

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭМИССИЕЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА БЕЛЛМАНА

Кузнецова Т.А., Августинович В.Г., Наборщиков А.А.

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г.Пермь*

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, малоэмиссионная камера сгорания, выброс вредных веществ, зона устойчивого горения, бедный срыв, виброгорение, принцип оптимальности Беллмана, интегральный показатель эмиссии.

Аннотация. Эмиссия вредных веществ в современных авиационных двигателях становится не менее критичным параметром, чем тяга. Актуальной задачей является непрерывный мониторинг эмиссии по параметрам двигателя для обеспечения заданного интегрального уровня эмиссии за цикл взлет-посадка с учетом необходимости обеспечения устойчивой работы камеры сгорания (в границах от «бедного» срыва до виброгорения). Разработаны и апробированы алгоритмы адаптивного управления эмиссией с применением метода Беллмана, позволяющие, избегая запрещенных режимов, снизить интегральное количество выбросов более чем в 2 раза.

OPTIMAL CONTROL OF EMISSIONS OF HARMFUL SUBSTANCES FROM COMBUSTION CHAMBERS OF GAS TURBINE AEROENGINES BASED ON THE BELLMAN METHOD

Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G., Naborshchikov A.A.

Perm National Research Polytechnic University, Perm

Keywords: gas turbine aeroengine, low-emission combustion chamber, emission of harmful substances, stable combustion zone, lean blowout (LBO), vibration combustion, Bellman's optimality principle, integral emission index.

Abstract. The emission of harmful substances in modern aircraft engines is no less critical parameter than thrust. So an urgent task is the continuous monitoring of emissions by engine parameters to ensure the set integral emission level for the take-off-landing cycle, taking into account the need to ensure stable operation of the combustion chamber (ranging from lean blowout to vibration combustion). Using the Bellman method, the adaptive algorithms of emission control, allowing to avoid of the forbidden modes and to reduce the integral amount of emissions by more than 2 times, have been developed and tested.

Необходимость обеспечения для современного авиационного двигателя норм ИКАО на эмиссию вредных веществ в атмосферу (главным образом – оксидов азота) требует использования малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС), характеризующейся узким диапазоном устойчивой работы (горения), ограниченным, с одной стороны возможным бедным срывом пламени (LBO), а с другой стороны, виброгорением. В этой связи актуальным является применение прогностических методов адаптации систем автоматического управления (САУ). При этом алгоритмы САУ, кроме оценки эмиссии, должны включать оценку запасов устойчивости МЭКС к LBO и автоколебаниям термоакустической природы. Особенностью задаваемого для авиационных двигателей показателя

уровня эмиссии окислов азота является его интегральный характер, т.е. количество выбросов за цикл взлет-посадка в пределах высоты полета до 1000 м.

В настоящем исследовании решалась задача разработки алгоритмов адаптивного управления эмиссией окислов азота с помощью следящей системы управления диффузионным факелом, построенной по методу Беллмана.

При разработке САУ объект управления был заменен полуэмпирической математической моделью генерации оксидов азота в МЭКС, построенной по уравнению Зельдовича, которое позволяет определить зависимость скорости реакции S_{NO} от состава топливоздушнoй смеси с помощью функции распределения плотности вероятности изменения (пульсаций) концентрации топлива в смеси $P(\varphi)$. Аргумент φ позволяет определять диапазон устойчивого горения (в частности – бедный срыв пламени). Моделирование взаимодействия диффузионного и гомогенного факелов в камере сгорания велось на основе гипотезы применимости принципа суперпозиции при расчете функций распределения вероятностей. Разработанная модель МЭКС учитывает акустику камеры сгорания и способна идентифицировать режим виброгорения.

Принцип оптимальности Беллмана позволяет строить систему динамического программирования, для которой задача оптимизации интерпретируется как n -шаговый процесс, а в основе алгоритмов лежит рекуррентное уравнение (1):

$$F_k^*(x_{k-1}) = \min_{u_k} [f_k(x_{k-1}, u_k) + F_{k+1}^*(x_k)], \quad -1, n-2, \dots, 1, \quad (1)$$

$$F_n^*(x_{k-1}) = \min_{u_n} [f_n(x_{n-1}, u_n)], \quad F_{n+1}^*(x_n) = 0, \quad k = n,$$

где $F_k^*(x_{k-1})$ – минимальное значение целевой функции на предыдущем шаге, $F_{k+1}^*(x_k)$ – условный минимум на следующем $(k+1)$ -шаге, u_k – оптимальное управление на k -шаге, x_k – начальное состояние системы для шагов с $(k+1)$ до n .

В результате модельного эксперимента в среде MATLAB были получены результаты для трех моделей САУ эмиссией МЭКС: модель без оптимизации; модель с традиционной для задач данного класса оптимизацией с применением метода условного прямого последовательного поиска для заранее неизвестной функции; модель с оптимизацией на основе метода Беллмана (с прогнозированием). Интегральное количество выбросов в абсолютных величинах $EINO_x$ (г) за период $t=1,18 \cdot 10^4$ с для трех САУ представлено на рисунке 1. Индикация запрещенных состояний, доля топлива поступающего в диффузионные коллекторы и величина выбросов сгенерированная за такт ($\Delta t = 0.02$ с) для трех САУ представлены в таблице 1.

Анализ полученных данных показал, что оптимизация с применением метода условного прямого последовательного поиска уменьшает интегральное количество выбросов NO_x в 7,3 раза, но фактически на протяжении всего периода работы МЭКС наблюдается виброгорение, что является абсолютно недопустимым.

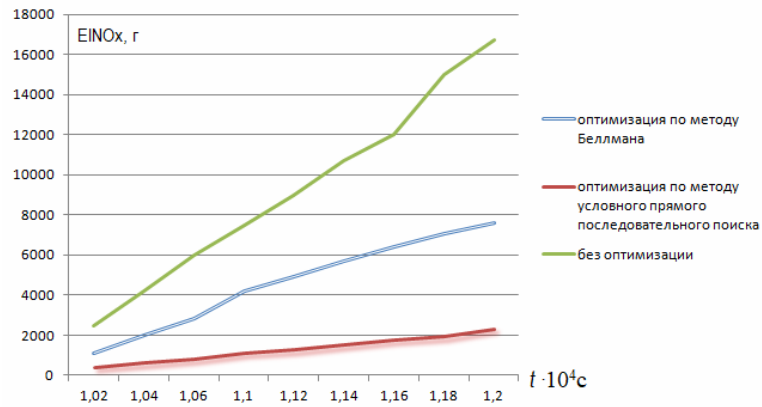


Рис. 1. Интегральное количество выбросов NOx (г) за период ($t=1,18 \cdot 10^4$ с) для трех видов САУ

Табл. 1. Характеристики эмиссии для трех случаев оптимизации управления

Вид оптимизации управления эмиссией	Доля топлива через диффузионный коллектор	Запрещенные режимы	Величина выбросов, г/такт ($\Delta t=0.02$ с)
без оптимизации	0,110	нет	0,518
по методу прямого поиска	0,018	Виброгорение весь период	0,025
по методу Беллмана	0,050	нет	0,075

Оптимизация по Беллману полностью позволяет избежать запрещенных состояний, уменьшая интегральный выброс в 2.2 раза и снижая долю топлива через диффузионный коллектор в 2 раза. Таким образом, применение метода Беллмана для оптимизации управления эмиссией NOx имеет явное преимущество, поскольку осуществляет поиск наиболее оптимального решения с учетом исключения всех запрещенных состояний объекта оптимизации (бедный срыв и виброгорение).

Список литературы

1. Августинович В.Г., Кузнецова Т.А., Нугуманов А.Д. Разработка нейронных систем мониторинга и управления эмиссией вредных веществ для газотурбинных газоперекачивающих агрегатов и электростанций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – № 8. – С. 7-17.
2. Kuznetsova T.A., Avgustinovich V.G. Virtual NOx-emission sensors for aero engine control // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – 2020. – Vol. 862. – P. 052014.
3. Неймарк Ю.И. Динамические системы и управляемые процессы. – М.: Наука, 1978. – 336с.
4. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 458с.
5. Арис Р. Дискретное динамическое программирование. – М.: Мир, 1969. – 171с.

Сведения об авторах:

Кузнецова Татьяна Александровна – к.т.н., доцент, доцент кафедры Конструирования и технологий в электротехнике, ПНИПУ, Пермь;

Августинович Валерий Георгиевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры Авиационных двигателей, ПНИПУ, Пермь;

Наборщиков Антон Алексеевич – аспирант, ПНИПУ, Пермь.