

УДК 629.7.063.3

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ НЕЙРОСЕТЕВОГО ВЫВОДА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Корнилова М.И. (Ульяновский государственный технический университет)

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Ковальногов В.Н.

(Ульяновский государственный технический университет)

**Введение.** В работе рассматривается проблема управления малоэмиссионными газотурбинными двигателями (ГТД), решается задача прогнозирования эмиссии вредных веществ, в частности СО и NOx. В современных ГТД количественные показатели эмиссии вредных веществ являются столь же значимыми, как мощность или ресурс двигателя.

Анализ отечественного и зарубежного опыта позволяет заключить, что прогнозирование выбросов NOx и СО в камерах сгорания ГТУ является исключительно сложной задачей из-за сложных и не до конца изученных процессов, происходящих при сгорании топлива [1, 2]. Для снижения вредных веществ двигателя необходимо поддержание достаточно узкого диапазона режима работы ГТД, характеризующегося оптимальным сочетанием режимных параметров, таких как состав сжигаемого топлива, соотношение расходов окислителя и топлива, температура топливовоздушной смеси, давление за компрессором, нагрузка двигателя и т.д. При таком многофакторном характере задачи управления выбросами математическая модель не имеет простого аналитического решения. В связи с этим задачу прогнозирования эмиссии СО и NOx от ГТД предлагается решать на основе искусственных нейронных сетей.

В долгосрочной перспективе исследования будут способствовать устойчивому развитию отечественного энергомашиностроения.

### Основная часть.

Нейронная сеть прогнозирования выбросов ГТД была спроектирована в математическом пакете MATLAB. Выборка данных для обучения получена на базе верифицированных данных численных экспериментов по горению метана в камере сгорания ГТД.

Входные данные для обучения: нагрузка двигателя, степень сжатия воздуха за компрессором, температура на входе в газовую турбину, мощность ГТД, удельная мощность теплового потока, массовый расход выхлопов, соотношение расходов топлива и окислителя. Выходные данные сети: концентрация NOx и концентрация СО.

Проведены расчеты с использованием трех алгоритмов обучения: алгоритм Левенберга-Марквардта, алгоритм на основе Байесовской регуляризации, алгоритм на основе методов сопряженных градиентов [3]. Расчеты по каждому алгоритму проводились при варьировании количества скрытых слоев нейронной сети.

Алгоритм Левенберга-Марквардта и алгоритм на основе методов сопряженных градиентов требовали меньше времени для расчетов, однако полученные прогнозные значения имели несколько увеличенные среднеквадратичные ошибки. Алгоритм Байесовской регуляризации требовал больше времени, но демонстрировал хорошее обобщение данных.

Все полученные прогнозные кривые выбросов NOx и СО вполне соответствовали фактическим данным, максимальная погрешность не превысила 7%. Тем не менее, модели на алгоритме Левенберга-Марквардта показывали наихудшие результаты, кривые прогнозов не на всех участках отражали истинный характер изменения фактических данных.

Алгоритм Байесовской регуляризации продемонстрировал наилучшие прогнозы выбросов СО и NOx при сорока скрытых слоях нейросети. Средняя абсолютная процентная ошибка составила 0,6%. Коэффициент детерминации составил 0,999, что, как и ожидалось, свидетельствует о сильной корреляции параметров процессов горения в камерах сгорания ГТД. При этом наиболее значимыми характеристиками, влияющими на прогноз, являлись

степень сжатия воздуха в компрессоре и температура топливовоздушной смеси. Для режимов полной и частичной нагрузок выявлено оптимальное сочетание управляющих воздействий, обеспечивающих минимально возможные концентрации NO<sub>x</sub> и CO.

**Выводы.** Проведен сравнительный анализ алгоритмов нейросетевого вывода для прогнозирования выбросов газотурбинных двигателей. Полученные результаты позволили выявить оптимальные режимы работы ГТД.

**Список использованных источников:**

1. Комаров Е. М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии, № 5, 2018. С. 9-29;
2. Гао Й., Чоу В. К. «Краткий обзор моделирования горения», Международный журнал по архитектуре, том 6, № 2, 2005, С. 38–69;
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы . М.: Горячая линия – Телеком, 2006 – 452 с.;