

УДК 621.45
ГРНТИ 55.42.03

doi 10.54708/19926502_2026_3031133

Применение нейросетевой модели для диагностики малоразмерного ГТД

А.В. Суханов, А.В. Зырянов, Н.Д. Цыпаев, Э.Ш. Каримов*

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

Аннотация. В работе применена нейросетевая модель для диагностики малоразмерного газотурбинного двигателя SR-30. На основе термогазодинамического расчета разработана математическая модель, верифицированная по данным программы *GasTurb* и стендовых испытаний. Полученные зависимости использованы для обучения многослойного персептрона, классифицирующего состояние двигателя по текущим параметрам. В симуляторе *SR-30 Engine Simulator* реализовано моделирование рабочих процессов и деградации турбины путем снижения ее коэффициента полезного действия. Результаты показали, что нейросетевая модель способна выявлять отклонения параметров, что подтверждает возможность применения данного подхода для ранней диагностики и повышения надежности малоразмерных ГТД.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, параметрическая диагностика, нейронные сети, малоразмерный ГТД, испытательный стенд.

*samlonella@yandex.ru

Введение

Повышение надежности газотурбинных двигателей требует своевременного выявления отклонений параметров их работы. Параметрическая диагностика на основе анализа совокупности параметров, таких как температура, давление и частота вращения ротора позволяет определять предотказные состояния. Развитие технологий искусственного интеллекта дает возможность применять нейронные сети для автоматической обработки таких данных. В работе рассматривается реализация диагностической модели на примере малоразмерного турбореактивного двигателя SR-30. На основе термогазодинамических расчетов и стендовых измерений создан симулятор, позволяющий исследовать поведение двигателя при деградации коэффициента полезного действия ступени турбины. Цель исследования — проверка применимости нейросетевого подхода для раннего обнаружения отклонений и оценки технического состояния ГТД.

Выбор объекта исследования

В качестве объекта исследования выбран малоразмерный одновальный одноконтурный газотурбинный двигатель SR-30 (Рис. 1) учебно-исследовательского назначения, разработанный компанией *Turbine Technologies LTD* [1]. Конструктивно двигатель состоит из центробежного компрессора, противоточной кольцевой камеры сгорания, одноступенчатой осевой турбины и осесимметричного выходного устройства. Силовая установка оснащена системой контрольно-измерительных приборов, предназначенных для измерения температуры (на входе и выходе компрессора, на входе и выходе турбины и на выходе из двигателя), давления (полного и статического в различных сечениях проточной части), частоты вращения ротора, расхода топлива, а также реактивной тяги. Такой комплекс датчиков обеспечивает высокую информативность экспериментальных данных, позволяя проводить детальный анализ термогазодинамических процессов, а также формировать наглядные выборки параметров для обучения и тестирования нейросетевых диагностических моделей, направленных на выявление отклонений рабочих параметров и оценку технического состояния двигателя.



Рисунок 1. Испытательный стенд *MiniLab*.

Разработка математической модели двигателя SR-30

В целях комплексного определения эксплуатационных характеристик малоразмерного газотурбинного двигателя SR-30 и подготовки данных для обучения нейросетевой модели был выполнен термогазодинамический расчет двигателя, основанный на фундаментальных уравнениях термодинамики и газовой динамики [2]. Для верификации результатов расчета параллельно проведен расчет с использованием программного комплекса «*GasTurb*», а также осуществлено снятие параметров двигателя во время стендового запуска и их приведение к стандартным атмосферным условиям. Все расчеты выполнялись в условиях стендовых испытаний, при которых высота над уровнем моря принималась равной $H = 0$ м, по стандартной атмосфере (ГОСТ 4401–81) выбрано значение давления $P_n = 101,325$ кПа и температура окружающей среды $T_n = 298,15$ К, а скорость полета $V_n = 0$ м/с. Полученные результаты термогазодинамических расчетов, а также зафиксированные параметры работы двигателя SR-30 в ходе стендовых испытаний на установке MiniLab представлены на Рис. 2.

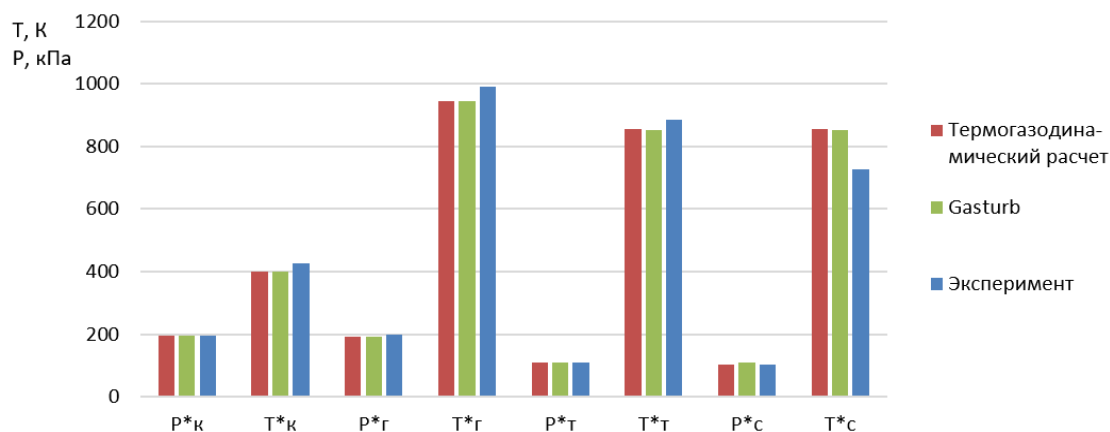


Рисунок 2. Сравнение основных параметров двигателя SR-30.

Анализ Рис. 2 показывает, что математический расчет двигателя SR-30 хорошо согласуется с результатами, полученными в программе «*GasTurb*», невязка по давлению и частоте вращения не превышает 1–2%. Экспериментальные данные демонстрируют несколько более высокие температуры за компрессором и перед турбиной, что связано с реальными тепловыми потерями и особенностями камеры сгорания. На выходе из двигателя отмечается снижение температуры газа относительно расчетной модели, что объясняется перераспределением энергии в кинетическую. Расход топлива и воздуха в эксперименте выше расчетного, что обусловлено дополнительными аэродинамическими потерями. Тяга двигателя близка к расчетной, с незначительным снижением из-за сопротивления потока. В целом результаты полученных параметров подтверждают адекватность модели и могут быть применены для дальнейшего обучения нейросетевых алгоритмов диагностики двигателя.

Программное обеспечение для имитации работы ГТД

Предполагается параллельная работа натурального двигателя и нейросетевой модели. Задача нейросетевой модели заключается в выявлении изменений рабочих параметров в процессе эксплуатации. Однако, для моделирования разных дефектов и сохранения целостности установки, работа выполнялась в программном комплексе, позволяющем имитировать работу газотурбинного двигателя в виртуальной среде, с последующей интеграцией системы нейронных сетей, обучаемой на основе рассчитанных термогазодинамических параметров. Программный комплекс создан на принципах математического моделирования термогазодинамических процессов [3, 4], протекающих в узлах двигателя, и позволяет рассчитывать такие параметры работы, как давление, температуру, массовый расход и частоту вращения роторов.

Исходными параметрами служат атмосферные условия (давление и температура окружающей среды на входе), а также положение РУД, которое определяет расход топлива. Это позволяет учитывать режимные изменения работы двигателя от минимального до максимального значения тяги.

Физико-математическая логика модели начинается с расчета массового расхода воздуха, учитывающего такие параметры воздуха на входе, как сжимаемость, приведенную критическую скорость и геометрию входного сечения, а также температуру торможения. Температура на выходе из компрессора определяется через степень повышения давления и приведенные зависимости из первого закона термодинамики с учетом того, что сжатие происходит почти без потерь тепла (изоэнтروпийный процесс). Потери энергии учитываются за счет коэффициента полезного действия компрессора.

Программная архитектура организована на основе объекта «*EngineSimulator*», реализующего графический интерфейс и основной цикл симуляции. Интерфейс предоставляет пользователю возможность задавать начальные условия окружающей среды, управлять режимом РУД посредством ползунка и запускать или останавливать симуляцию. Внутри основного цикла «*update_engine*», который вызывается с заданной частотой, происходит поэтапный пересчет всех параметров: обновляется степень сжатия компрессора, пересчитываются температуры и давления во всех ключевых узлах, вычисляется угловая скорость ротора, а также расход топлива. При каждом шаге симуляции обеспечивается квазинепрерывный переход параметров, что приближает модель к реалиям динамической работы двигателя.

Следующим этапом является визуализация полученных результатов. Для этого в программе используется модуль «*EngineGraph*», основанный на библиотеке «*Matplotlib*». Он реализует отображение графиков температур (после компрессора, перед и после турбины) и соответствующих давлений в виде временных зависимостей. Это позволяет наглядно оценить динамическое поведение двигателя при различных режимах работы и условиях внешней среды.

Стоит отметить, что при создании программной модели, имитирующей работу двигателя, важной составляющей процесса является разработка алгоритма работы топливного

насоса-регулятора. При снижении тяги он увеличивает подачу топлива, компенсируя дефицит тепловой энергии в камере сгорания, восстанавливая давление и температуру газов на входе в турбину и, как следствие, возвращая тяговые характеристики двигателя к требуемому уровню. Такой замкнутый контур обеспечивает устойчивую работу модели силовой установки даже при изменении внешних условий полета и деградации характеристик отдельных узлов.

Заключительным этапом является реализация и обучение нейронной сети, которая построена по архитектуре многослойного персептрона (MLP, Multilayer Perceptron). На вход подаются четыре нормализованных параметра, отражающие текущее состояние двигателя в реальном времени: температура газа перед турбиной, температура газа за турбиной, расход топлива и частота вращения ротора. Первый полносвязный слой выполняет преобразование входных данных в 16-мерное представление, за которым следует нелинейная активация ReLU, повышающая способность модели выявлять сложные взаимосвязи между параметрами. Второй слой снижает размерность до 8 нейронов с повторным применением ReLU. Финальный, третий слой формирует классификацию состояния двигателя по двум категориям: «норма» и «аномалия» (Рис. 3).

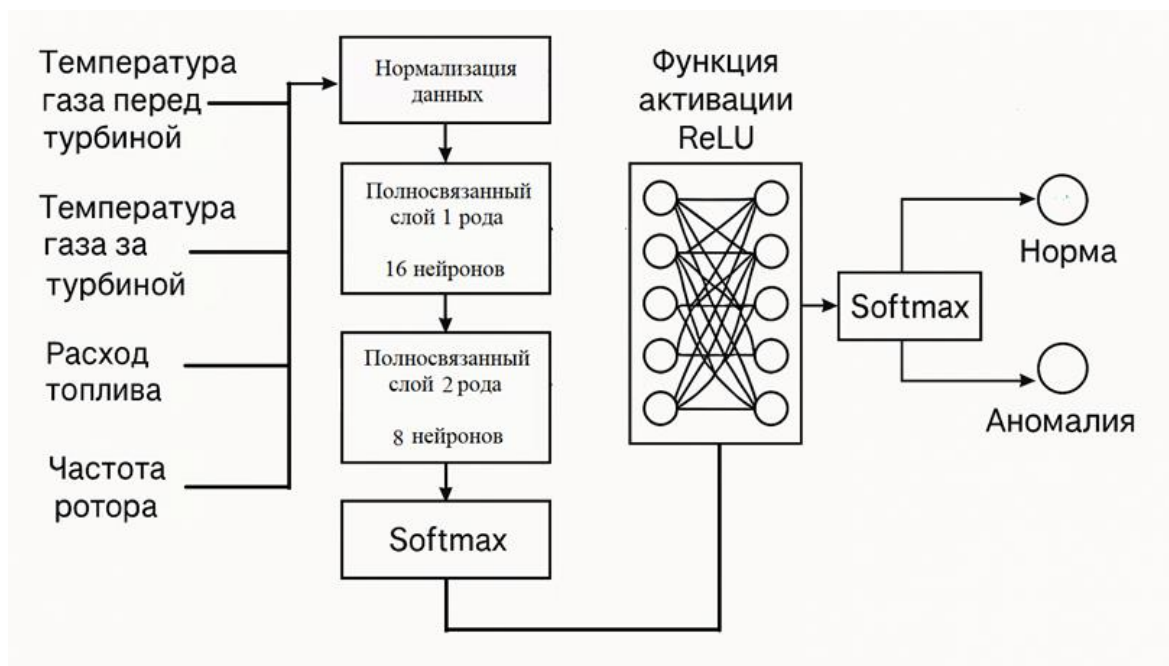


Рисунок 3. Структура нейросетевого классификатора состояния двигателя.

Кроме этого, в программном комплексе «SR-30 Engine Simulator» реализовано моделирование дефектов. В качестве дефекта выбрано постепенное снижение коэффициента полезного действия турбины. Параметр η_t был выбран в качестве регулируемой величины, поскольку во всех основных расчетных формулах термогазодинамической схемы, включая уравнение изоэнтальпийного расширения, выражения для температуры за турбиной T_t^* и расчетного числа оборотов n , данный параметр является единственным коэффициентом, непосредственно связывающим тепловой потенциал рабочего тела с механической мощностью на валу. Изменение этого параметра сразу влечет изменение всего цикла, что обеспечивает возможность наблюдения процессов деградации через совокупность измеряемых величин (T_g^* , T_t^* , π_t , n) и служит средством верификации корректности проведенной имитации. Графики демонстрируют деградацию указанных выше параметров работы двигателя и работу алгоритма нейронной сети (Рис. 4).

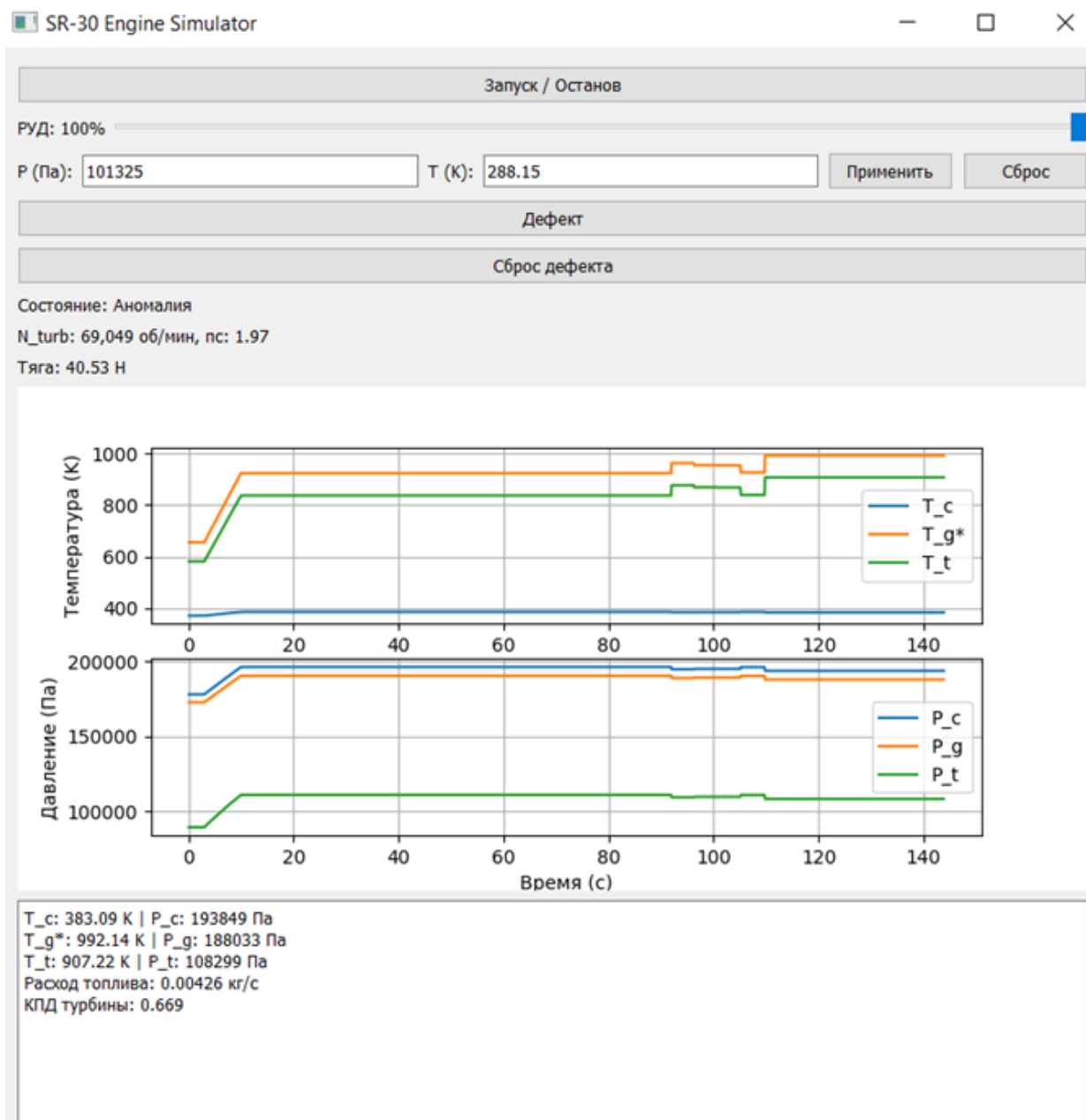


Рисунок 4. Применение нейронной сети
в программном комплексе симуляции работы двигателя.

Заключение

Результаты проведенного моделирования показывают, что при снижении коэффициента полезного действия ступени турбины до 0,66 встроенный модуль автоматической подачи топлива обеспечивает поддержание работоспособности двигателя SR-30, однако компенсирует негативные эффекты деградации лишь частично. Повышение массового расхода топлива на 12,6% приводит к увеличению температуры газа перед турбиной на 7,8%, что позволяет удерживать частоту вращения ротора всего на 2,2% ниже номинального значения и ограничивает снижение тяги до 11%. При этом наблюдается уменьшение степени повышения давления в компрессоре на 10% и перераспределение профилей давления и температуры по тракту, что указывает на возрастание термогазодинамических нагрузок и снижение общей энергетической эффективности двигателя. Применение сценария ухудшения характеристик ступени турбины (коэффициента полезного действия) продемонстрировало возможность снижения параметров силовой

установки и подтвердило чувствительность нейросетевой модели к изменениям на воздействие влияющих параметров.

В дальнейшем планируется верификация модели обнаружения дефекта по параметрам малоразмерного газотурбинного двигателя SR-30 при натурных экспериментах и расширение области применения нейросетевых моделей на промышленных ГТУ.

Литература:

1. Turbine Technologies. MiniLab™ Small Turbine Engine Lab [webpage]. URL: <https://www.turbine technologies.com/educational-lab-products/turbojet-engine-lab>.
2. Агульник А.Б., Кравченко И.В. Методические указания к выполнению курсовых работ по курсу «Теория и расчет авиационных двигателей и энергетических установок». М.: Изд-во МАИ, 2012. 48 с. [Agulnik A.B., Kravchenko I.V. Methodological guidelines for completing coursework on the course «Theory and calculation of aircraft engines and power plants». Moscow: Moscow Aviation Institute Publishing House, 2012. 48 p. (in Russian)].
3. Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е., Маркина К.В., Бакирова З.Н. Экспериментальное исследование статических и динамических характеристик газотурбинных двигателей на автоматизированных лабораторных установках SR-30 и TJ-100 при различных алгоритмах управления двигателем // Молодой ученый. 2013. № 3(50). С. 26–34. [Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Markina K.V., Bakirova Z.N. Experimental study of static and dynamic characteristics of gas turbine engines on automated laboratory units SR-30 and TJ-100 with different engine control algorithms // Molodoi Uchenyi. 2013. No. 3(50). P. 26–34 (in Russian)].
4. Раэриндзатуву Ж.С., Гишваров А.С. Параметрическая диагностика одновального ГТД на основе нейросетевого моделирования рабочих процессов // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 4(78). С. 86–96. [Raerindzatuvu Zh.S., Gishvarov A.S. Parametric diagnostics of single-GTE on the basis of neural network modeling workflows // Vestnik UGATU. 2017. Vol. 21. No. 4(78). P. 86–96 (in Russian)].

Об авторах:

СУХАНОВ Андрей Владимирович, ст. преподаватель каф. авиационных двигателей, Уфимский университет науки и технологий.

ЗЫРЯНОВ Алексей Викторович, канд. технич. наук по электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов, доц., заведующий каф. авиационных двигателей, Уфимский университет науки и технологий, alexsfox@inbox.ru.

ЦЫПАНОВ Никита Денисович, магистр, Уфимский университет науки и технологий, tsypaevnd@yandex.ru.

КАРИМОВ Эмиль Шамилевич, студент каф. авиационных двигателей, Уфимский университет науки и технологий, Россия, samlonella@yandex.ru.

Metadata:

Title: Neural network diagnosis model for a small-sized gas turbine engine.

Author 1: Andrey Vladimirovich Sukhanov, Senior Lecturer at the Department of Aviation Engines, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

Author 2: Alexey Viktorovich Zyryanov, Can. Of Sci. in electric jet engines and aircraft power installations, Docent, Head of the Department of Aviation Engines, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, alexsfox@inbox.ru.

Author 3: Nikita Denisovich Tsypaev, Postgraduate, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, email: tsypaevnd@yandex.ru.

Author 4: Emil Shamilevich Karimov, Student at the Department of Aviation Engines, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, samlonella@yandex.ru.

Abstract: A neural network model is applied to the diagnostics of the SR-30 small gas turbine engine. A mathematical model was developed based on thermogasdynamic calculations and verified using GasTurb software and bench testing data. The resulting dependencies were used to train a multilayer perceptron, which classifies the engine's condition based on current parameters. The SR-30 Engine Simulator simulates turbine operating processes and its degradation represented by reduced efficiency. The results demonstrate that the neural network model is capable of detecting parameter deviations, confirming the feasibility of this approach for early diagnostics and improving the reliability of small gas turbine engines.

Keywords: gas turbine engine, parametric diagnostics, neural networks, small gas turbine engine.