

УДК 532.54

# Диагностирование аварийных состояний турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя

Кретинин А.В., Солдатов Д.В., Шалыто А.А., Шостак А.В.

## Введение

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), представляющих собой сложную техническую систему, состоящую из множества агрегатов, взаимодействующих между собой, необходима быстрая реакция контролирующей системы на процессы, происходящие в одном из самых ответственных и нагруженных агрегатов – турбонасосном агрегате (ТНА). При использовании нейронных сетей появляется возможность раннего диагностирования аварийных ситуаций, что позволяет снизить последствия аварии и предотвратить разрушение двигателя при проведении огневых испытаний.

Включение в число диагностических параметров максимального количества измеряемых на стенде физических величин, в том числе первых и вторых производных этих величин по времени, позволяет не только повысить качество диагностических алгоритмов, но и получить удобную графическую иллюстрацию логики распознавания нейросетями аварийных ситуаций.

В качестве примера на рис. 1–4 представлены зависимости первых производных от вторых производных для различных диагностических параметров, измеряемых во время огневых испытаний ЖРД.

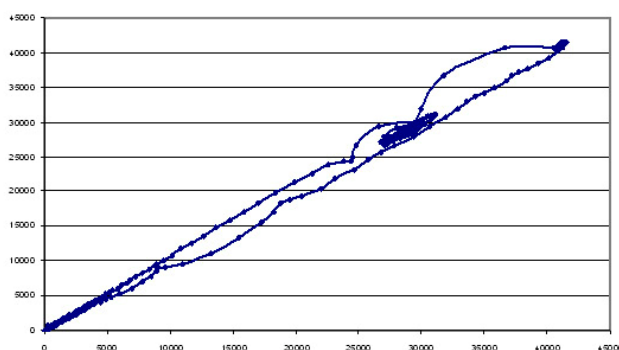


Рис. 1. Параметрическая зависимость первой производной от второй производной числа оборотов ротора ТНА при успешном испытании

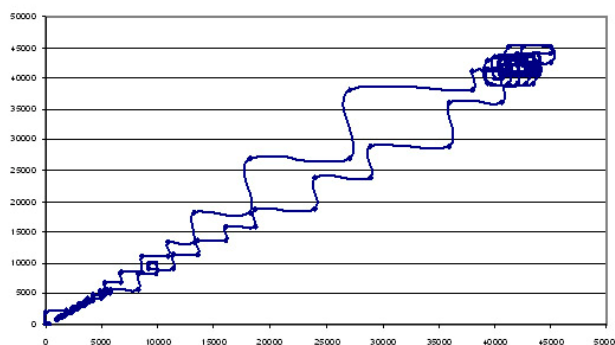


Рис. 2. Параметрическая зависимость первой производной от второй производной числа оборотов ротора ТНА при аварийном испытании

Для величины числа оборотов ротора ТНА видно резкое различие графических зависимостей при успешном испытании и аварийном. На аварийном графике изменения носят резкий, скачкообразный характер.

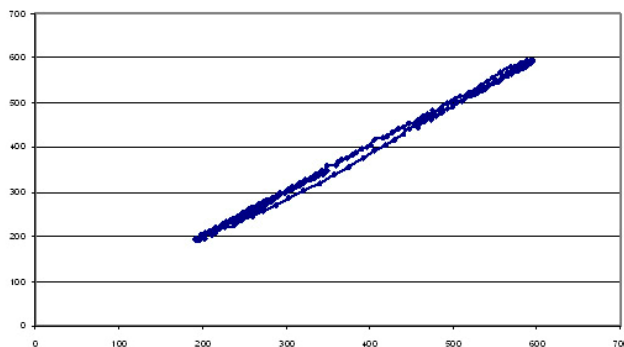


Рис. 3. Параметрическая зависимость первой производной от второй производной по температуре окислительного газа после турбины ТНА при успешном испытании

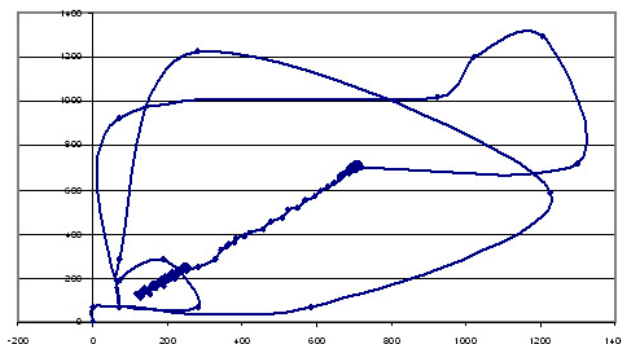


Рис. 4. Параметрическая зависимость первой производной от второй производной температуры окислительного газа после турбины ТНА при аварийном испытании

Для температуры окислительного газа после турбины картина еще более наглядная. В то время как для успешного испытания температура плавно нарастает и плавно снижается, то при аварийном испытании ее значения располагаются хаотично во всем диапазоне. Для каждого идентифицированного состояния строятся нейронные сети – так называемые «портреты» функционирования [2]. Они применяются для анализа экспериментальных данных в каждом состоянии агрегата и диагностирования дефектов. Данный подход может использоваться для диагностирования турбонасосного агрегата, который является «реактивной» системой, так как его работа зависит от событий, происходящих в двигательной установке [3]. Элементы ракетного двигателя по месту соединения их с турбонасосным агрегатом можно разделить на входные (газогенератор, бустерные насосные агрегаты) и выходные (например, камера сгорания), а также различные элементы системы управления и запуска. Состояния этих элементов определяют состояние турбонасосного агрегата в каждый момент времени.

Для создания нейросетевой модели ТНА используется автоматный подход, так как он позволяет исключить появление непредусмотренных состояний. Для трассировки переходов между состояниями ТНА в соответствии с методом, изложенным в работе [3], используется многозначная переменная  $Y$  с определенными заранее значениями. В соответствии с рекомендациями, изложенными в технологии автоматного программирования [3], при функционировании ТНА необходимо выделить состояния, в которых он может находиться. В ходе анализа графических зависимостей характеристик агрегата выяснилось, что изменение оборотов вращения ротора ТНА во времени имеет ярко выраженные участки. Поэтому были выделены характерные состояния функционирования ТНА, которым присвоены следующие наименования:

1. *Ожидание* – горючее отделено от магистралей двигателя мембранными пусковыми клапанами. При этом полость горючего вакуумируется из космоса.
2. *Запуск* – прошла команда *Зажигание*.
3. *Основной режим тяги (ОРТ)* – состояние наступает при стационарном поведении параметров функционирования ТНА.
4. *Останов* – прошла команда *Останов*.

Кроме того, вводится *Аварийное состояние*, которое диагностируется при отличном от экспериментального сочетании входных или выходных параметров ТНА, которое разделяется на ряд состояний, классифицирующих характер отказа [1]. На основании опыта предыдущих испытаний двигателя *РД0124* был выделен ряд возможных аварий.

#### **1. Разрушение шарикоподшипников.**

Сигналы датчиков, определяющие этот отказ:

- а). Повышение вибраций:
  - вибрации корпуса насоса окислителя;
  - вибрации корпуса насоса горючего;
  - вибрации клапана автомата разгрузки;
- б). Снижение частоты вращения ротора (увеличение механических потерь).
- в). Снижение давления на выходе насосов окислителя (горючего).
- г). Если разрушение шарикоподшипников происходит в насосе окислителя, то это сопровождается возгоранием и полным разрушением агрегата.

Сигналы приведены в порядке появления их при испытаниях двигателя.

#### **2. Кавитация в насосе окислителя (горючего).**

Сигналы датчиков, определяющие этот отказ:

- а). Падение давления до насосов окислителя (горючего) ниже допустимого.
- б). Падение давления на выходе насоса окислителя (горючего) – снижение мощности насоса.
- в). Повышение частоты вращения ротора.

Для насоса окислителя и газогенератора, работающего с избытком окислителя, или насоса горючего и газогенератора, работающего с избытком горючего, температура в газогенераторе возрастает.

- г). Понижение частоты вращения ротора из-за снижения мощности турбины. Для насоса окислителя и газогенератора, работающего с избытком горючего или насоса горючего и газогенератора, работающего с избытком окислителя, температура в газогенераторе падает

#### **3. Разрушение рессоры.**

Сигналы датчиков, определяющие этот отказ:

- а). Падение давления на выходе насоса окислителя (горючего).
- б). Падение частоты вращения ротора насоса горючего.

Температура газа в газогенераторе ведет себя аналогично подпунктам в), г) пункта 2.

#### **4. Поломка турбины.**

- а). Частота вращения ротора турбины падает.
- б). Давления на выходе насосов окислителя и горючего падают.
- в). Температура окислительного газа после турбины возрастает.

#### **5. Поломка рабочих колес насоса окислителя или горючего.**

- а). Падение давления на выходе насосов окислителя или горючего.
- б). Рост частоты вращения ротора турбины.

Температура газа в газогенераторе ведет себя аналогично подпунктам в), г) пункта 2.

#### **6. Нарушения осевой разгрузки.**

- а). Рост или падение давления в полости автоматического устройства осевой разгрузки.
- б). Затирания в уплотняющих элементах с плавающими кольцами приводит к уменьшению утечек, а увеличение зазоров в уплотняющих элементах с плавающими кольцами приводит к увеличению утечек, а также изменению КПД насоса.

В соответствии с отказами, приведенными выше, вводятся следующие состояния конечного автомата: 5. Поломка автомата осевой разгрузки (АОР). 6. Поломка подшипников. 7. Поломка рабочего колеса насоса окислителя («О»), горючего («Г»). 8. Поломка турбины. 9. Кавитация насоса «О», «Г». 10. Разрушение рессоры. 11. Комбинированный отказ. 12. Новый отказ.

Для проведения диагностирования ТНА используются десять нейронных сетей, объединенных в две группы. Первая группа состоит из четырех сетей, которые следят за показаниями контролируемых параметров и в случае их отклонения от нормы диагностируют отказ. По значениям их откликов формируется четырехзначная переменная  $Y$ . Переход между не аварийными состояниями функционирования агрегата определяется по значению оборотов ротора и разрешающему значению переменной  $Y$ . После того, как выявлено аварийное состояние, его необходимо классифицировать. Этим занимается вторая группа состоит из шести сетей, которые срабатывают в случае аварии. По значениям их откликов классифицируется отказ. В случае, если сети определяют несколько отказов, то автомат переходит в состояние *Комбинированный отказ*, а если отказ не диагностируется, то в состояние *Новый отказ*.

На рис. 5 представлена первая группа нейронных сетей, контролирующая поведение параметров ТНА.

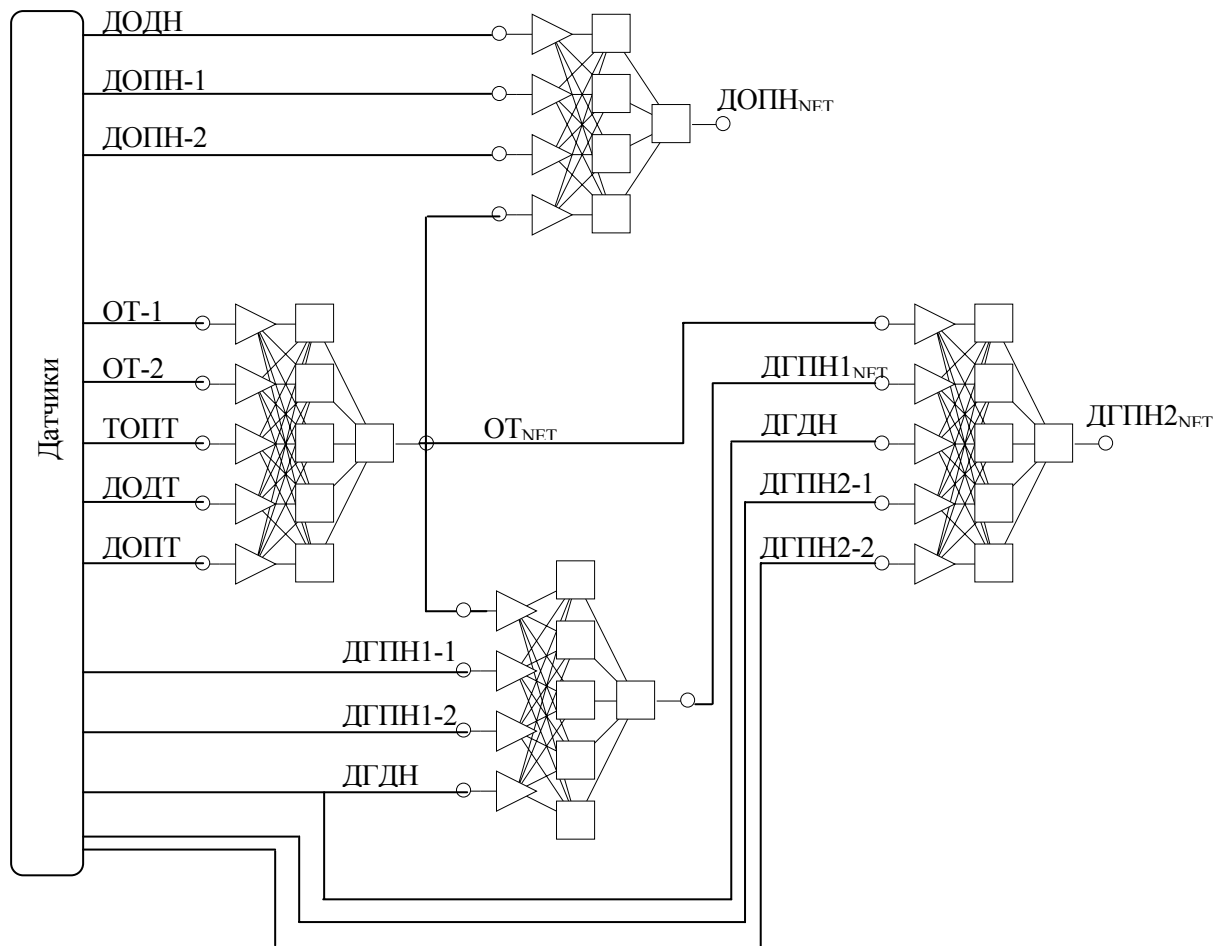


Рис. 5. Система контролирующей нейронных сетей

На этом рисунке и далее использованы следующие обозначения:

ОТ-1 – значение оборотов турбины ТНА, измеренное на предыдущем шаге;

ОТ-2 – значение оборотов турбины ТНА, измеренное на два шага ранее;

ТОПН – температура окислителя после насоса;

ДОДТ – давление окислительного газа до турбины;

ДОПТ – давление окислительного газа после турбины;

ДОДН – давление окислителя до насоса;

ДОПН-1 – давление окислителя после насоса, измеренное на предыдущем шаге;

ДОПН-2 – давление окислителя после насоса, измеренное на два шага ранее;

ДГПН1-1 – давление горючего после первой ступени насоса, измеренное на предыдущем шаге;

ДГПН1-2 – давление горючего после первой ступени насоса, измеренное на два шага ранее;

ДГДН – давление горючего до насоса;

ДГПН2-1 – давление горючего после второй ступени насоса, измеренное на предыдущем шаге;

ДГПН2-2 – давление горючего после второй ступени насоса, измеренное на два шага ранее.

В каждый момент времени сигналы от датчиков поступают на входы сетей. При этом на выходе получаем значение контролируемого параметра  $OT_{net}$ ,  $ДОПН_{net}$ ,  $ДГПН1_{net}$ ,  $ДГПН2_{net}$ . Эти значения (время  $t$ ) сравниваются соответственно с текущими показаниями датчиков (время  $t$ ). Аналогично происходит сравнение производных. Если отклонения не превышают заданной величины, то считается, что ТНА функционирует нормально, в противном случае диагностируется отказ. Значение предельного отклонения подбирается с таким расчетом, чтобы быть минимальным и в то же время допускать небольшие вариации. В случае отказа (выход любой из четырех сетей равен единице) активируются нейронные сети, обученные на характерных для ТНА отказах, по показаниям которых можно определить, что послужило причиной отказа (выход сети равен единице). Если этого сделать не удастся (несколько выходов сетей равны единице), то считается что отказ комбинированный – одновременно произошло несколько отказов, а в случае неопределенности (все выходы сетей равны нулю), автомат переходит в состояние *Новый отказ*.

Схема связей конечного автомата, моделирующего работу ТНА, приведена на рис. 6, а соответствующий граф переходов – на рис. 7.

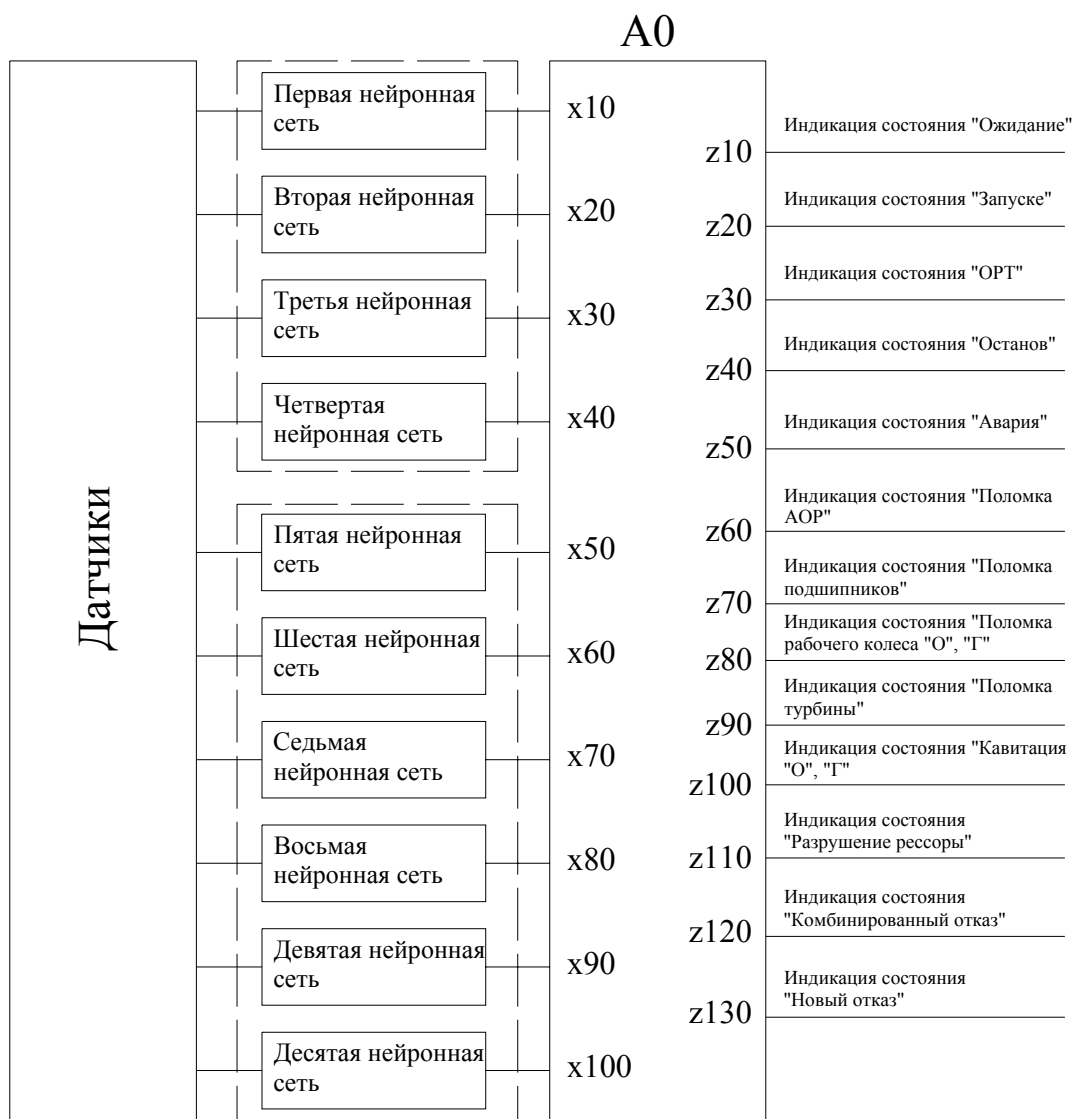


Рис. 6. Автомат А0 турбонасосного агрегата

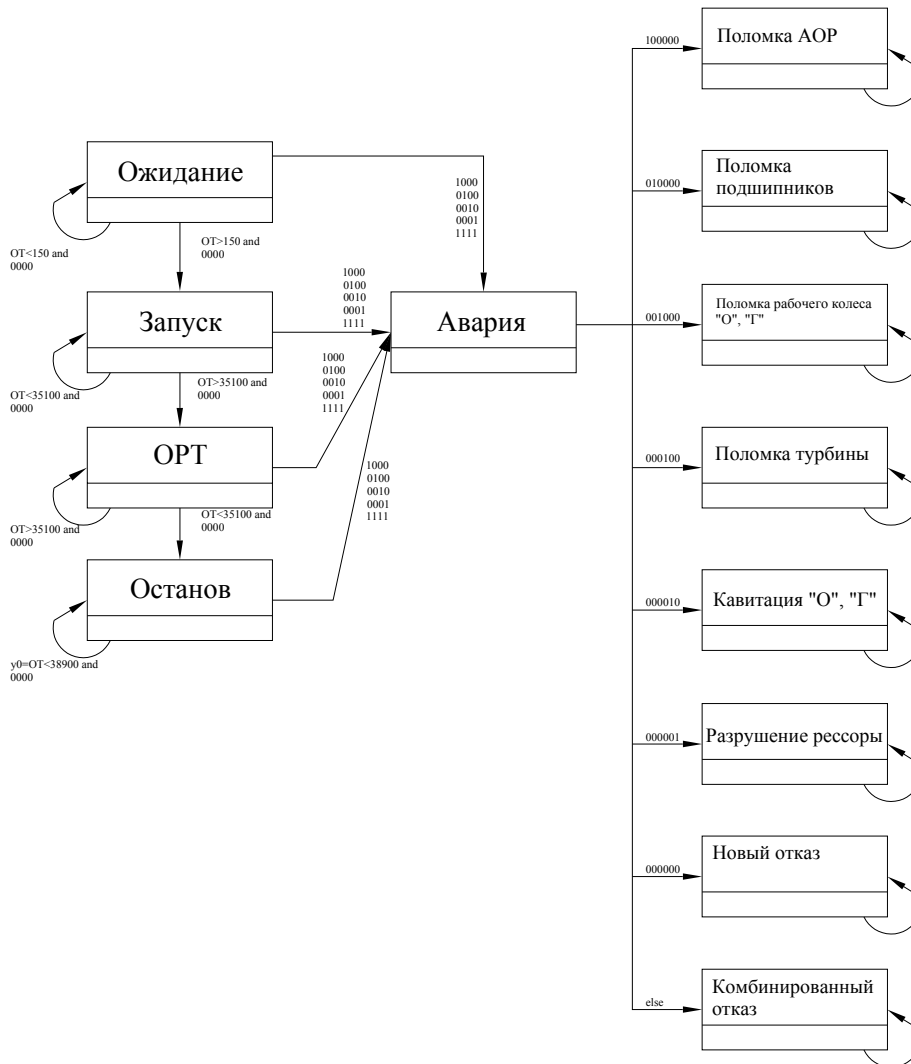


Рис. 7. Граф переходов автомата  $A_0$ , моделирующего ТНА

Порядок формирования  $Y$  представлен схеме (рис. 8).



Рис. 8. Схема формирования диагностического признака

Если в сформированной переменной  $Y$  присутствует хотя бы одна единица, то диагностируется авария и автомат переходит в состояние “4”. В этом состоянии срабатывают шесть нейронных сетей. Результат их работы – классификация отказа по значениям переменных  $x_{50}$ ,  $x_{60}$ ,  $x_{70}$ ,  $x_{80}$ ,  $x_{90}$ ,  $x_{100}$ . Они формируются напрямую из выходных значений второй группы сетей, и поэтому дополнительных преобразований, как в первом случае не требуется.

Для проверки работоспособности разработанного метода было проведено его тестирование на различных испытаниях двигателей как аварийных, так и успешных. Результаты тестирования представлены рис. 9.

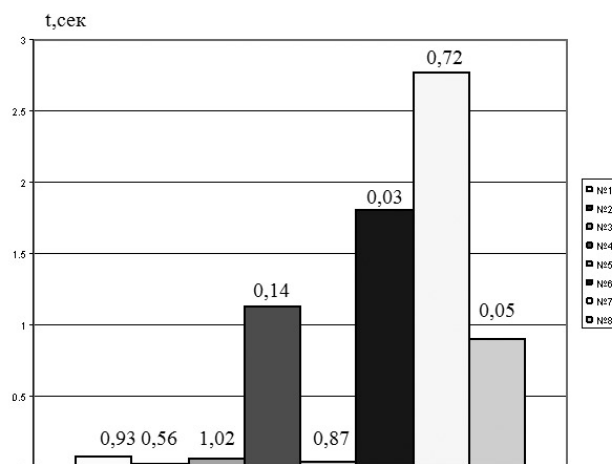


Рис. 9. Гистограмма результатов тестирования методики

На гистограмме приведены различные аварийные испытания, начиная с запуска и заканчивая моментом определения нейронными сетями отказа. Высота элементов гистограммы соответствует длительности испытаний. Над каждым испытанием указано за сколько секунд до выключения двигателя штатной системой аварийной защиты нейросетями было выявлено аварийное состояние. Можно сделать вывод, что нейросетевая система во всех случаях диагностирует аварийную ситуацию раньше штатной системы аварийной защиты.

Разработанная методика позволяет обнаруживать отказы турбонасосного агрегата. Она фиксирует время, когда произошел отказ и определяет вид отказа. Применение SWITCH-технологии позволяет получить полный протокол работы диагностирующего автомата – в любой момент времени его работы можно узнать в каком состоянии автомат находится. Данная методика может использоваться совместно с существующей системой аварийной защиты двигателя для повышения диагностических возможностей.

## Литература

1. Кретинин А.В., Солдатов Д.В., Шальто А.А., Шостак А.В. Использование нейросетевых конечных автоматов для моделирования функционирования агрегатов жидкостного ракетного двигателя // Информационные технологии. 2005. № 8.
2. Кретинин А.В., Солдатов Д.В., Шальто А.А., Шостак А.В. Ракеты. Автоматы. Нейронные сети // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. 2005. № 5.
3. Шальто А.А. SWITCH-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука. 1998.