

## К УЧЁТУ ПРОЕКТНОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ПРИ ВЫБОРЕ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГТД В СИСТЕМЕ ВЕРТОЛЁТА НА ЭТАПЕ НАЧАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

© 2018 В.А. Григорьев, А.О. Загребельный

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

### TO ACCOUNT PROJECT UNCERTAINTY AT THE SELECTION VALUES OF PARAMETERS OF THE WORKING PROCESS OF GTE IN THE HELICOPTER SYSTEM AT THE INITIAL STAGE DESIGN

Grigoriev V.A., Zagrebelyi A.O. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

*When designing a gas turbine engine in a helicopter system in the early stages of design, it is necessary to take into account the significant uncertainty in the values of the initial design data. This article which make it possible to simplify the process of accounting for design uncertainty.*

Вертолётный газотурбинный двигатель (ГТД) как объект проектирования представляет собой подсистему, входящую в состав сложной системы более высокого уровня – летательного аппарата (ЛА). Оптимальность выбираемых значений параметров такого ГТД, связана с получаемой при этом эффективностью ЛА.

При предварительных параметрических исследованиях ГТД необходимо определить такое сочетание параметров рабочего процесса силовой установки (СУ), которые бы обеспечивали проектируемому вертолёту эффективность, близкую к максимальной [1]. При этом хорошо известно, что эффективность современных ЛА характеризуется не одним, а несколькими критериями (лётными, техническими, экономическими, эксплуатационными и т.п.), каждому из которых соответствуют свои оптимальные значения параметров двигателя.

Анализ проектных процедур показывает, что при выборе значений проектных данных авиационных двигателей разработчик сталкивается с несколькими видами неопределённостей, одна из которых – неопределённость исходной информации, которая вызывает неоднозначность результатов проектирования ГТД, тем самым осложняет стратегию поиска и выбора его рациональных значений параметров рабочего процесса [2].

Как показано в работе [2], описанную проблему в ходе решения проектной задачи можно устранить путём получения области компромиссных решений, точнее, той её час-

ти, которая устойчива к неопределённости исходной информации.

Обычно процесс начального проектирования ГТД базируется на системе сложных взаимосвязанных математических моделей. Их алгоритмический характер не обеспечивает в явном виде аналитических решений, непосредственно связывающие оптимизируемые параметры, внешние и внутренние исходные данные и целевые функции [3].

Проблема учёта неопределённости исходных данных осложняется отсутствием на этапе начального проектирования их вероятностного описания. Для большинства данных неоднозначной величины в начале проектирования, в лучшем случае, можно лишь оценить вероятные пределы их изменения. Нахождение устойчивой зоны области компромиссных решений путём перебора таких значений (кроме базовых) исходных данных становится практически неразрешимой задачей, т.к. только число вариантов оптимумов (не считая координат изолиний) достигает  $2^{20}$ - $2^{30}$ .

Поэтому для эффективного нахождения устойчивых к влиянию проектной неопределённости вариантов компромиссных решений используют специальные аналитические решения, которые основываются на представлении целевых функций в виде зависимостей от массы двигателя ( $M_{дв}$ ) и удельного расхода топлива ( $C_{e кр}$ ). Эти выражения и их производные используются для определения наиболее неблагоприятного сочетания исходных факторов.

Критерии оценки эффективности вертолѐта можно представить в виде их полиномиальных зависимостей от  $T_{\Gamma}^*$  и  $\pi_{\kappa}$  [4]. Но такие зависимости не учитывают влияние неопределѐнности проектной информации. Поэтому для получения таких зависимостей используют методы теории планирования эксперимента [4].

Проведѐнные исследования показали, что наиболее оптимально применение ротатбельного ортогонального центрального композиционного плана эксперимента (РОЦКП) с разрешающей способностью IV и степенью дробности  $p = 2$  ядра дробного факторного эксперимента (ДФЭ), что позволило уменьшить объѐм расчѐтов. Для того чтобы модель адекватно описывала нелинейный характер протекания зависимостей критериев оценки эффективности от оптимизируемых параметров и факторов неопределѐнности дробный план был дополнен опытами в центральных и т.н. «звѐздных точках», т.е. применено планирование второго порядка.

На основе статистической обработки результатов расчѐта критериев эффективности  $M_0$  и  $C_{\text{ТКМ}}$ , были получены математические модели для диапазона исходных данных, с  $(T_{\Gamma}^*, \pi_{\kappa}, \sigma_{\text{ВХ}}, \eta_{\kappa}, \eta_{\Gamma}, \eta_{\text{СТ}}) = \text{var}, (L_{\text{П}}, V_{\text{П кр}}) = \text{const}$ :

$$M_0(T_{\Gamma}^*, \pi_{\kappa}, \sigma_{\text{ВХ}}, \eta_{\kappa}, \eta_{\Gamma}, \eta_{\text{СТ}}, L_{\text{П}}, V_{\text{П кр}}) = 110,3 - 0,1132T_{\Gamma}^* + 1,443 \cdot 10^{-5}T_{\Gamma}^{*2} + 2,797\pi_{\kappa} + 227,406\sigma_{\text{ВХ}}^2 + 244,45\eta_{\kappa}^2 - 130,54\eta_{\Gamma}^2 - 33,41\eta_{\text{СТ}}^2 - 0,199V_{\text{П кр}} - 36,59 \cdot 10^{-5}T_{\Gamma}^*\pi_{\kappa} + 0,84\pi_{\kappa}\sigma_{\text{ВХ}} + 0,0497T_{\Gamma}^*\eta_{\kappa} - 2,015\pi_{\kappa}\eta_{\kappa} - 655,25\sigma_{\text{ВХ}}\eta_{\kappa} + 0,0435T_{\Gamma}^*\eta_{\Gamma} - 1,7632\pi_{\kappa}\eta_{\Gamma} + 255,78\eta_{\kappa}\eta_{\Gamma} - 7,755 \cdot 10^{-6}T_{\Gamma}^*L_{\text{П}} + 187,4 \cdot 10^{-6}\pi_{\kappa}L_{\text{П}} + 74,28 \cdot 10^{-3}\sigma_{\text{ВХ}}L_{\text{П}} - 0,0332\eta_{\kappa}L_{\text{П}} - 0,03544\eta_{\Gamma}L_{\text{П}} + 6,015 \cdot 10^{-6}T_{\Gamma}^*V_{\text{П кр}} + 0,209\eta_{\text{СТ}}V_{\text{П кр}},$$

$$C_{\text{ТКМ}}(T_{\Gamma}^*, \pi_{\kappa}, \sigma_{\text{ВХ}}, \eta_{\kappa}, \eta_{\Gamma}, \eta_{\text{СТ}}, L_{\text{П}}, V_{\text{П кр}}) = 171,42 - 33,44 \cdot 10^{-3}T_{\Gamma}^* + 1,345\pi_{\kappa} + 0,0122\pi_{\kappa}^2 + 43,795\sigma_{\text{ВХ}}^2 - 192,9\eta_{\Gamma} - 109,45\eta_{\text{СТ}} - 0,0872V_{\text{П кр}} -$$

$$136,9 \cdot 10^{-6}T_{\Gamma}^*\pi_{\kappa} + 22,02 \cdot 10^{-3}T_{\Gamma}^*\eta_{\kappa} - 0,9259\pi_{\kappa}\eta_{\kappa} - 131,93\sigma_{\text{ВХ}}\eta_{\kappa} + 0,0201T_{\Gamma}^*\eta_{\Gamma} - 0,8228\pi_{\kappa}\eta_{\Gamma} + 118,984\eta_{\kappa}\eta_{\Gamma} + 93,965\eta_{\Gamma}\eta_{\text{СТ}} - 1,82 \cdot 10^{-6}T_{\Gamma}^*V_{\text{П кр}} - 0,15 \cdot 10^{-3}\pi_{\kappa}V_{\text{П кр}} + 0,092\eta_{\text{СТ}}V_{\text{П кр}},$$

Оценка адекватности проводилась с помощью множественного коэффициента детерминации  $R^2$  [4], который составил 0,97, что говорит о сильной взаимосвязи между независимыми переменными и целевой функцией.

В результате проведенных исследований были получены регрессионные модели, позволяющие исследовать взаимовлияние исходных проектных данных, влияние неопределѐнности на величины  $M_0$  и  $C_{\text{ТКМ}}$ , и получать гарантированные устойчивые решения, а также проводить исследования по смещению и деформации областей рациональных значений параметров (и соответственно области компромиссных решений), что позволяет оценивать и ранжировать влияющие факторы на этапе начального проектирования вертолѐтного ГТД.

#### Библиографический список

1. Маслов В.Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1981. 123 с.
2. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД/ В.Г.Маслов, В.С.Кузьмичев, А.Н. Коварцев, В.А.Григорьев. Самара, СГАУ, 1996. 147 с.
3. Вертолѐтные газотурбинные двигатели/ Под общ. ред. В.А. Григорьева и Б.А. Пономарева. М.: Машиностроение, 2007. 491 с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1972. 279 с.