

В. Н. ШЕЛУДЬКО, П. В. СОКОЛОВ, О. А. АНДРИЕВСКИЙ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В докладе рассмотрена система управления малоэмиссионной камерой сгорания газотурбинного двигателя. Входными характеристиками малоэмиссионной камеры сгорания являются следующие параметры: температура за камерой сгорания, давление в камере сгорания, коэффициент избытка воздуха, эмиссия (окись азота). Управление данными параметрами осуществляется изменением расхода топлива и распределения подачи топлива по гомогенным и диффузионным контурам (диффузионные и гомогенный факелы). Главными параметрами контроля являются эмиссия и срыв пламени. Предложена система управления малоэмиссионной камерой сгорания на основе искусственной нейронной сети.

Введение. При разработке современных авиационных двигателей кроме требований надежности и безопасности предъявляются дополнительные требования по соблюдению экологической чистоты работы двигателя. [1]

Экологическая чистота обеспечивается за счет уменьшения объемов вредных выбросов (оксиды азота и углерода). [2].

Требования экологической чистоты осуществляется за счет проектирования камер сгорания (КС) нового типа – малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС).

Постановка задачи. Анализ возможных решений

1.1 Описание МЭКС. МЭКС точно так же и КС старого типа реализуют основную функцию – обеспечение мощности и скорости авиационного двигателя. [3].

Кроме того, МЭКС должна обеспечивать минимальный объем выбросов вредных веществ. Однако, при минимизации вредных выбросов могут возникнуть недопустимые режимы, такие как «бедный» срыв или виброгорение. Поэтому проектирование МЭКС и систем её управления осуществляется в условиях жестких ограничений, обеспечивающий режим работы КС, не допускающий режим виброгорения и «бедного» срыва (рис. 1). [6]

Режимы виброгорения и «бедного» срыва являются случайными процессами, описываемыми с помощью функции плотности распределения (рис. 2).

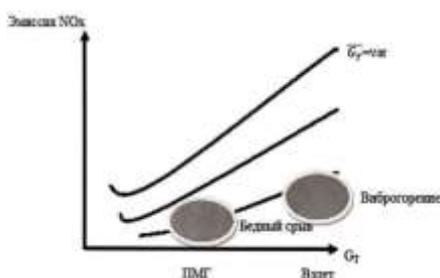


Рис. 1. Режимы «бедного» срыва и виброгорения

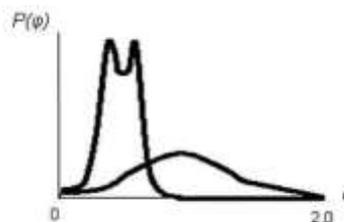


Рис. 2. Функция плотности распределения режимов «бедного» срыва и виброгорения

Параметр φ является функцией от коэффициента избытка воздуха. Коэффициент избытка воздуха a имеет вид:

$$a = \frac{G_B}{L_0 G_T},$$

где G_B – это расход воздуха, L_0 – это стехиометрический коэффициент, характеризующий химический состав топлива, G_T – это расход топлива. [6]

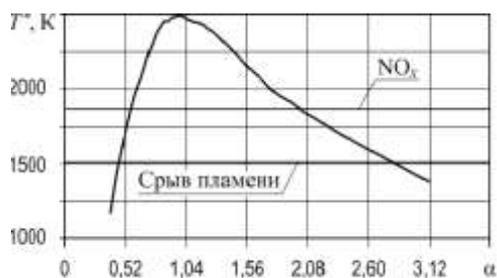


Рис. 3. Зависимость температуры пламени от состава топливоздушную массы смеси срыва и виброгорания

Режимы виброгорания и «бедного» срыва, а также увеличение объемов выбросов вредных веществ зависят от температуры пламени в камере сгорания.

Зависимости температуры КС, а также моменты возникновения режимов «бедного» срыва и виброгорания от коэффициента α представлены на рис. 3.

Кривая на рис. 3 не является постоянной, а может изменяться в зависимости от вида топлива и параметров КС, таких как: давление, температура внутри КС, а также окружающей среды и другие.

Минимальный выброс вредных веществ в МЭКС обеспечивается за счет особой структуры КС, когда топливо подается не только через основной диффузионный контур, но также через дополнительные гомогенные контуры, распространенные по всей области КС. Такой способ перераспределения топлива обеспечивает как основные функции КС, так и минимизацию вредных веществ. [6]

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что МЭКС как объект управления (ОУ) характеризуется следующими свойствами: нелинейность и стохастичность основных параметров КС. В качестве алгоритмов управления МЭКС могут быть использованы алгоритмы адаптивного управления и методы искусственного интеллекта.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что МЭКС как объект управления (ОУ) характеризуется следующими свойствами: нелинейность и стохастичность основных параметров КС. В качестве алгоритмов управления МЭКС могут быть использованы алгоритмы адаптивного управления и методы искусственного интеллекта.

1.2 Задача управления МЭКС. Для реализации управления малоэмиссионной камерой сгорания необходимо выбрать способ управления. В данной работе представлено управление двумя способами. Первый способ заключается в перераспределении топлива по дозирующим устройствам в зависимости от скорости вентилятора ГТД. Второй способ – это перераспределение топлива по дозирующим устройствам, но уже в зависимости от общего количества топлива.

Границы управления МЭКС заключается в трех составляющих:

- 1) отсутствие «бедного» срыва пламени;
- 2) недопущение в системе виброгорания (термоакустического автоколебания);
- 3) уменьшение выброса эмиссии.

1.3 Анализ алгоритмов управления САУ МЭКС. Типовые регуляторы, отличавшиеся простотой реализации и достаточной базой настройки параметров, не могут быть использованы, так как их настройка зависит от структуры и параметров объекта исследования.

Методы искусственного интеллекта (нечеткие, нейронные и нейронечеткие регуляторы) характеризуются несложными алгоритмами обучения и настройки, которые достаточно хорошо проработаны в различных программных продуктах. Недостатками данных методов является: необходимость достаточно объемной экспериментальной выборки и реализация регуляторов в виде «черного ящика», из которого практически невозможно получить физически понятные параметры регулирования. Кроме того, в нечетких и нейронных регуляторах возникают проблемы с устойчивостью управления и переобучением.

Адаптивное управление характеризуется многообразием алгоритмов адаптации и широкой областью применения. Гибкость адаптивного управления позволяет осуществлять как настройку регуляторов, в условиях как «априорной», так и «текущей» (т. е. в процессе эксплуатации) неопределенности модели объекта управления. Кроме того, алгоритмы адаптивного управления хорошо сочетаются с типовыми регуляторами и нечеткими регуляторами. При разработке алгоритмов адаптивного управления не требуется большой объем экспериментальных выборок. Эталонная модель может быть представлена различным математическим описанием.

На основе анализа достоинств и недостатков различных методов управления, применительно к задачам управления МЭКС, в данной работе предлагается использование адаптивного регулятора для настройки параметров типового регулятора и параметров объекта. Для реализации модели МЭКС в контуре управления предложен нейронечеткий подход.

1.4 Анализ качества управления. В качестве анализа системы управления будут рассмотрены две модели управления МЭКС:

- 1) Система управления МЭКС с типовым регулятором.
- 2) Система управления МЭКС с адаптивным.

Для грамотного анализа качества управления проведено два эксперимента, один из них будет основан на режиме «запуск двигателя – взлет», второй режим – это режим помпажа двигателя, который был представлен в предыдущей главе. Результатом анализа представлен график моделирования выходной характеристики оборотов.

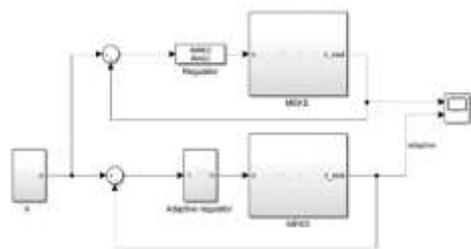


Рис. 4. Модель управления МЭКС с типовым и адаптивным регуляторами топливно-воздушной массы смеси срыва и виброгорения

с реализацией нечеткой логики в МЭКС при формировании характеристических внутренних величин). Однако при применении адаптивного регулятора на выходной характеристики можно заметить отсутствие «скачков», что в первую очередь связано с реализацией управления различными режимами дозаторов.

Заключение. В соответствии с поставленной целью в данной работе были рассмотрены: Принципы функционирования ГТД и МЭКС. Предложен алгоритм управления МЭКС. Произ-

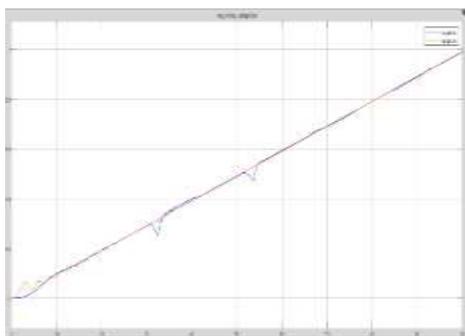


Рис. 5. График моделирования выходной характеристики (n_{real})

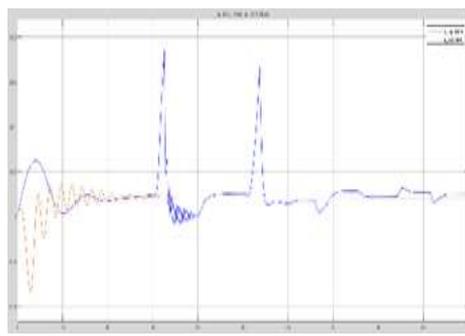


Рис. 6. График моделирования ошибки выходной характеристики (n_{real}) от задающей (n)

ведено моделирование адаптивной системы управления МЭКС на режиме «запуск ГТД – взлёт» и на режиме помпажа ГТД. Представлено графическое представление моделирования. Произведен анализ качества и сравнения адаптивного регулятора с типовым регулятором. Сделан вывод, что адаптивный регулятор отрабатывает задающее воздействие на режиме помпажа ГТД, в отличие от типового регулятора.

Разработанные САУ будут использованы в дальнейшем для задачи минимизации вредных выбросов NO_x и CO в соответствии с мировыми требованиями к воздушным судам.

Данная работа выполнялась в рамках научно-исследовательского договора с АО «ОДК-СТАР» и является законченным результатом первого этапа: управление МЭКС в рамках рабочего режима полного цикла «взлет-полет».

ЛИТЕРАТУРА

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

3. **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.
4. **Кузнецова Т.А., Августинович В.Г.** Вопросы теории и практики разработки робастных систем управления авиационными двигателями на базе встроенных математических моделей. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. 265 с.
5. **Васильев А.Ю.** Некоторые проблемы разработки малоэмиссионных камер сгорания и пути снижения эмиссии оксидов азота. *Двигатель*, 2016 № 6(108). С. 10–13.
6. **Андриевская Н.В., Андриевский О.А., Кузнецов М.Д., Леготкина Т.С., Никулин В.С., Сторожев С.А., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А.** Нейронечеткое управление выбросами вредных веществ авиационного газотурбинного двигателя. *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2020. Т. 21. № 6. С. 348-355.

V.N.Sheludko, P.V.Sokolov, O.A.Andrievsky (ETU «LETI», Saint Petersburg)

Design and research of control systems for a low-emission combustor of a gas turbine engine

In this paper considers the control system for a low-emission combustion chamber of a gas turbine engine. The input characteristics of a low-emission combustion chamber are the following parameters: temperature behind the combustion chamber, pressure in the combustion chamber, excess air coefficient, emission (nitrogen oxide). The control of these parameters is carried out by changing the fuel consumption and the distribution of the fuel supply over homogeneous and diffusion circuits (diffusion and homogeneous torches). The main control parameters are emission and flameout. A control system for a low-emission combustion chamber based on an artificial neural network is proposed.