

УДК 621.455

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.В. Кретинин, канд. техн. наук, Д.В. Солдатов,

Воронежский государственный технический университет,

А.А. Шалыто, д-р техн. наук, проф.

*Санкт-Петербургский государственный университет информационных
технологий, механики и оптики,*

А.В. Шостак,

Воронежское КБ химавтоматики

Введение

Сложность рабочих процессов, протекающих в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), невозможность при современном состоянии науки надежного теоретического определения с необходимой точностью характеристик рабочих процессов, функционирования узлов и агрегатов двигателя делают неизбежными экспериментальные работы на модельных и натурных объектах. Объем этих работ определяет основные затраты на разработку ЖРД, достигающие сотен миллионов долларов [1].

В настоящее время все процессы в двигателе, для которых имеются физические и математические модели, просчитываются на ЭВМ. Вычислительная техника используется как на стадии проектирования, так и для управления испытаниями (управляемый эксперимент), а также при обработке и анализе результатов испытаний. Имитационные модели функционирования агрегатов позволяют анализировать их поведение в условиях реальной работы в составе двигательной установки, моделировать и выявлять различные отклонения от нормальной работы.

Создание системы автоматизированного анализа стендовых испытаний ЖРД является актуальной задачей процессов проектирования и доводки узлов и агрегатов двигателей для повышения достоверности оценки работоспособности изделий, оперативной диагностики функционирования и выработки проектных решений для ликвидации дефектов.

Использование методов автоматного программирования [2] позволяет создавать многопараметрические имитационные математические модели сложных технических систем, предназначенные для идентификации параметров функционирования и критериев работоспособности, и на их основе строить оптимизационную стратегию проектирования и доводки ЖРД, модернизации систем диагностики и аварийной защиты.

Особенность настоящей работы состоит в том, что в ней в отличие от других работ, например работы [2], автоматное программирование используется совместно с нейросетями.

1. Разработка конечного автомата для бустерного насосного агрегата

В современных схемах ЖРД уже сформировался основной набор агрегатов и параметров их функционирования, необходимый для достаточно надежного контроля работы двигательной установки. При огневых испытаниях двигателя регистрируется несколько сотен параметров его функционирования такие, как давления, расходы, температуры, частоты вращений валов турбонасосных агрегатов, вибрационно-пульсационные характеристики быстро меняющихся процессов и т.д.

Разрабатываемая в настоящей работе методика создания автоматов для моделирования агрегатов ЖРД иллюстрируется на примере моделирования функционирования бустерного турбонасосного агрегата горючего (БТНАГ) ЖРД РД0124 (рис. 1) на запуске. Этот агрегат используется для предварительного повышения давления на входе в турбонасосный агрегат (ТНА) с целью обеспечения бескавитационной работы насоса горючего.

БТНАГ конструктивно состоит из оседагонального насоса и гидротурбины. В качестве входных параметров (изменение которых влияет на функционирование БТНАГ и значения которых измеряются на стенде) будем использовать:

- давление компонента топлива на входе в насос p_0 (ДГДД – давление горючего до двигателя);
- давления компонента на входе в сопловой аппарат гидротурбины p_{c1} (ДГДС – давление горючего до соплового аппарата) и горючего после насоса p_{c2} (ДГПН – давление горючего после насоса).

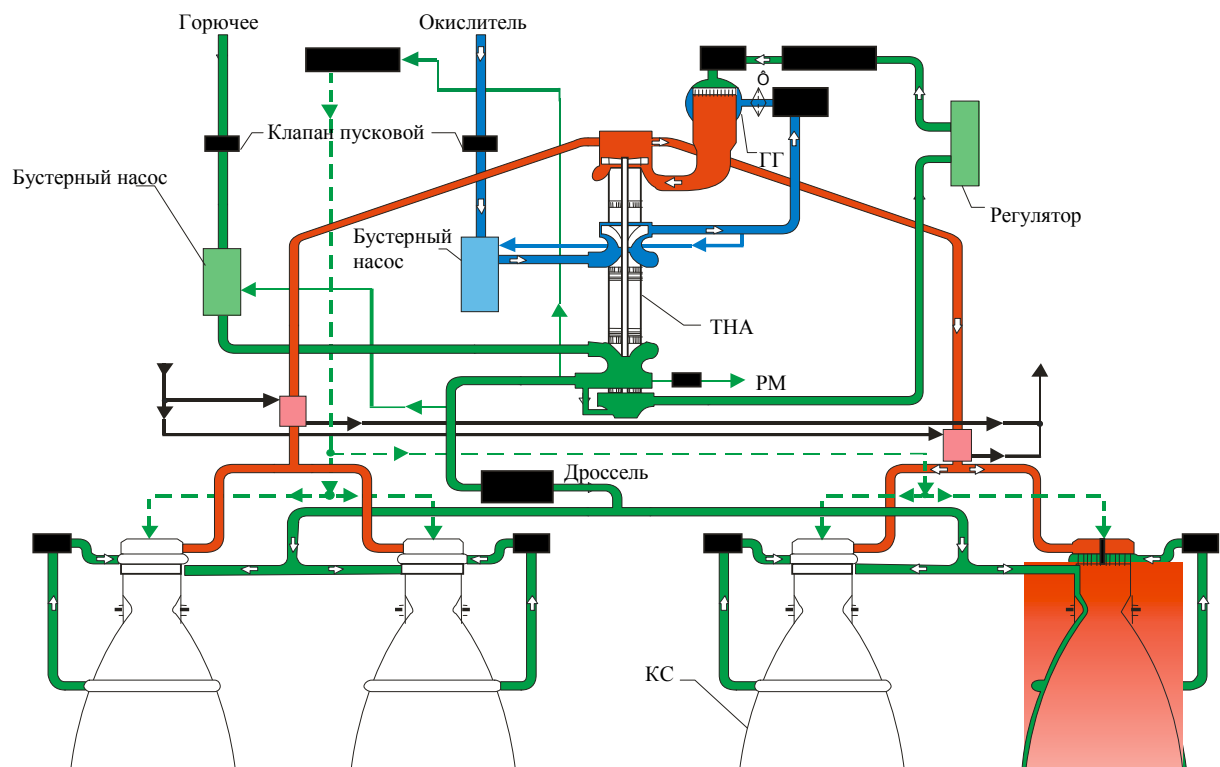


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема исследуемого двигателя

Для рассматриваемой конструктивной схемы привод турбины осуществляется по различным гидравлическим линиям в зависимости от режима функционирования агрегата:

- по команде «Зажигание» первоначально привод турбины заполняется горючим, вытесняемым азотом из пусковых баллонов, имеющим давление ДГДС;
- по мере увеличения частоты вращения турбонасосного агрегата (и, следовательно, увеличения давления топлива на выходе из насоса горючего турбонасосного агрегата) привод заполняется только частью этого горючего.

Выходными параметрами, характеризующими работоспособность агрегата, являются:

- давление компонента на выходе p_2 (ДГДН – давление горючего до насоса турбонасосного агрегата);
- число оборотов вала БТНАГ n (ОБГ – обороты бустера горючего).

При этом отметим, что параметр n часто используется в качестве контрольного параметра системы аварийной защиты ЖРД, а условные обозначения ДГДД, ДГДС, ДГПН, ДГДН и ОБГ применяются при экспериментальной отработке ЖРД РД-1024 в *Воронежском КБ химавтоматики*.

Бустерный турбонасосный агрегат можно отнести к **«реактивной» системе**, так как его работа зависит от событий, происходящих в системе двигательной установки в целом, и, в частности, от элементов системы, непосредственно соединенных с бустером.

Элементы системы по месту подключения можно разделить на входные (баки компонентов и источники энергии для привода турбины) и выходные (например, турбонасосный агрегат), а также различные элементы системы управления и запуска.

Состояния этих элементов определяют состояние бустерного насосного агрегата в каждый момент времени. Следовательно, для управления бустером можно использовать систему логического управления.

Для создания модели бустера используется автоматный подход [2], так как он позволяет исключить появление непредусмотренных состояний,

которые могут привести к непредсказуемым последствиям. Для переходов между состояниями бустера в соответствии с подходом, изложенным в работе [2], используется единственная многозначная переменная Y с определенными заранее значениями. Поэтому появление непредсказуемых состояний в программе практически невозможно.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в технологии автоматного программирования [2–6], при функционировании БТНАГ необходимо выделить состояния, в которых он может находиться.

В ходе анализа графических зависимостей характеристик агрегата выяснилось, что изменение оборотов вращения вала бустера во времени имеет ярко выраженные участки (рис. 2).

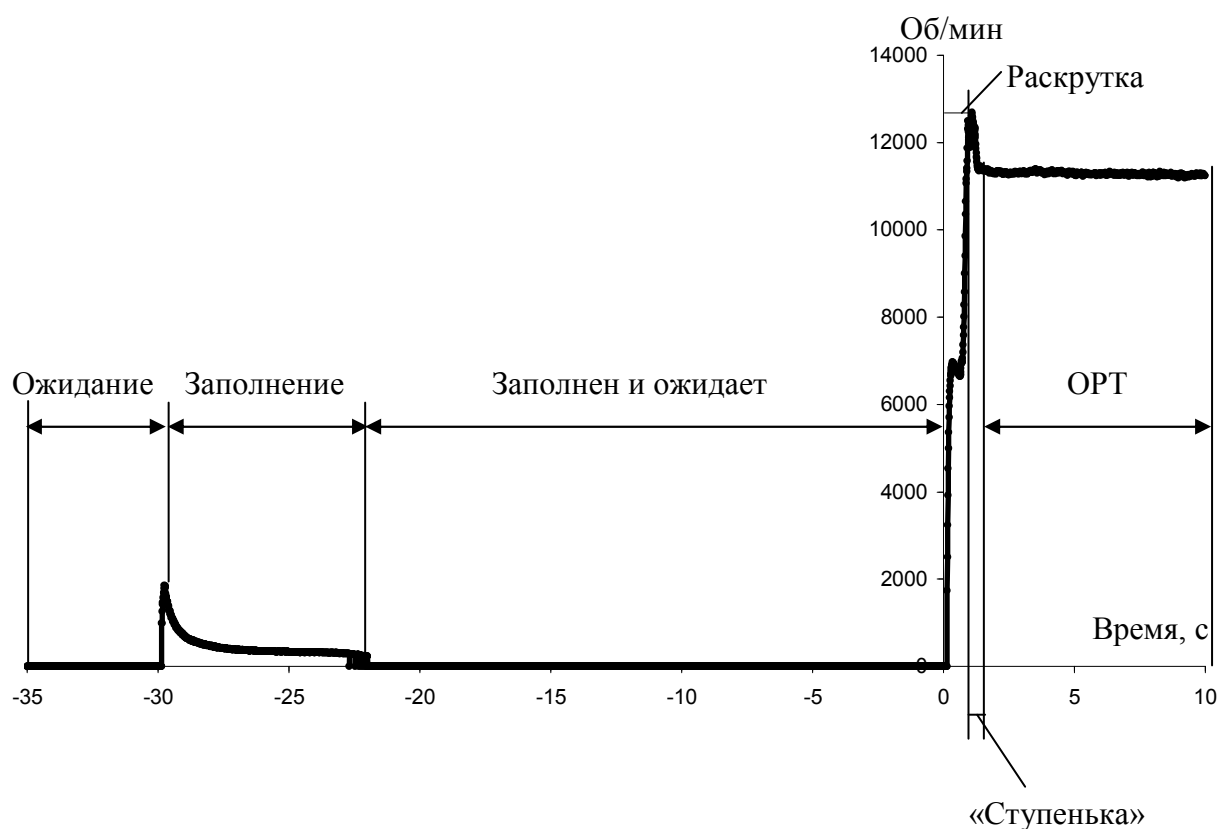


Рис. 2. Изменение оборотов БТНАГ во времени и соответствующие ему состояния

Поэтому были выделены семь состояний функционирования БТНАГ на запуске, которым присвоены следующие наименования:

0. *Ожидание* – горючее отделено от магистралей двигателя мембранными пусковыми клапанами. При этом полость горючего вакуумируется из космоса.
1. *Заполнение горючим* (авторотация) – после срабатывания пиропатронов происходит прорыв мембраны пускового клапана горючего, линия вакуумирования закрывается и горючее заполняет двигательные магистрали.
2. *Заполнен горючим и ожидает* – в этом состоянии бустер находится вплоть до прохождения команды *Зажигание*.
3. *Раскрутка БТНАГ* – прошла команда *Зажигание*.
4. *Ступенька* - состояние характеризуется повышенными оборотами вала БТНАГ по сравнению с оборотами на основном режиме тяги.
5. *Основной режим тяги* – состояние наступает при стационарном поведении параметров функционирования бустера.
6. *Аварийное состояние* – диагностируется при отличном от экспериментального сочетания входных или выходных параметров бустера.

Классификация текущего состояния БТНАГ осуществляется с использованием шести нейронных сетей, которые по значениям входных параметров ДГДД, ДГДС и ДГПН формируют классификационный признак.

По значениям откликов шести нейросетей формируется шестизначная переменная Y , определяющая переходы между состояниями агрегата: значение этой переменной 100000 определяет переход в состояние “0”. При этом первая нейросеть на выходе выдала единицу, а все остальные нейросети выдали ноль, так как не распознали вектор входных параметров, как относящийся к какому-либо состоянию. Значение 010000 соответствует переходу к состоянию “1”, значение 001000 – к состоянию “2” и т.д.

При любом другом значении переменной Y осуществляется переход к состоянию “6”.

Кроме того, для каждого идентифицированного состояния строятся нейронные сети – так называемые «портреты» функционирования. Они применяются для анализа экспериментальных данных в каждом состоянии агрегата и диагностирования дефектов. Выход сети может принимать значения «В норме», «Завышен» или «Занижен».

Опишем назначение сетей.

1. Нейронная сеть, оценивающая (по значениям входных параметров ДГДД, ДГДС, ДГПН, ОБГ) текущее состояние агрегата. На ее выходе рассчитывается диагностический признак: нормальное функционирование по оборотам бустера горючего, занижено или завышено.
2. Нейронная сеть, оценивающая (по значениям входных параметров ДГДД, ОБГ, ДГДН) текущее состояние агрегата. На ее выходе рассчитывается диагностический признак: нормальное функционирование по ДГДН, занижено или завышено.

В результате были созданы схема связей конечного автомата, моделирующего работу БТНАГ (рис. 3), и соответствующий граф переходов (рис. 4).

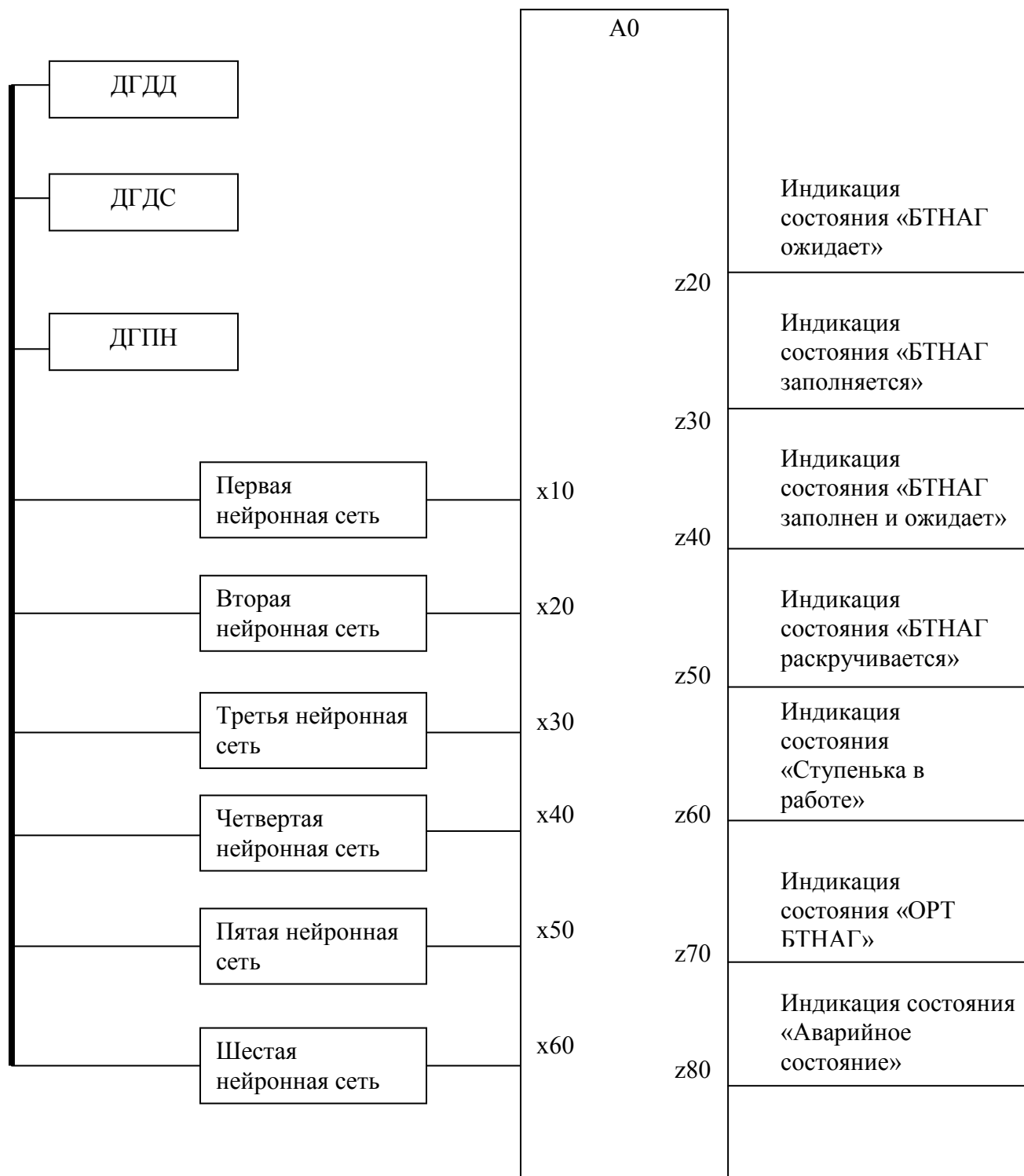


Рис.3. Схема связей конечного автомата A0, моделирующего БТНАГ

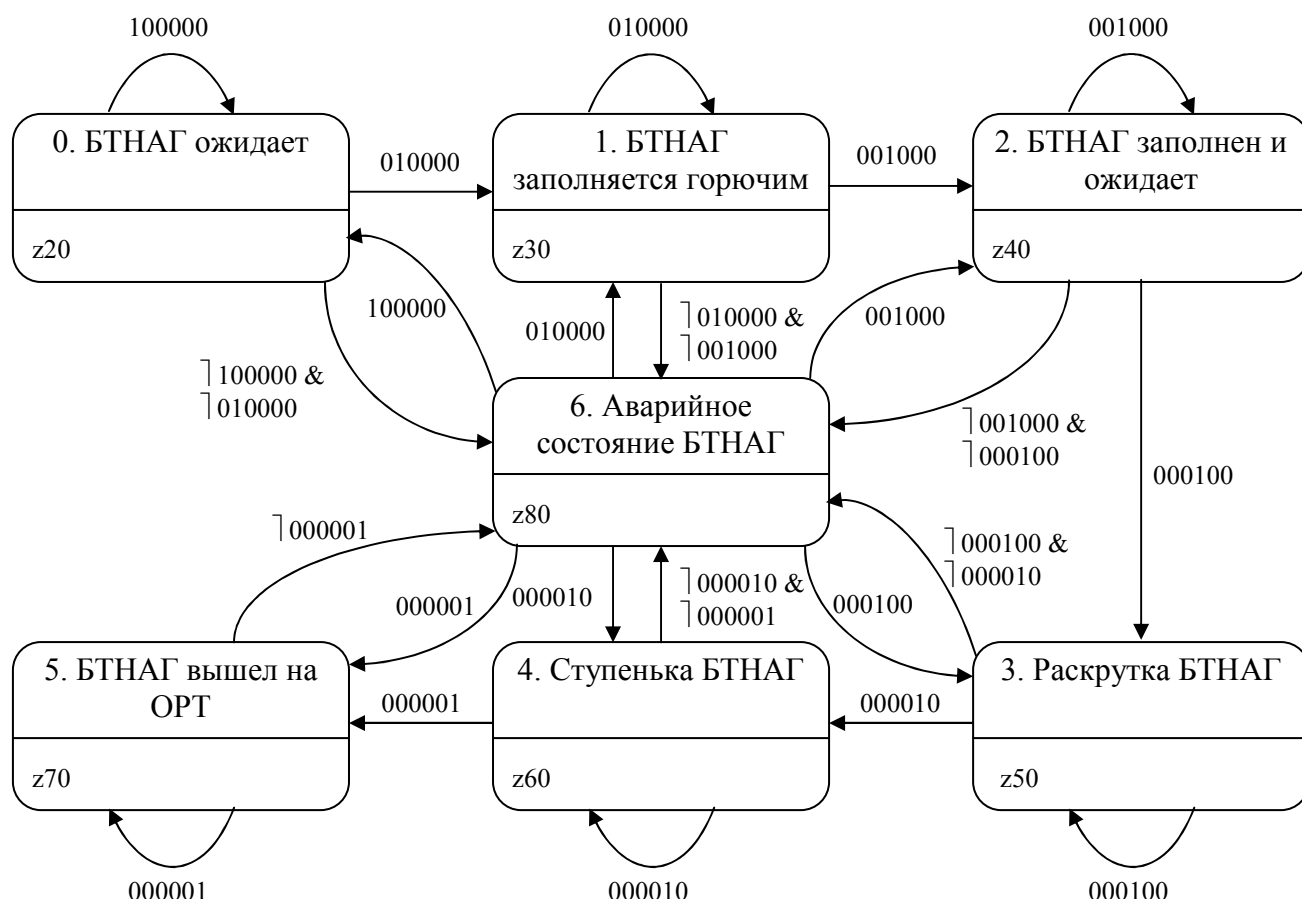


Рис. 4. Граф переходов автомата А0, моделирующего БТНАГ

Экспериментальные данные, получаемые при огневых испытаниях от датчиков с промежутком времени в 0,01 с, используются нейронными сетями в качестве входных воздействий. В каждый момент времени данные с датчиков подаются на соответствующие входы нейронных сетей. После срабатывания всех шести нейросетей формируется переменная Y , которая и определяет, перейдет ли автомат в новое состояние или нет. Если автомат на предыдущем шаге перешел в какое-либо состояние, а на текущем шаге выходы сетей остались прежними, то новый переход не происходит. Недопустимыми является комбинация выходов нейронных сетей, при которой присутствуют две и более единицы, а также все нули. В результате этого автомат переходит в аварийное состояние “6”.

2. Классификация входных воздействий с использованием нейросетей

Функционирование бустерного насосного агрегата и его характеристики работоспособности определяются сочетанием входных параметров, величина которых зависит от взаимосвязанного функционирования других агрегатов и элементов двигателя. Давление горючего на входе в бустерный насос ДГДД определяется уровнем компонента в баке и давлением наддува в нем и, в принципе, должно оставаться постоянным во время работы ЖРД.

Это не относится к прорыву мембраны пускового клапана горючего, который происходит практически мгновенно, так как здесь образуются колебания давления жидкости гидроударного характера. Величина давления до соплового аппарата гидротурбины ДГДС определяется давлением азота, который вытесняет горючее из пусковых баллонов. Отсюда компонент подается не только на привод турбины, но и по другим гидравлическим магистралям поступает в пусковые ампулы газогенератора и камеры ЖРД. Величина ДГДС зависит от функционирования этих элементов двигателя. Привод гидротурбины бустера на всех остальных режимах работы, кроме запуска, осуществляется частью расхода компонента, отбираемого после первой ступени насосного агрегата горючего, и характеризуется величиной ДГПН, определяемой характеристиками турбонасосного агрегата.

Разрабатываемый автомат *реактивной системы* бустера должен анализировать сочетание входных параметров и однозначно определять его состояние функционирования.

Структура применяемых нейронных сетей

Все шесть нейронных сетей, разработанных для классификации входных воздействий, являются однотипными. В качестве структуры сетей выбран персептрон с одним скрытым слоем, тремя входами и одним выходом. Входами нейросетей являются параметры ДГДД, ДГДС и ДГПН, а выходом каждой из них – классификационный признак, который может

принимать значения ноль или единица. Обучающая выборка экспериментальных данных для всех нейросетей одинакова. Исключение составляет выходной массив. Массивы входных параметров заполняются непосредственно из протоколов огневых испытаний ЖРД. Далее в соответствии с графиком изменения числа оборотов вала БТНАГ определяются временные границы, определяющие пребывание автомата во всех указанных выше состояниях, кроме аварийного. При этом рассматривается функционирование бустера вплоть до выхода на основной режим тяги (ОРТ).

В качестве входного параметра нейросетей время не используется. Оно необходимо для выделения векторов входных параметров, которые являются граничными для каждого состояния.

Далее для каждой сети заполняется массив выходных значений следующим образом: в пределах того состояния, для которого формируется нейросеть, выходной параметр принимает значение равное единице, а все остальные значения выходного массива принимаются равными нулю. Кроме того, в пределах классифицируемого данной сетью состояния векторы входных параметров искажаются случайным образом. Полученные дефектные значения входов добавляются в обучающую выборку. Выходом сети в этом случае также будет ноль.

Принято допущение, что выходной параметр является вещественной переменной для осуществления возможности использования градиентных методов оптимизации при обучении нейросетей. Поэтому программная реализация нейросетевой вычислительной структуры предусматривает преобразование вещественного выхода в целочисленный диагностический признак, производимый по обычным правилам округления.

На рис. 5 представлена вычислительная структура, применявшаяся во всех шести нейронных сетях с целью определения диагностического признака.

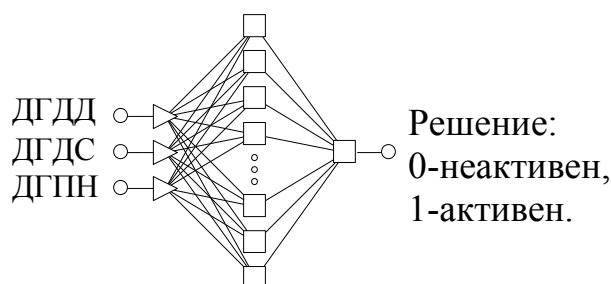


Рис. 5. Нейросеть для классификации входного воздействия

Из выходов нейросетей формируется многозначная автоматная переменная Y для классификации переходов между состояниями функционирования бустерного агрегата.

После выделения состояний и осуществления автоматных переходов анализируется внутренняя работоспособность самого бустерного агрегата. При этом выходные параметры БТНАГ в зависимости от очередного вектора входных переменных сравниваются с эталонным значением, рассчитываемым согласно имитационной модели функционирования бустера. В случае их расхождения выдается соответствующее сообщение.

3. Вычислительная структура нейросетевых моделей функционирования агрегатов ЖРД

Для построения более или менее реалистичных моделей механических, гидравлических, тепловых и других систем ЖРД, которые основаны на известных физических законах, необходимо использовать математические абстракции и прибегать к аппроксимации. Кроме того, получающиеся системы уравнений обычно не могут быть решены без дальнейших упрощений. Естественно, все эти упрощения вводятся на основе эксперимента и так, чтобы результаты не выходили за его рамки. Альтернативный подход состоит в использовании при моделировании результатов экспериментов, которые уже проведены или проводятся в процессе текущей отработки изделий, а также в построении достоверной

имитационной модели только на основе экспериментальных данных. Она для любого входного вектора данных из допустимой и известной области определения будет рассчитывать значения используемого критерия, что и требуется от математической модели функционирования.

Создание нейросетевой имитационной математической модели, воспроизводящей функциональную зависимость критериев работоспособности от входных параметров в эксплуатационных пределах их изменения, позволяет повысить качество анализа экспериментальных данных и своевременно диагностировать дефекты и определять проблемы функционирования. Одним из основных требований к создаваемым многопараметрическим портретам функционирования агрегатов ЖРД является высокая точность модельных результатов для снижения допусков на определение параметров работоспособности при диагностировании и контроле технического состояния [7].

Для моделирования зависимости частоты вращения ротора БНА на стационарных и переходных режимах работы используется нейросеть с одним скрытым слоем (рис. 6), который содержит 16 нейронов.

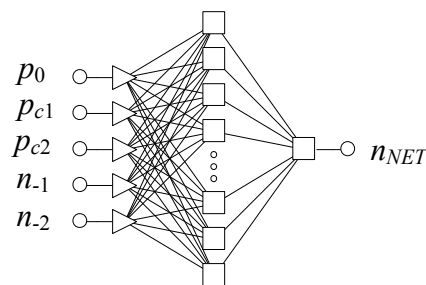


Рис. 6. Структура нейросетевой модели $n = f_{NET}(p_0, p_{c1}, p_{c2}, n_{-1}, n_{-2})$

Входные параметры нейросетевой модели $n = f_{NET}(p_0, p_{c1}, p_{c2}, n_{-1}, n_{-2})$ дополнены значениями n_{-1} и n_{-2} (числом оборотов ротора в моменты времени $t_i - \Delta t$ и $t_i - 2\Delta t$) для моделирования нестационарных режимов работы.

Обучающая выборка формируется из результатов огневых испытаний четырех вариантов двигателей одного типа с идентичной конструкцией БТНАГ. Размерность массивов результатов по каждому из параметров составляет для одного испытания 4500 значений, измеренных на стенде с интервалом времени $\Delta t = 0,01 \text{ с}$. Согласно циклограмме работы ЖРД величина t не превосходит 10 с. Таким образом, разрабатываемая модель может применяться для анализа функционирования БТНАГ на запуске вплоть до выхода на основной режим тяги.

В результате обучения нейронной сети достигнута точность аппроксимации $E_r = 0.1$. При этом величина ошибки приближения числа оборотов $n = f_{NET}(p_0, p_{c1}, p_{c2}, n_{-1}, n_{-2})$ по отдельным экспериментальным точкам не выходит из интервала $\Delta \in [-25; +25] \text{ об/мин}$.

На рис. 7 приведен сравнительный анализ нейросетевой функции отклика числа оборотов бустера с результатами огневых испытаний для переходного процесса выхода БТНАГ а основной режим тяги [7].

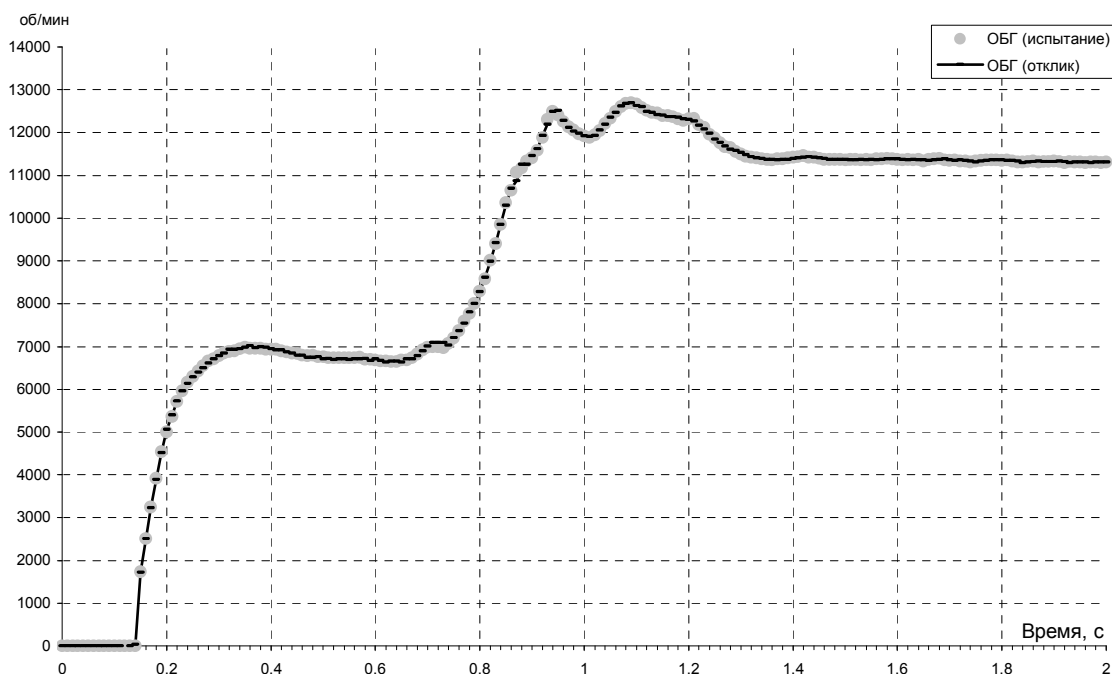


Рис. 7. Сравнение результатов работы нейронной сети и реальной работы БТНАГ

Разработанная нейронная сеть функционирования БТНАГ позволяет автоматизировать анализ огневых испытаний агрегата для повышения качества процессов диагностики и контроля технического состояния изделия.

Нейросетевой портрет бустера функционирует согласно следующему алгоритму.

На вход нейронной сети подаются величины входных параметров, регистрируемые датчиками во время огневых испытаний. Выход сети рассчитывается по формуле

$$n_{NET}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{16} w_j \sigma_j(\mathbf{x}) - b_0,$$

где $\mathbf{x}$ – вектор входов, соответствующий определенному моменту времени (в нашем случае пятимерный $(p_0, p_{c1}, p_{c2}, n_{-1}, n_{-2})$);

$\sigma(\mathbf{x})$ – функция активации;

w_j – веса соединений выходного нейрона с j -ым нейроном скрытого слоя;

b_0 – порог выходного нейрона;

j – номер нейрона в скрытом слое.

В качестве функции активации используется логистическая сигмоида (функция Ферми):

$$\sigma_j(\mathbf{x}) = \frac{1}{1 + e^{-t_j(\mathbf{x}, b_j)}}.$$

Здесь b_j — порог j -го нейрона скрытого слоя, а функция $t_j(\mathbf{x}, b_j)$ имеет вид:

$$t_j(\mathbf{x}, b_j) = \sum_{i=1}^5 v_{ij} \cdot x_i - b_j,$$

где v_{ij} — вес соединения j -го нейрона скрытого слоя с i -ым входом.

При величине измеренного числа оборотов n^i в момент времени t^i , удовлетворяющему неравенству

$$n_{NET}^i - \Delta_{\min} < n^i < n_{NET}^i + \Delta_{\max},$$

где $\Delta_{\min}, \Delta_{\max}$ – максимальные допуски отклонения параметра числа оборотов ниже и выше эталонного, определяемого согласно нейросетевой модели функционирования, выдается сообщение о «нормальной работе» БНА, в противном случае проходит сигнал о том, что «обороты завышены» или «обороты занижены» [8].

4. Программная реализация конечного автомата БТНАГ

При тестировании автомата осуществлялась проверка его работоспособности для различных комбинаций входных и выходных переменных. В соответствии с принципами автоматного программирования была разработана компьютерная программа, производящая автоматический анализ работы БТНАГ, пользовательский интерфейс которой приведен на рис. 8.

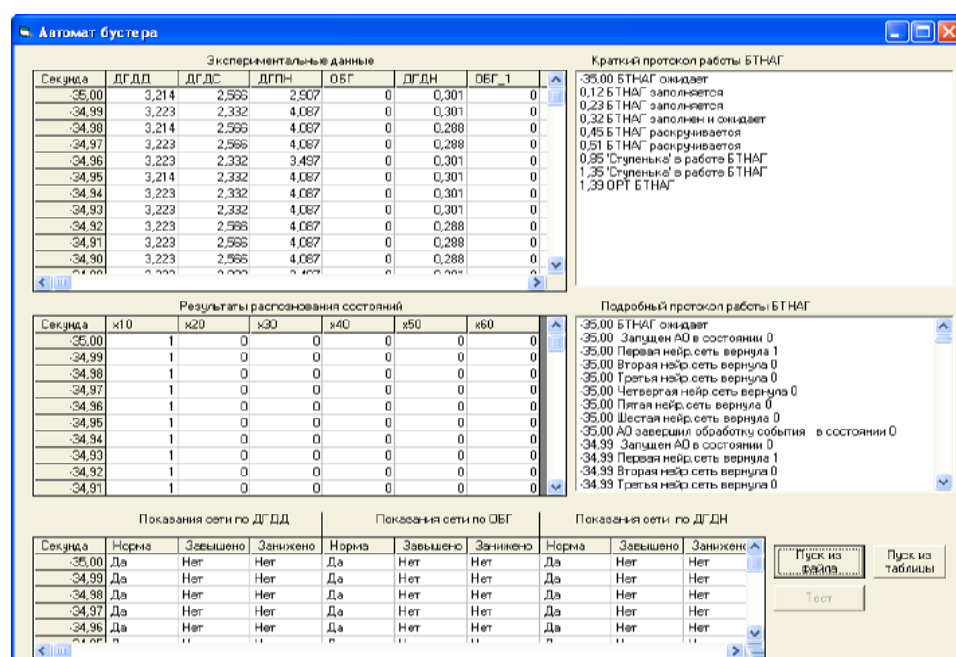


Рис. 8. Интерфейс разработанной программы

Одно из достоинств технологии автоматного программирования – автоматическое создание протокола работы автомата. Это позволяет проводить автоматизированный анализ работоспособности агрегата и диагностировать дефекты функционирования. На рис. 8 представлены результаты работы программы, моделирующей функционирование бустерного насосного агрегата в случае, когда входные параметры диагностируются нейросетями, как относящиеся к одному из неаварийных состояний. При этом выходные параметры находятся в соответствии с созданными «портретами» функционирования. В реальных условиях

возможны отклонения параметров от нормы. Эти отклонения могут привести к нештатным ситуациям в работе всей двигательной установки.

Для тестирования разработанного конечного автомата при функционировании в условиях отклонений входных и выходных переменных (ДГДС, ДГПН, ДГДД, ОБГ) в массивы экспериментальных данных были внесены искусственные ошибочные данные по произвольному параметру функционирования. Автомат БТНАГ в этом случае диагностирует дефекты и отражает их в протоколе. Шесть нейронных сетей, влияющих на формирование автоматной переменной перехода между состояниями Y , при появлении нераспознанных сочетаний входных воздействий переводят автомат БТНАГ в состояние 6 («аварийное» состояние). Кроме того, если выходные параметры бустера ДГДН и ОБГ не соответствуют нейросетевым моделям функционирования, то в этом случае также диагностируется «аварийное» состояние.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты демонстрируют возможность применения автоматного подхода для моделирования функционирования агрегатов ЖРД с целью использования в системах автоматизированного анализа результатов огневых испытаний ЖРД. Очевидным преимуществом используемого подхода является высокая вероятность обнаружения и локализации дефектов при доводке проектируемого ЖРД или для определения технического состояния серийного ЖРД при контрольно-технологических испытаниях.

Список литературы

1. **Основы расчета** и теории жидкостных ракетных двигателей /А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. М.: Высшая школа. 1993. – 437 с.

2. **Шалыто А.А.** SWITCH–технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука. 1998. – 628 с.

<http://is.ifmo.ru/books/switch/1>

3. **Дейкстра Э.** Взаимодействие последовательных процессов //Языки программирования. М.: Мир. 1972, с. 9 – 86.

4. **Брукс Ф.** Мифический человек – месяц, или как создаются программные системы. СПб.: Символ, 2000. – 304 с.

5. **Герр Р.** Новый поворот // PC Magazine/RE. 1998. № 10, с. 88-90.

<http://is.ifmo.ru/recensions/gerr/>

6. **Шалыто А.А.** Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. – 773 с.

http://is.ifmo.ru/books/log_upr/1

7. **Кретинин А.В.** Разработка нейросетевых портретов функционирования агрегатов ЖРД для автоматизированного анализа результатов испытаний // Автоматизация и современные технологии. 2004, № 9, с. 24-30

8. **Кретинин А.В., Солдатов Д.В.** Программный модуль «Нейросетевая модель бустерного насосного агрегата ЖРД» // Государственный фонд алгоритмов и программ РФ. № 50200400528 от 21.05.04.