для исправного правого двигателя вибрация существенно возрастает по закону, близкому к экспоненциальному. При этом для данного типа ГТД установлен предельный уровень, при котором выдается сообщение летчику о превышении вибрации, равный 50 мм/сек. Т.е. ниже этого уровня бортовая система контроля параметров не распознает неисправность, хотя превышение

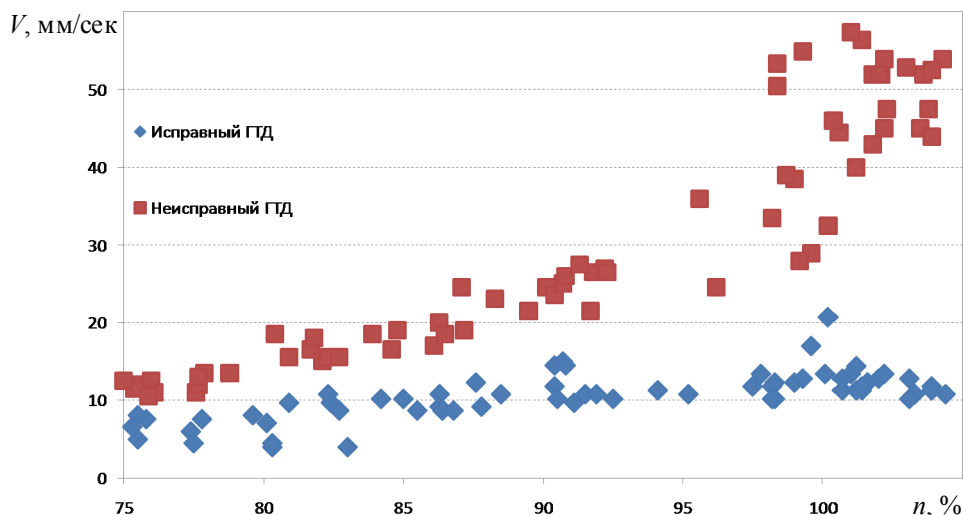


Рис. 4. Зависимость вибрации корпусов от приведенных частот вращения роторов ГТД

вибрации, по сравнению с исправным ГТД, начинается уже с оборотов малого газа. Приведенные зависимости затруднительно описать аналитически традиционными методами, так как существует большой разброс параметров, обусловленный, очевидно, влиянием и других факторов на величину вибрации, попытка учесть которые приведет к еще большему усложнению математических моделей.

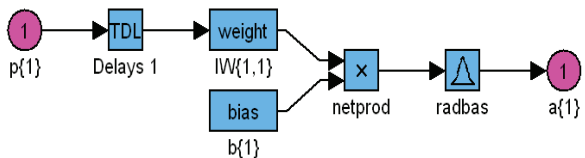
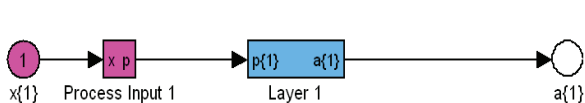
Моделирование ИНС было выполнено в программной среде MATLAB. Для решения задач классификации выбрана вероятностная ИНС с радиально-базисной функцией активации, при этом вполне достаточным оказалось наличие двух слоев (рисунок 5).

При моделировании ИНС было взято из указанного временного диапазона полета 134 значения виброскорости ГТД, половина из которых

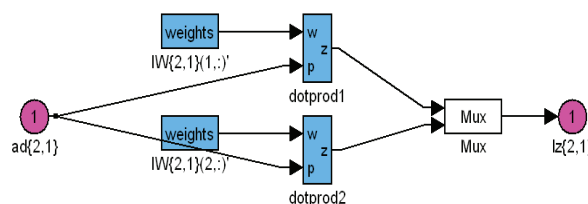
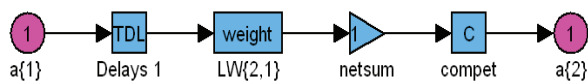
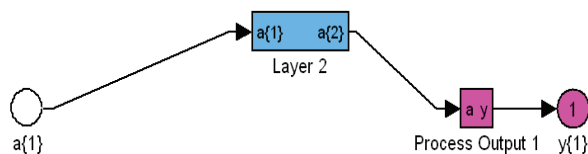
соответствовала левому исправному ГТД, а другая – правому неисправному. В процессе своей работы ИНС разбила все значения на 2 области, соответствующие исправному и неисправному состояниям, и совершенно правильно классифицировала их (рис. 6).

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- существующие системы контроля параметров ГТД не в полной мере удовлетворяют современным требованиям;
- создание бортовой системы технической диагностики силовой установки целесообразно с применением технологий «искусственного интеллекта» на основе ИНС;
- моделирование показало хорошие возможности ИНС решать задачи технической диагностики по идентификации ГТД как объекта диагнос-



(а) – первый слой ИНС



(б) – второй слой ИНС

Рис. 5. Модель вероятностной ИНС Probabilistik Neural Network, сгенерированная в среде MATLAB

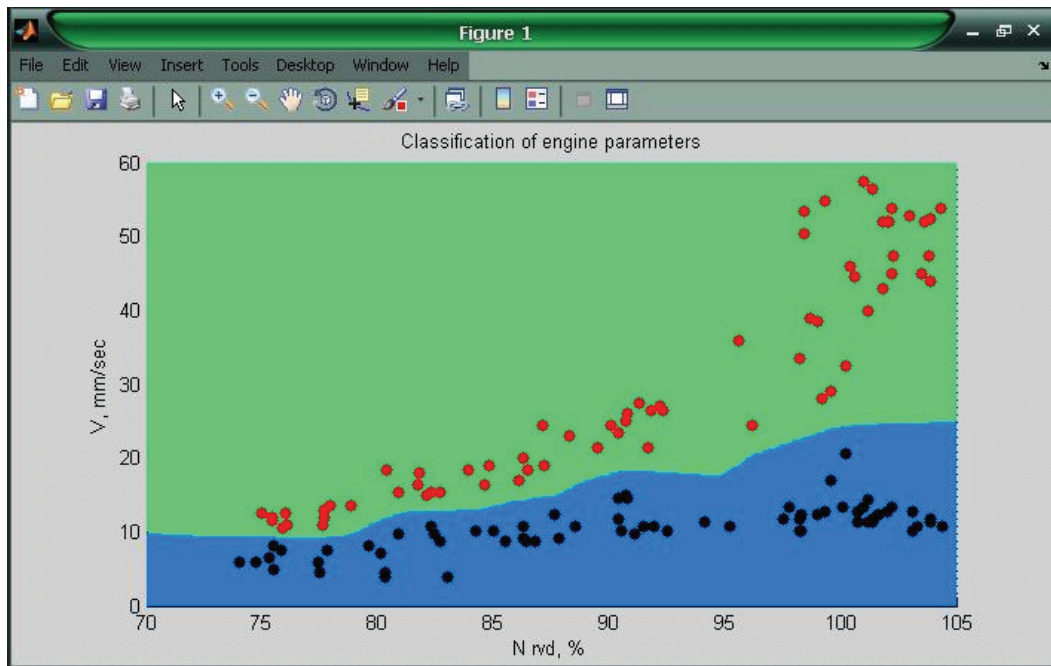


Рис. 6. Результат работы ИНС *Probabilistik Neural Network* в среде MATLAB

тирования и классификации его диагностических признаков по функциональным состояниям;

- применение такой системы на борту ВС, в отличие от существующей системы контроля параметров ГТД, позволит осуществлять диагностику технического состояния ГТД в полете в режиме реального времени и уже на ранних этапах распознать отказ и проинформировать об этом экипаж либо инженерно-технический состав, что явится залогом правильности принятия решения о возможности использования всего потенциала ГТД и повлечет повышение уровня безопасности полетов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабкин В.И., Скибин В.А., Солонин В.И. Вклад ЦИАМ в инновационное развитие авиационного двигателестроения // Научно-технический журнал «Двигатель». 2012. №1. С. 4-7.
2. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.
3. Нейрокомпьютеры в авиации / Баранов С.И., Валеев С.С., Васильев В.И. [и др.]. М.: Радиотехника, 1997. 496 с.
4. Надежность и техническая диагностика. Контроль и диагностирование авиационных силовых установок: учебное пособие / Горский А.И., Коршенко В.Н., Евдокимов А.И. [и др.]. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2007. 116 с.

#### USING OF NEURAL NETWORKS TECHNOLOGIES IN THE DIAGNOSTICS SYSTEMS OF AVIATION POWERPLANTS

© 2012 D.S. Legkonogikh

Military Scientific Center Air Force  
«Prof. N.E. Zhukovsky's and U.A. Gagarin's Military Air Academy», Voronezh

In this article describes the method of technical diagnostics of aviation turbojet engines with using of mathematical neural networks devices. This diagnostics system could prevent breakages of aviation turbojet engines and increase the level of flight safety.

Key words: aviation turbojet engine, technical diagnostics, synthetic neural network.