

НАПРАВЛЕНИЕ
«СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
И ТОПЛИВОПИТАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ» /
«AUTOMATIC CONTROL AND FUEL SUPPLY SYSTEMS
OF AIRCRAFT ENGINES»

УДК 621.4:681.5

НЕЙРОСЕТЕВОЙ РЕГУЛЯТОР МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ
ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Августинович В.Г.¹, Кузнецова Т.А.¹, Сухарев А.А.^{1,2}

¹ПНИПУ, г. Пермь, tatianaakuznetsova@gmail.com

²АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, sukharev-aa@avid.ru

Ключевые слова: газотурбинная установка, камера сгорания, выбросы вредных веществ, встроенная модель, нейросетевой регулятор.

Газотурбинные установки имеют широкое применение в качестве силовых приводных агрегатов. В состав установки входит газотурбинный двигатель (ГТД). Одним из важнейших узлов двигателя является камера сгорания, которая является основным источником вредных выбросов.

Объектом исследования в данной работе является малоэмиссионная камера сгорания (МЭКС) газотурбинной установки (ГТУ) мощностью 16 МВт.

Узкий диапазон устойчивого горения по составу смеси (α) малоэмиссионных камер сгорания с т.н. «бедным» ($\alpha > 1$, т.е. с избытком кислорода по отношению к стехиометрическому соотношению состава смеси - классическая схема малоэмиссионного горения) фронтом обуславливает ограниченную степень дросселирования режима ГТД без срыва пламени. В связи с этим камеры такого типа имеют многоколлекторную схему (3...4 коллектора) с последовательно подключающимися (отключающимися) коллекторами и горелками.

Целью работы является создание системы автоматического управления (САУ) со встроенной нейросетевой моделью, позволяющей снизить количество вредных выбросов оксидов азота NO_x до 50 мг/м^3 и монооксида углерода CO до 100 мг/м^3 путем оптимального распределения топлива по коллекторам МЭКС.

Диапазон регулирования МЭКС определяется диапазоном устойчивых режимов работы, который ограничен, с одной стороны, нормируемым уровнем эмиссии вредных веществ в атмосферу, а с другой - неприемлемыми в эксплуатации режимами срыва пламени или виброгорения (термоакустическими автоколебаниями).

В настоящем исследовании решается задача разработка ПИ-регулятора эмиссии МЭКС ГТУ-16. В состав регулятора включена встроенная нейросетевая математическая модель уровня выбросов оксидов азота и монооксида углерода, а также удвоенной амплитуды пульсаций давления в жаровых трубах. ПИ-алгоритм управления выбран как наиболее распространенный в практике автоматического управления ГТД и не утративший актуальности с развитием новых методов регулирования в силу простоты настройки.

Встроенная модель МЭКС выполняет функцию виртуального датчика эмиссии и пульсаций давления. Внедрение виртуальных датчиков позволяет прогнозировать изменение неизмеряемых в процессе эксплуатации двигателя величин. А также позволяет оценивать качество измерения сигналов, и при замене реальных датчиков - снижает затраты на обслуживание двигателя.

Отладка и доводка адаптивных алгоритмов нейросетевого регулятора МЭКС велась в ходе стендовых испытаниях с контролем уровня эмиссии и показателей устойчивости работы двигателя. При таком подходе оптимизация алгоритмов управления осуществляется с учетом

реальных свойств объекта управления и его взаимодействия с прочими узлами двигателя и САУ ГТД.

На основании анализа результатов натурных испытаний нескольких конструкций камеры сгорания, имеющих одинаковый базовый принцип организации смешения и горения, определены корреляционные зависимости между входными и выходными сигналами МЭКС. Расчет коэффициентов корреляции Пирсона проводился с помощью разработанного ПО в программном пакете Pandas Python (v3.6.9). Анализ показал, что уровень эмиссии оксида азота NOx имеет наибольшую корреляцию с относительным расходом топлива через пилотный контур (PFR - доля топлива в пилотной горелке), что и определило функциональную схему и структуру регулятора.

Проведенный корреляционный анализ позволил также выбрать оптимальный набор входных параметров нейросетевой модели эмиссии и пульсаций давления для ГТУ 16 МВт. Структурные характеристики и весовые коэффициенты встроенной модели были выбраны в ходе симуляции, обучения и тестирования нейронной сети в пакете MATLAB R2018b с использованием пакета Neural Network Toolbox для дальнейшей ее интеграции в контроллер САУ ГТУ PXIe-8880 платформы National Instruments. На основе сравнительного анализа данных модельного эксперимента в качестве функции активации был выбран гиперболический тангенс. В качестве обучающего алгоритма выбран алгоритм обратного распространения ошибки. В качестве алгоритма оптимизации для моделей эмиссии NOx и пульсаций давления в жаровых трубах выбрана оптимизация Левенберга-Марквардта. Для модели эмиссии CO выбрана Байесовская оптимизация. Определены погрешности прогноза эмиссии NOx и CO, а также пульсаций давления. Доказана нормальность распределения ошибки разработанной модели эмиссии оксидов азота по критерию Пирсона.

Структурная схема регулятора эмиссии NOx с встроенной нейросетевой моделью МЭКС, работающей как виртуальный датчик уровня эмиссии NOx, приведена на рис. 1.

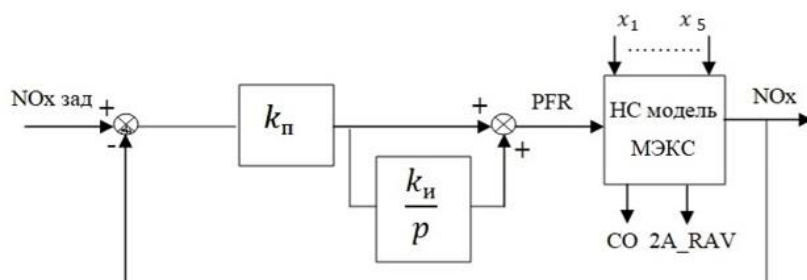


Рисунок 1 – Структурная схема САУ эмиссии NOx со встроенной нейросетевой моделью МЭКС

Обозначения на рис. 1: PFR – относительный расход топлива через пилотный контур (доля топлива в пилотной горелке); NOx_зад – заданный оператором уровень выбросов; NOx – уровень выбросов, рассчитанный с использованием нейросетевой модели; $x_1 \dots x_5$ – входные сигналы нейросетевой модели, поступающие от САУ ГТУ, характеризующие текущее состояние двигателя и внешние условия его работы.

При принятом допущении, что МЭКС отображается идеальным интегрирующим звеном с экспериментально рассчитанным математическим ожиданием коэффициента усиления, были теоретически определены коэффициенты пропорциональной и интегральной части ПИ-регулятора на основе предоставленных желаемых ЛАЧХ и ЛФЧХ.

После выполнения интеграции нейросетевой математической модели в САУ ГТУ произведена проверка работоспособности регулятора при испытаниях на имитаторе двигателя ГТУ 16 МВт в составе стендовой модели САУ газогенератора. Испытания производились с симуляцией рассмотренных при обучении нейросетевой модели МЭКС режимов работы двигателя. Оценена точность модели при наружной температуре $+7^\circ\text{C}$ и -15°C . Кроме того по данным стендовых испытаний произведена настройка оптимального пропорционального коэффициента регулятора камеры сгорания для обеспечения безударного регулирования и устойчивой работы двигателя.

Результаты испытаний продемонстрировали работоспособность регулятора с виртуальным нейросетевым датчиком эмиссии NOx в составе САУ ГТУ. Ошибка регулирования стремится к нулю, а эмиссия оксидов азота NOx поддерживается на заданном уровне до 50 мг/м³. Сделан вывод о возможности и перспективности применения нейронных сетей для разработки адаптивной системы автоматического управления эмиссией МЭКС ГТУ со встроенной нейросетевой моделью эмиссии и пульсаций давления в жаровых трубах.

Список литературы

1. Т.А. Kuznetsova, and V.G. Avgustinovich, "Virtual NOx-emission sensors for aeroengine control," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE), 2020, vol. 862, no. 052014.
2. Т. Kuznetsova, and Repp P. "Neural network model of industrial plant's harmful emissions," IEEE Explore: 2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology(ITNT), INSPEC Accession Number 21530250, September 2021 [Digests ITNT-2021 Conf., Russia, 2021].
3. Т.А. Kuznetsova, "Some features of quality improvement of a neural network identifying a aeroengine low-emission combustion chamber," IEEE Explore: 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), INSPEC Accession Number 21485618, November 2021 [Digests SUMMA- 2021 Conf., Russia, 2021].

Сведения об авторах

Августинович В.Г., д.т.н., профессор ФГАОУ ПНИПУ.

Кузнецова Т.А., к.т.н., доцент ФГАОУ ПНИПУ.

Сухарев А.А., аспирант ФГАОУ ПНИПУ, инженер отдела проектирования САУ АО «ОДК-Авиадвигатель».

NEURAL NETWORK CONTROL OF A GAS TURBINE LOW-EMISSION COMBUSTOR

V. G. Avgustinovich¹, T. A. Kuznetsova¹, [A. A. Sukharev^{1,2}](#)

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, tatianaakuznetsova@gmail.com

²JSC "UEC-Aviadvigatel", Perm, sukharev-aa@avid.ru

Keywords: gas turbine unit, combustor, emissions, built-in model, neural network control.

The study is devoted to the development and testing of the harmful substances' emission controller for a gas turbine power plant with a capacity of 16 MW (GTP-16) based on the built-in neural network mathematical model of a dry low emission (DLE) combustor. The developed algorithms for the neural network controller of the emission of nitrogen oxides, carbon monoxide and pressure pulsations in the DLE-combustor flame tubes are implemented in MATLAB R2018b Simulink and integrated into the GTP-16 automatic control system (ACS) on the hardware/software platform PXI NI. The efficiency of the emissions controller was checked during bench tests on the GTP-16 simulator, with the DLE-combustor neural network model performing the functions of a virtual emissions sensor. The errors in the estimation of emissions and pressure pulsations that meet the accepted requirements are determined. The normal error distribution of the developed neural network model of the combustion chamber is proved. The resulting emission control quality corresponds to the desired one. The conclusion about the possibility and prospects of using neural networks for the development of an adaptive emission control system for DLE-combustors of the gas turbine power plants was made.