

Н. В. Андриевская¹, канд. техн. наук, доц., anv@msa.pstu.ru,
О. А. Андриевский², студент, andrievsky@niuitmo.ru, **М. Д. Кузнецов**², студент, kuznetcov.1997@yandex.ru,
Т. С. Леготкина¹, канд. техн. наук, доц., nedonosh@mail.ru, **В. С. Никулин**¹, аспирант, kalif23@yandex.ru,
С. А. Сторожев¹, аспирант, serge5@mail.ru, **Ю. Н. Хижняков**¹, д-р техн. наук, доц., H1941@yandex.ru,
А. А. Южаков¹, д-р техн. наук, проф., uz@at.pstu.ru

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

²Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя¹

Одним из направлений развития авиации является решение экологических проблем, исключающее выделение в атмосферу вредных веществ (оксида азота, оксида углерода) при работе авиационного газотурбинного двигателя (ГТД).

Сложность управления камерой сгорания заключается в том, что необходимо одновременно поддерживать основные полетные требования как по тяге двигателя, так и по минимизации выбросов вредных веществ. Одновременное выполнение этих условий приводит к решению задачи в узком диапазоне изменения параметров. Сложность процессов, протекающих в авиационном двигателе, не позволяет использовать традиционные законы управления. Поэтому в статье предложены регуляторы, основанные на аппарате искусственного интеллекта.

В работе представлены синтез и анализ системы автоматического управления (САУ), обеспечивающей устойчивую работу на основных полетных режимах. В качестве регуляторов рассмотрены нейронная сеть и нечеткий регулятор. Предложены различные модели данных регуляторов. Проведен анализ САУ и осуществлен выбор наилучших моделей регулятора.

Для минимизации выбросов вредных веществ представлена динамическая модель эмиссии вредных веществ на уровне 18 кг за полный цикл взлет—полет—посадка. Разработана САУ минимизацией вредных веществ на основе нейронного регулятора. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: авиационный двигатель, выброс вредных веществ, камера сгорания, основные полетные режимы, расход топлива, дозаторы (диффузионный и гомогенный), нечеткий регулятор, нейронное управление, метод обратного распространения ошибки, метод Левенберга—Марквардта, динамическая модель эмиссии вредных веществ, интегральный показатель эмиссии вредных веществ

Введение

Современные тенденции в авиационном двигателестроении предполагают разработку двигателей, которые являются не только высококачественными, надежными и безопасными, но и обеспечивающими экологическую сохранность окружающей среды [1–4]

Ухудшение экологии окружающей среды и ужесточение норм на вредные выбросы оксидов азота NO_x и углерода СО для современных двигателей требуют разработки качественно новых "чистых" камер сгорания, обеспечивающих заданные ограничения по вредным выбросам оксидов азота NO_x и углекислого газа [1, 5]. В камерах сгорания нового типа уменьшение вредных выбросов осуществляется за счет пере-

распределения топлива по различным коллекторам. Газодинамическая устойчивость горения в камере сгорания обеспечивается равномерным распределением топливовоздушной смеси за счет поперечных пульсаций концентрации с помощью гомогенных и диффузионных дозаторов [1, 2, 6]. При перераспределении топлива следует удерживать работу двигателя в устойчивом режиме, не допуская режима "бедного" срыва — срыва пламени в камере сгорания (при уменьшении температуры пламени ниже 1100 К), и режима виброгорения (при увеличении температуры выше 1600 К). Кроме того, при увеличении температуры пламени свыше 2000 К происходит резкое увеличение выброса вредных веществ [1, 7–10].

Разработка камер сгорания, обеспечивающих минимальный выброс вредных веществ, является перспективной и необходимой задачей в области авиадвигателестроения. Следует отметить, что на сегодняшний день создание таких камер сгорания находится на стадии проектирования, разработки и создания опыт-

¹ Работа выполнена в рамках договора СЧ НИОКР "Разработка и исследование нечетких и нейросетевых систем автоматического управления перспективного турбореактивного двухконтурного двигателя повышенной тяги" № 0000000020956180193/2018/537 от "29" 01. 2019 г. с АО "ОДК-СТАР"

ных образцов. Экологические требования сужают область устойчивого режима работы как камеры сгорания, так и двигателя в целом. Существующие системы автоматического управления (САУ) двигателями не обеспечивают экологические требования. Поэтому разработка алгоритмов управления процессами в камере сгорания в условиях как технологических, так и экологических ограничений является крайне актуальной задачей [1–4].

Постановка задачи

При разработке алгоритмов управления, обеспечивающих минимальный выброс веществ, следует учитывать следующие особенности функционирования камер сгорания (КС).

Камера сгорания является одной из важнейших частей газотурбинного двигателя, которая обеспечивает процесс горения топливовоздушной смеси (ТВС). Температура газов, выходящих из КС, обеспечивает мощность (тягу) и скорость реактивного двигателя [11].

Однако действия, направленные на минимизацию вредных выбросов NO_x , могут привести к режиму "бедного" срыва. Поэтому проектирование систем управления КС должно обеспечивать устойчивый режим работы камеры в узком диапазоне между режимом "бедного" срыва и виброгорения [1, 2, 9–12]. Моменты возникновения и протекания режимов "бедного" срыва и виброгорения являются недетерминированными процессами, зависящими от многих параметров: температуры ламинарного пламени в камере сгорания, состава ТВС, давления в КС, геометрических размеров камеры сгорания и других. Наиболее важной характеристикой является температура ламинарного пламени в камере сгорания. Зависимость температуры ламинарного пламени в камере сгорания и моментов возникновения режимов "бедного" срыва и эмиссии оксидов азота от коэффициента избытка воздуха α ($\alpha = \frac{G_v}{L_0 G_T}$, где G_v — расход воздуха; L_0 — стехиометрический коэффициент, характеризующий химический состав топлива; G_T — расход топлива.) представлена на рис. 1 [9, 13].

Следует заметить, что данный график может сжиматься по осям абсцисс и ординат и смещаться по оси абсцисс в зависимости от вида топлива, состояния КС, давления топли-

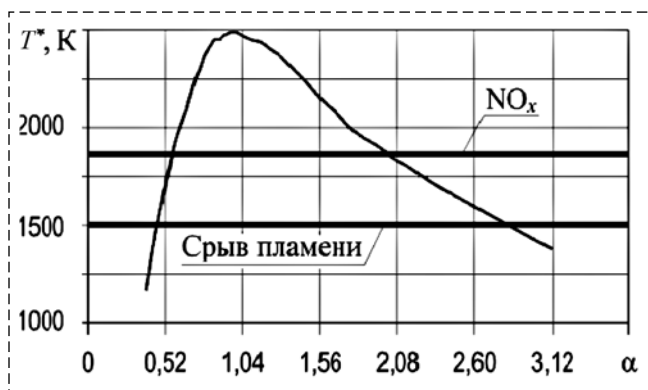


Рис. 1. Зависимость температуры пламени от состава топливовоздушной массы смеси

Fig. 1. Dependence of the flame temperature on the composition of the fuel-air mass of the mixture

ва в КС, температуры и давления воздуха, температуры внешней среды и других параметров [1, 2, 7].

Обеспечение минимального выброса вредных веществ в КС нового типа достигается за счет перераспределения топлива через различные контуры: диффузионный контур постоянной подачи топлива и гомогенные контуры. За счет перераспределения топлива и неравномерности температурного поля в КС режимы "бедного" срыва и виброгорения могут возникнуть при различных значениях коэффициента избытка воздуха α .

Можно сделать вывод, что КС как объект управления (ОУ) является сложным нелинейным стохастическим объектом при отсутствии его точного математического описания [1, 2, 4, 10, 11].

Таким образом, задачей управления КС является обеспечение ее устойчивой работы в узком диапазоне режимов по коэффициенту избытка воздуха. Если учитывать, что этот диапазон необходимо обеспечивать в условиях достаточно большого диапазона температуры окружающего воздуха, различных режимов работы двигателя, влияния внутренних факторов (например, включения-выключения отборов воздуха на самолетные нужды и т.п.), то задача управления КС становится невероятно сложной.

Данная задача может быть решена с помощью применения технологии искусственного интеллекта. Анализ работ в данном направлении показал, что задача управления, обеспечивающего минимальный выброс веществ, в целом не решена [1, 13–18],

В данной статье рассмотрен алгоритм управления камерой сгорания, который минимизирует выброс вредных веществ на уровне 18 кг за весь цикл "взлет—полет—посадка".

Решение задачи управления камерой сгорания

Исходными данными для задачи управления является распределение топлива на основных полетных режимах (табл. 1)

В табл. 1 представлены следующие параметры: G_T — суммарный объем топлива, поступающий в камеру сгорания; G_1 — объем топлива, поступающий через диффузионный коллектор; G_2 — объем топлива, поступающий через 1-й гомогенный коллектор; G_3 — объем топлива, поступающий через 2-й гомогенный коллектор; $\alpha_{КС}$ — коэффициент избытка воздуха; $T_{КС}$ — температура в камере сгорания; $P_{КС}$ — давление в камере сгорания).

Данное перераспределение топлива по коллекторам обеспечивает работу двигателя на основных полетных режимах.

В табл. 2 приведены Сертификационные режимы работы двигателя по эмиссии.

Сложность объекта управления — КС — и ее основные свойства (многомерность, стохастичность, нелинейность) приводят к необходимости использования для синтеза САУ интеллектуальных регуляторов, построенных на основе алгоритмов нечеткой логики и искусственных нейронных сетей (ИНС) [19-24]. Выбор алгоритмов искусственного интеллекта обусловлен и тем, что "чистые" камеры сгорания не созданы в физическом виде, а заданы математически основными параметрами в процессе всех полетных режимов (см. табл. 1, 2).

Для синтеза САУ предлагается использовать:

- интеллектуальные регуляторы, обеспечивающие работу КС на основных полетных режимах (табл. 1);
- интеллектуальные регуляторы, обеспечивающие минимальный уровень эмиссии NO_x (табл. 2).

На первом этапе в качестве интеллектуальных регуляторов были рассмотрены нечеткие и нейронные регуляторы.

Таблица 1
Table 1

Распределение топлива в камере сгорания
Fuel distribution in the combustion chamber

Параметры	Малый газ					Полетный малый газ					Взлет
G_T	0	560	560	726	1440	1874	2320	3500	4774	6150	9110
G_1	0	560	200	200	200	200	230	290	350	410	560
G_2	0	0	360	526	1240	837	1045	1605	2212	2870	4275
G_3	0	0	0	0	0	837	1045	1605	2212	2870	4275
$\alpha_{КС}(1 + 2)$			3,30	3,00	2,31	2,08					
$\alpha_{КС}(1 + 2 + 3)$						4,16	3,80	3,20	2,83	2,54	2,14
$T_{КС}$			548	577	663	698	727	787	836	880	954
$P_{КС}$			6,1	7,3	12,2	14,8	17,2	23,2	29,0	34,8	45,9

Таблица 2
Table 2

Сертификационные режимы работы двигателя по эмиссии NO_x (условия: без отборов воздуха и мощности)
Certification the operating modes of the engine emissions (conditions: without air and power extraction)

Режим	Тяга, %	Время работы, мин	$P_{КС}$, кг/см ²	$T_{КС}$, К	$\alpha_{КС}$	T_g , К	G_T , кг/ч
Взлет	100	0,7	45,77	912	2,26	1855	8879
Набор высоты	85	2,2	40	876	2,47	1755	7315
Заход на посадку (ПМГ)	30	4,0	17,72	700	3,92	1302	2373
Руление (МГ)	7	26	7,16	552	6,15	964	711

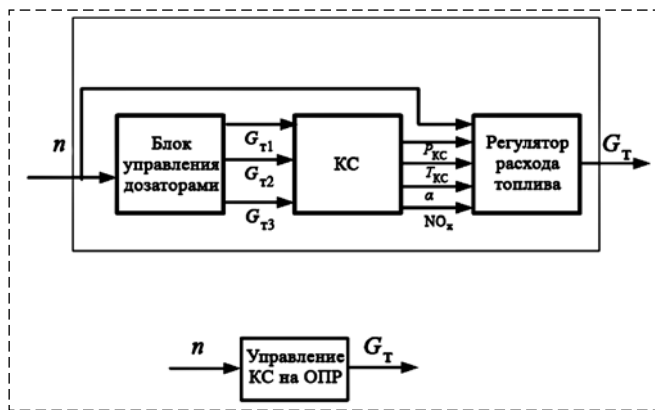


Рис. 2. Структура управления КС, обеспечивающая основные полетные режимы

Fig. 2. Governance structure of the COP serving as the main flight modes

Таблица 3
Table 3

Обучающая выборка
Training sample

NO_x	α_{KC}	T_{KC}	P_{KC}	n	G_T
-1,703682	0,558727	-1,724406	-1,365422	-2,190378	-1,202198
-1,665822	0,505356	-1,700758	-1,355309	-2,118917	-1,195856
-1,627963	0,451986	-1,677109	-1,345197	-2,047456	-1,189514
...	...	...	...	...	...
1,627963	-1,433765	1,526059	1,793974	1,341824	1,951077
1,665822	-1,469345	1,556231	1,839237	1,362241	2,007618
1,703682	-1,504925	1,586403	1,884499	1,382658	2,064158

Структура регулятора, обеспечивающего функционирование камеры сгорания на основных полетных режимах (ОПР), представлена на рис. 2.

Расчет регуляторов был осуществлен на основе обучающей выборки, представленной в табл. 3.

Входными переменными являются следующие параметры: температура в камере сгорания T_{KC} , давление в камере сгорания P_{KC} , коэффициент избытка воздуха α_{KC} , выброс вредных веществ NO_x , скорость двигателя (обороты двигателя) n . Выходом является расход топлива G_T .

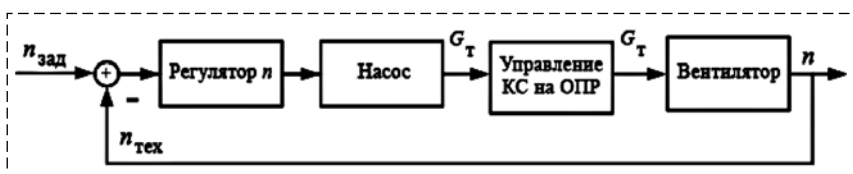


Рис. 3. Схема САУ по оборотам двигателя (вентилятора) с КС в прямой цепи

Fig. 3. Scheme ACS on engine speed (fan) from the COP in a straight chain

В качестве интеллектуальных регуляторов были рассмотрены:

- нейронные регуляторы с обучением обратного распространения ошибки и Левенберга—Марквардта, каждая из моделей содержит один (скрытый) слой, содержащий 10 нейронов, функцией активации является сигмоидальная структура [19, 23, 24];
- нечеткие регуляторы — модели Заде, Мамдани, Сугено [20, 22, 23].

Работоспособность регуляторов камеры сгорания на различных полетных режимах была проверена путем включения в контур САУ оборотами двигателя (рис. 3).

План эксперимента включает в себя анализ переходных процессов САУ КС при изменении числа оборотов $n = \{0,3; 0,5; 0,7; 1,0\}$, соответствующим основным полетным режимам (обороты представлены в нормированном виде). Качество управления оценивается следующими основными показателями: $t_{пп}$ — временем переходного процесса; $\sigma\%$ — перерегулированием; $e(\infty)\%$ — статическая ошибка.

Для интегральной оценки качества выбрана следующая целевая функция:

$$J = 0,6\sigma + 0,2t_{пп} + 0,2e(\infty).$$

Повышенный весовой коэффициент 0,6 при перерегулировании ошибки определяется требованием аperiodического характера переходного процесса (перерегулирование по оборотам двигателя недопустимо). Цель управления — минимизация J .

В процессе анализа были рассмотрены различные способы включения регуляторов полетных режимов в контур управления по оборотам вентилятора двигателя.

Наилучшие результаты показали САУ с нейронным регулятором ИНС с обучением по методу Левенберга—Марквардта ($J = 5,05$) (рис. 4, см. вторую сторону обложки) и нечеткий регулятор на основе модели Сугено ($J = 4,93$) (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

На втором этапе решалась задача минимизации вредных выбросов на уровне 18 кг за

весь цикл взлет—полет—посадка (рис. 6), где MNO_x — интегральный показатель выбросов вредных веществ за полный цикл.

Концепция регулирования заключается в том, чтобы не допустить выход текущего интеграла

MNO_x из заданных пределов (18 кг), что позволяет контролировать концентрацию оксидов азота и не допускать "частичного бедного срыва", "полного бедного срыва" и "виброгорения".

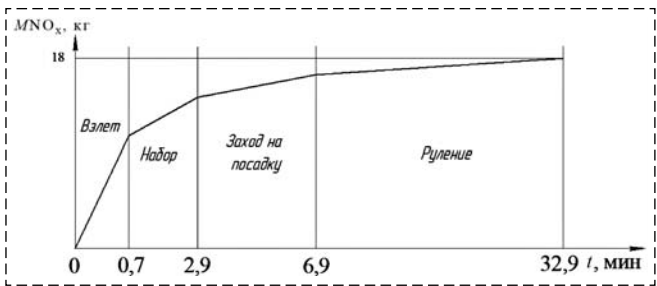


Рис. 6. Изменение линейного закона накопления интеграла MNO_x за весь цикл полета
Fig. 6. Change of the linear law of MNO_x integral accumulation for the whole flight cycle

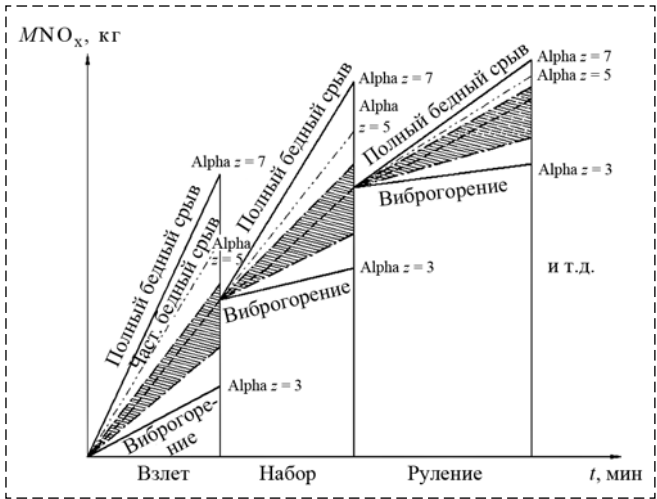


Рис. 7. Зоны регулирования в разных режимах работы авиационного ГТД
Fig. 7. Control zones in different modes of operation of the aircraft turbine engine

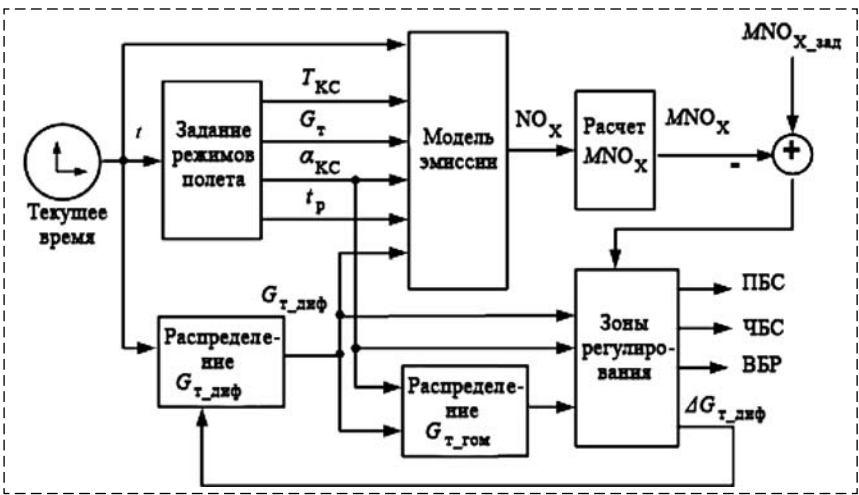


Рис. 8. Динамическая модель нейронной части регулятора на базе персептрона
Fig. 8. Dynamic model of the neural part of the regulator based on the perceptron

ния". На рис. 7 приведены зоны регулирования на разных режимах работы авиационного ГТД.

Была разработана динамическая модель системы управления КС, представленная на рис. 8.

Выходы ПБС, ЧБС, ВБР означают границы регулирования, представленные штриховкой на рис. 7 и определяющие границы полного "бедного" срыва, частичного "бедного" срыва и виброгорения соответственно. Работу данного блока можно описать следующим образом: при достижении вышеуказанных границ изменяется перераспределение топлива через диффузионный дозатор:

- при "полном бедном срыве" уменьшается $G_{т_диф}$ до 0,99 от фактического значения;
- при "частичном бедном срыве" увеличивается $G_{т_диф}$ до 1,01 от фактического значения;
- при "Виброгорении" увеличивается $G_{т_диф}$ до 1,1 от фактического значения);
- если ни один из перечисленных режимов не активировался, то уменьшается значение $G_{т_диф}$ на величину 0,9995.

В качестве модели эмиссии была выбрана нейронная сеть. Для каждого режима была составлена обучающая выборка на основании данных табл. 2.

На основе данных обучающих выборок для каждого режима построена нейронная сеть средствами MATLAB (nntool).

Нейронная сеть имеет шесть входных переменных (Time, $T_{КС}$, G_T , t_p , $G_{т_диф}$, $\alpha_{КС}$) и один выход NO_x . Исходя из точности модели и минимизации вычислений выбрана нейронная сеть с одним скрытым слоем и 100 нейронами в этом слое. Обучение проводилось методом Левенберга—Марквардта [19, 24].

Интеграция регулятора эмиссии вредных веществ в систему управления частотой двигателя представлена на рис. 9.

Результаты моделирования представлены на рис. 10 (см. вторую сторону обложки).

Таким образом, проведенный эксперимент показал, что САУ КС с нечетким и нейронным регулятором и регулятором MNO_x на режиме с минимизацией по текущему значению эмиссии отвечают полетным требованиям, обеспечивают работу в устойчивом диапазоне и допустимый вы-

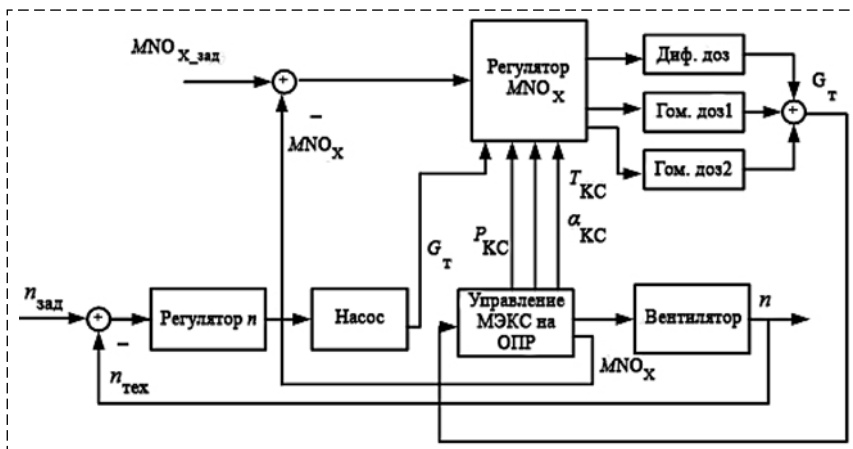


Рис. 9. Схема САУ по оборотам двигателя (вентилятора) с минимизацией выбросов вредных веществ

Fig. 9. Scheme ACS on engine speed (fan) minimizing emissions

брос эмиссии не более 18 кг за цикл взлет—полет—посадка".

Заключение

В работе предложен подход к построению САУ КС авиационного двигателя, обеспечивающий минимизацию выброса вредных веществ.

Показано, что для проектирования таких САУ необходимо использовать технологию искусственного интеллекта. В качестве интеллектуальных регуляторов рассмотрены нейронные регуляторы с обучением обратного распространения ошибки и алгоритмом Левенберга—Маркварда, а также нечеткие регуляторы на основе моделей Заде, Мамдани и Сугено. Для выбранной интегральной целевой функции (ошибка перерегулирования, время переходного процесса и статическая ошибка) получены лучшие показатели САУ для нейронного регулятора (алгоритм Левенберга—Маркварда) — 5,05, для нечеткого регулятора (модель Сугено) — 4,93.

Для минимизации выброса вредных веществ разработана динамическая модель системы управления КС, построенная на основе нейронной сети, обеспечивающая заданные требования (допустимый выброс не превышает 18 кг за полный цикл взлет—полет—посадка").

Список литературы

1. Августинovich В. Г., Кузнецова Т. А., Фатыков А. И., Нугуманов А. Д. Концепция управления малоэмиссионной камерой сгорания авиационного ГТД и ее эксперт-модель для обучения нейронной сети смарт-регулятора // Вестник

Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 53. С. 5—19.

2. Васильев А. Ю. Некоторые проблемы разработки малоэмиссионных камер сгорания и пути снижения эмиссии оксидов азота // Двигатель. 2016. № 6(108). С. 10—13

3. Lauer M., Farber J., Reith F., Masalme J. E. Model Based Prediction of Off-Design Operation Condition NOx Emission from DLE Gas Turbine Combustors // Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2017-63063. Charlotte, NC, USA. 2017. 11p.

4. Марчуков Е. Ю., Федоров С. А. Новая концепция низкоэмиссионной камеры сгорания стационарных ГТУ, разрабатываемых на базе авиационных ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. 2000. С. 143—152.

5. Комаров Е. М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. 2018. № 05. С. 9—29.

6. Avgustinovich V. G., Nazukin V. A. CFD Analysis of swirling flows in premixers // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014 [Electronic resource]: Turbine Technical Conference and Exposition (June 16—20, 2014, Dusseldorf, Germany) / American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Gas Turbine Institute. New York: ASME, 2014. Art. No. V04AT04A0511, electronic optical disc (DVD). 10 p.

7. Маркушин А. Н., Бакланов А. В. Исследование качества подготовки топливовоздушной смеси и его влияния на выбросы NOx в малоэмиссионной камере сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3-1 (143). С. 139—145.

8. Belokon A., Khirtov K., Klyachko L., Tschepin S., Zakharov V. Prediction of Combustion Efficiency and NOx Level for Diffusion Flame Combustors in HAT Cycles // Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2002-30609. Amsterdam, 2002. 9 p.

9. Зубилин И. А. Методика определения границы бедного срыва в камерах сгорания газотурбинных установок: дис. канд. техн. наук: 05.07.05. Самара: Изд-во Самарского нац. иссл. ун-та, 2016. 169 с.

10. Куценко Ю. Г. Методология проектирования малоэмиссионных камер сгорания ГТД на основе математических моделей физико-химических процессов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. 193 с.

11. Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО "Авиадвигатель", 2006. 1204 с.

12. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. М.: Физматлит, 2006. 352 с.

13. Avgustinovich V. G., Kutsenko Y. G. Creation and Application of Combined Calculation Methodology for Low Emission Combustion Chamber // Russian Aeronautics. 2011. Vol. 54, N. 2. P. 170—178.

14. Vanderhaegen E., Deneve M. Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network // Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2010-22899. Glasgow, 2010. 7 p.

15. Lamont W. G., Roa M., Lucht R. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine Combustion Rig // Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2014-25030. Dusseldorf, 2014. 10 p.

16. Warren G. Lamont. Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet

Temperature in a Fuel-Staged Gas Turbine Combustion Rig / Warren G. Lamont, Mario Roa, Robert P. Lucht // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. 2014. P. 1–10.

17. Булысова Л. А., Васильев В. Д., Гутник М. М., Гутник М. Н., Берне А. Л., Пугач К. С. Экспериментальные исследования эмиссий NO_x при сжигании топлива в одной и двух последовательно расположенных ступенях сгорания // Электрические станции. 2018. № 11 (1048). С. 15–23.

18. Hao Zh., Kefa C., Jianren F. Modeling and optimization of the NO_x emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks. Clean Energy and Environment Engineering Key Lab of MOE, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, PR China Received 7 February 2001.

19. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.

20. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2017. 79 с.

21. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А., Титов Ю. К. Проектирование адаптивного нечеткого регулятора положения дозатора воздушно-реактивного двигателя // Электротехника. 2018. № 11. С. 6–11.

22. Гостев В. В. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.

23. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А., Софин Н. А. Разработка адаптивного нечеткого регулятора частоты и встроенной модели авиационного двигателя с применением нейронной технологии // 14-я Международная конференция "Авиация и космонавтика — 2015" Тезисы Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2015. С. 157–159.

24. Хижняков Ю. Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: Учеб. пособ. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 303 с.

Neuro-Fuzzy Harmful Substances Control of Aircraft Gas Turbine Engine

N. V. Andrievskaya¹, anv@msa.pstu.ru, O. A. Andrievskiy², andrievsky@niuitmo.ru,
M. D. Kuznetsov², kuznetcov.1997@yandex.ru, T. S. Legotkina¹, nedonosh@mail.ru,

V. S. Nikulin¹, kalif23@yandex.ru, S. A. Storozhev¹, cepa5@mail.ru,

Y. N. Khizhnyakov¹, H1941@yandex.ru, A. A. Yuzhakov¹, uz@at.pstu.ru

¹Perm national research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation,

²ITMO University, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Khizhnyakov Yuri N., D. Sc., Associate Professor,
Perm national research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation,
e-mail: H1941@yandex.ru

Accepted on December 12, 2019

Abstract

One of the directions of aviation development is solving environmental problems, which excludes the emission of harmful substances into the atmosphere (nitric oxide, carbon monoxide) during the operation of an aircraft gas turbine engine (GTE) [1]. At low temperatures, oxygen and nitrogen are inert gases. At temperatures of 1100... 1600 K, oxides are formed, where nitrogen takes a valence of one to five. At temperatures above 1600 K, their atomic decomposition occurs. At temperatures in the range of 1100–1600 K, a reduction in NO_x is possible with good mixing and a sufficient length of the combustion chamber, which determines the burning time of gases. If the combustion process is interrupted due to the poor operation of the automation, either vibro-combustion (atomic decomposition of NO_x oxide) occurs at a temperature of 1600 K or flame failure occurs at 1100 K. Improving the process of converting the chemical energy of fuel and converting it into mechanical energy under conditions of uncertainty (variable caloric content of kerosene, changes in environmental parameters, wear of control equipment) is possible using neuro-fuzzy control of aviation gas turbine engine emissions into the environment. The control signal will be the fuel consumption in the diffusion manifold. In this case, fuel consumption in homogeneous reservoirs will vary evenly, provided that the total amount of fuel remains constant for the engine under consideration (the thrust should not change in the mode). A dynamic model of a neuro-fuzzy fuel consumption regulator by a diffusion collector has been developed. The method of obtaining training samples "% GT" = $f(\text{MNO}_x)$ for constructing the neural part of the regulator is presented. The desired "triangular" region of MNO_x location (the integral of emission of nitrogen oxide emissions) is determined, on the basis of which control algorithms "with economy" and "without economy" of the MNO_x integral are proposed.

Keywords: aircraft engine, metering device (diffusion and homogeneous), low-emission combustion chamber, fuzzy control (fuzzification, logical inference unit, defuzzification), neural control (perceptron, error back propagation method, Levenberg-Marquardt method)

Acknowledgements: This work was performed under the SC R&D agreement Development and research of fuzzy and neural network automatic control systems of a promising turbojet dual-circuit engine with increased thrust" No. 0000000020956180193/2018/537 dated 29.01.2019 with OEC-STAR JSC.

For citation:

Andrievskaya N. V., Andrievskiy O. A., Kuznetsov M. D., Legotkina T. S., Nikulin V. S., Storozhev S. A., Khizhnyakov Y. N., Yuzhakov A. A. Neuro-Fuzzy Harmful Substances Control of

Aircraft Gas Turbine Engine, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 6, pp. 348–355.

DOI: 10.17587/mau.21.348-355

References

1. Avgustinovich V. G., Kuznetsova T. A., Fatykov A. I., Nugumanov A. D. The concept of management low emission

combustor GTE and its expert model for training the neural network of smart regulator, *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*, 2018, no. 53, pp. 5–19 (in Russian).

2. **Vasil'ev Y.** Some problems develop low-emission combustors and ways to reduce emissions of nitrogen oxides, *Engine*, 2016, no. 6 (108), pp. 10–13 (in Russian).

3. **Lauer M., Farber J., Reith F., Masalme J. E.** Model Based Prediction of Off-Design Operation Condition NOx Emission from DLE Gas Turbine Combustors, *Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2017-63063*, Charlotte, NC, USA, 2017, 11 p.

4. **Marchukov E. Y., Fedorov S. A.** The new concept of a low-emission combustion chambers of stationary gas turbines, developed on the basis of GTE, *Vestnik of Samara State Aerospace University. Combustion processes, heat transfer and environmental heat engines*, 2000, pp. 143–152 (in Russian).

5. **Mosquitoes E. M.** Methods reduce the emission of pollutants in combustion chambers of gas turbine engines and gas turbines, *Engineering and Computer Technology*, 2018, no. 05, pp. 9–29 (in Russian).

6. **Avgustinovich V. G., Nazukin V. A.** CFD Analysis of swirling flows in premixers, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014* [Electronic resource]: Turbine Technical Conference and Exposition (June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany), American Society of Mechanical Engineers (ASME), International Gas Turbine Institute, New York: ASME, 2014, Art. No. V04AT04A0511, electronic optical disc (DVD), 10 p.

7. **Markushin A. N., Baklanov A. V.** Research quality fuel mixture preparation and its effect on NOx emission in low emission combustion chamber TBG, *Vestnik Samara State Aerospace University. Academician S. P. Korolev (National Research University)*, Samara, 2013, no. 3-1 (143), pp. 139–145 (in Russian).

8. **Belokon A., Khirtov K., Klyachko L., Tschepin S., Zakharov V.** Prediction of Combustion Efficiency and NOx Level for Diffusion Flame Combustors in HAT Cycles, *Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2002-30609*, Amsterdam, 2002, 9 p.

9. **Zubilin I. A.** Method for determining the boundaries of poor breakdown in the combustion chambers of gas turbines: dis. cand. tehn. Sciences: 05.07.05, Samara, Samara Publishing House nat. Inst. University Press, 2016, 169 p. (in Russian).

10. **Kutsenko Y. G.** Methodology of designing low-emission combustors TBG based on mathematical models of physical and chemical processes: dis.... Dr. tehn. Sciences: 05.07.05, Perm, Publishing house of Perm. state. tehn. University Press, 2010, 193 p. (in Russian).

11. **Inozemtzev A. A., Sandratsky V. L.** Gas turbine engines. Perm, JSC Aircraft Engine", 2006. 1204 p. (in Russian).

12. **Varnatts Yu., Maas W., Dibble R.** Combustion. Physical and chemical aspects, simulation experiments, the formation of pollutants, Moscow, FIZMATLIT, 2006, 352 p. (in Russian).

13. **Avgustinovich V. G., Kutsenko Y. G.** Creation and Application of Combined Calculation Methodology for Low Emission Combustion Chamber, *Russian Aeronautics*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 170–178.

14. **Vanderhaegen E., Deneve M.** Predictive Emissions Monitoring Using a Continuously Updating Neural Network, *Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2010-22899*, Glasgow, 2010, 7 p.

15. **Lamont W. G., Roa M., Lucht R.** Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in Fuel Staged Gas Turbine Combustion Rig, *Proc. ASME Conf. Turbo Expo GT2014-25030*, Dusseldorf, 2014, 10 p.

16. **Lamont W. G., Roa M., Lucht R. P.** Application of Artificial Neural Networks for the Prediction of Pollutant Emissions and Outlet Temperature in a Fuel-Staged Gas Turbine Combustion Rig, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, 2014, pp. 1–10.

17. **Bulysova L. A., Vasiliev V. D., Gutnick M. M., Gutnick M. N., Berne A. L., Pugatch K. S.** Experimental studies NOx emissions during combustion of fuel in one or two sequentially arranged combustion stages, *Electric stations*, 2018, no. 11 (1048), pp. 15–23 (in Russian).

18. **Hao Zh., Kefa C., Jianren F.** Modeling and optimization of the NOx emission characteristics of a tangentially fired boiler with artificial neural networks, *Clean Energy and Environment Engineering Key Lab of MOE*, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, PR china Received 7 February 2001.

19. **Osovsky S.** Neural networks for information processing, Moscow, Finance and Statistics, 2004, 344 p. (in Russian).

20. **Pegat A.** Fuzzy modeling and control, Moscow, Bean. Knowledge Laboratory, 2017, 79 p. (in Russian).

21. **Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A., Titov Yu. K.** Design of adaptive fuzzy control position of the metering jet engine, *Electrical engineering*, 2018, no. 11, pp. 6–11 (in Russian).

22. **Gostev V. V.** Design of fuzzy controllers for automatic control systems, SPb, BHV-Petersburg, 2011, 416 p. (in Russian).

23. **Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A., Sofin N. A.** Development of an adaptive fuzzy frequency controller and an integrated model of an aircraft engine using neural technology, *14th International Conference "Aviation and Cosmonautics — 2015"*, 2015, pp. 157–159 (in Russian).

24. **Khizhnyakov Yu. N.** Fuzzy, neural and hybrid control, Perm, Publishing house Perm. nat. researched Polytechnic University, 2013, 330 p. (in Russian).