

УДК 621.431.75(075)

**ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИСХОДНЫХ ПРОЕКТНЫХ ДАННЫХ НА ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

© 2012 В. С. Кузьмичев, А. Ю. Ткаченко, В. Н. Рыбаков, И. Н. Крупенич, В. В. Кулагин

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье описано влияние неопределённости исходных проектных данных на выбор оптимальных параметров рабочего процесса газотурбинного двигателя. Приведены коэффициенты чувствительности оптимальных параметров рабочего процесса и критериев эффективности летательного аппарата к изменению некоторых исходных проектных данных по силовой установке и летательному аппарату.

*Оптимизация, рабочий процесс, газотурбинный двигатель, неопределённость исходных данных, выбор параметров.*

Важнейшим аспектом современного проектирования авиационной силовой установки (СУ) является определение оптимальных величин параметров двигателя и его элементов на всех этапах проектирования.

При выборе оптимальных параметров рабочего процесса газотурбинного двигателя (ГТД) на основе критериев оценки летательного аппарата (ЛА) необходимо обеспечить наивыгоднейшее согласование выходных параметров СУ с запроектированными параметрами ЛА. В сложившейся практике проектирования ГТД принято оптимизацию его параметров выполнять последовательно: на основании выбранных значений оптимальных параметров рабочего процесса определяются оптимальные размеры проточной части двигателя, на этой основе проектируются оптимальные варианты компрессора и турбины и т.д. Таким образом, выбор параметров рабочего процесса СУ непосредственно влияет на всю систему исходных данных для проектирования, как основных элементов двигателя, так и ЛА.

Задаче выбора параметров авиационных ГТД, присуща неопределённость, которую обуславливают многокритериальность оценки эффективности летательного аппарата (ЛА) и много-режимность его эксплуатации; недостаточная определённость значений многих исходных проектных данных, при которой для части из них нельзя однозначно указать

не только точных численных значений, но и законов распределения; предпосылки, допущения, погрешности и ограничения методик расчёта и технических требований; существование неучтённых факторов.

Таким образом, при оптимизации параметров авиационного ГТД имеют место два основных вида неопределённостей исходной проектной информации – неопределённость цели (многокритериальность оценки ЛА) и неопределённость исходных проектных данных ГТД и ЛА. Поэтому задача оптимизации параметров ГТД приобретает бивекторный характер, так как в силу неопределённости исходных данных каждый из критериев, входящих в комплексную оценку эффективности ЛА, в свою очередь, является вектором.

Таким образом, отыскание таких значений параметров рабочего процесса ГТД, которые сохраняли бы свою оптимальность при изменении КПД или массы его узлов, а также и параметров ЛА относительно запроектированных значений, является необходимым условием обеспечения стабильности проектных характеристик ЛА в целом. Для отыскания таких значений параметров в практике проектирования применяются различные методы (поиск компромиссных решений, минимизация риска проектного решения).

Решение большинства задач векторной оптимизации рационально начинать с определения области компромиссов, т.е. того подмножества возможных решений, в

котором каждое из них находится в пределах допустимых отклонений локальных критериев от своих оптимальных значений. Путём определения области компромиссов осуществляется сужение области поиска оптимальных решений, что способствует более объективному выбору окончательного решения.

При оптимизации параметров авиационного ГТД с учётом бивекторного характера задачи область компромиссов можно определить как результат пересечения подмножества параметров, оптимальных по разным критериям при различных вариантах возможных сочетаний исходных проектных данных. Хотя поиск области компромиссов в этом случае представляет собой весьма сложную задачу, несомненным достоинством такого подхода к учёту неопределённостей является то, что лицо, принимающее решение, имеет свободу выбора и может оценить последствия принимаемого решения. Выбирая параметры ГТД в пределах найденной области компромисса, можно учитывать при этом конструктивные, эксплуатационно-технологические и другие неформализуемые факторы.

Если бы недетерминированные исходные данные имели вероятностное описание, то задачу можно было бы решать методами стохастической оптимизации. Однако при проектировании ГТД для большинства исходных проектных данных неопределённой величины какой-либо закон распределения обычно отсутствует, но можно оценить (с помощью, например, метода экспертных оценок и созданной на его основе базы знаний) вероятные пределы изменения этой величины. В этом случае можно определить только границы некоторой гарантируемой области компромиссов, т.е. соответствующие наиболее неблагоприятным (с точки зрения влияния на размеры области компромиссов) сочетаниям предельно возможных значений исходных данных.

Для оценки оптимального решения необходимо исследовать устойчивость результата, получаемого при различных вариантах сочетания возможных значений исходных данных неоднозначной величины.

Математически множество значений параметров рабочего процесса ГТД, принадлежащих области локально-оптимальных решений, определяется следующим выражением:

$$X_{ik} = \left\{ X \mid Y_i(X_{opt i}, b_k, p) \leq Y_i(X, b_k, p) \leq \left(1 + \frac{\Delta y}{\rho_i \rho_k}\right) Y_i(X_{opt i}, b_k, p) \right\},$$

где  $X = \{m, \pi_k^*, \pi_b^*, T_r^*\}$  – вектор оптимизируемых параметров ГТД;  $b_k$  – вектор исходных данных неоднозначной величины;  $p$  – вектор детерминированных исходных данных;  $\rho_i, \rho_k$  – коэффициенты, позволяющие учесть степень важности при выборе параметров, соответственно, критерия оценки  $Y_i$  и варианта сочетания исходных данных ( $b_k, p$ ),

$$X_{opt} = \left\{ \arg \min Y_i \mid Y_i = F_i(x, b_k, p) \right\},$$

где  $Y_i = \{M_0, C_{т-км}, a, \dots\}$  – множество критериев оценки.

Решения, удовлетворяющие комплексу критериев с учётом неопределённости исходных данных (области компромиссов), отыскиваются как результат пересечения локально-оптимальных областей:

$$X_{\cap} = \bigcap_{i=1}^r \bigcap_{k=1}^q X_{ik},$$

где  $r$  – количество рассматриваемых критериев оценки  $Y_i$ ;  $q$  – количество рассматриваемых вариантов сочетания исходных данных неоднозначной величины.

Для того, чтобы определить границы гарантируемой области компромиссов, в пределах которой можно выбирать наиболее устойчивые значения параметров рабочего процесса ГТД, необходимо располагать методами, позволяющими априори оценить наиболее неблагоприятные сочетания прогнозируемых значений исходных проектных данных неоднозначной величины  $b_k$ . Для этого требуется знать как величину, так и направление влияния возможных погрешностей прогноза каждого из проектных данных неопределённой величины на оптимальные значения параметров ГТД. При автоматизированном проектировании такую априорную оценку можно осуществить на основе создания

соответствующей базы знаний. Без создания такой базы знаний найти искомое сочетание неоднозначных исходных данных путём, например, полного факторного эксперимента типа  $2^n$  для авиационного ГТД практически невозможно, так как в этом случае число необходимых вариантов расчёта оптимумов исключительно велико ( $N \geq 2^{15} \dots 2^{30}$ ).

В указанных целях наиболее целесообразно использовать заранее вычисленные для расчётных условий полёта и рассматриваемых критериев эффективности ЛА специальные коэффициенты чувствительности  $\delta X_{\text{opt}}/\delta b_k$ . Такие коэффициенты позволяют отобрать два альтернативных варианта значений исходных данных  $b_k$ , которые приводят к смещению величины  $X_{\text{opt}}$  в сторону наибольших и наименьших значений. С этими наборами исходных данных производится расчёт соответствующих подмножеств оптимальных параметров для  $Y_i$ , что позволяет найти гарантируемую в условиях неопределённости область компромиссов.

Путём оптимизационных расчётов с помощью разработанной автоматизированной системы «АСТРА» [1] были определены коэффициенты чувствительности оптимальных значений  $\pi_k^*$ ,  $m$ ,  $\pi_B^*$  к изменению основных исходных проектных данных. Результаты расчётов приведены в табл. 1. Там же приведены соответствующие коэффициенты чувствительности оптимальных величин целевых функций. Указанные коэффициенты чувствительности определялись следующим образом:

$$K_{b_k}^x = \frac{\delta x_{\text{opt } b_k}}{\delta b_k}; K_{b_k}^y = \frac{\delta Y_{\text{opt } b_k}}{\delta b_k},$$

где 
$$\delta x_{\text{opt } b_k} = \frac{x_{\text{opt } b_k} - x_{\text{opt } b_{\text{баз}}}}{x_{\text{opt } b_{\text{баз}}}};$$

$$\delta Y_{\text{opt } b_k} = \frac{Y_{\text{opt } b_k} - Y_{\text{opt } b_{\text{баз}}}}{Y_{\text{opt } b_{\text{баз}}}};$$

$$\delta b_k = \frac{b_k - b_{\text{баз}}}{b_{\text{баз}}} \quad - \quad \text{относительное}$$

изменение рассматриваемого  $k$ -того фактора.

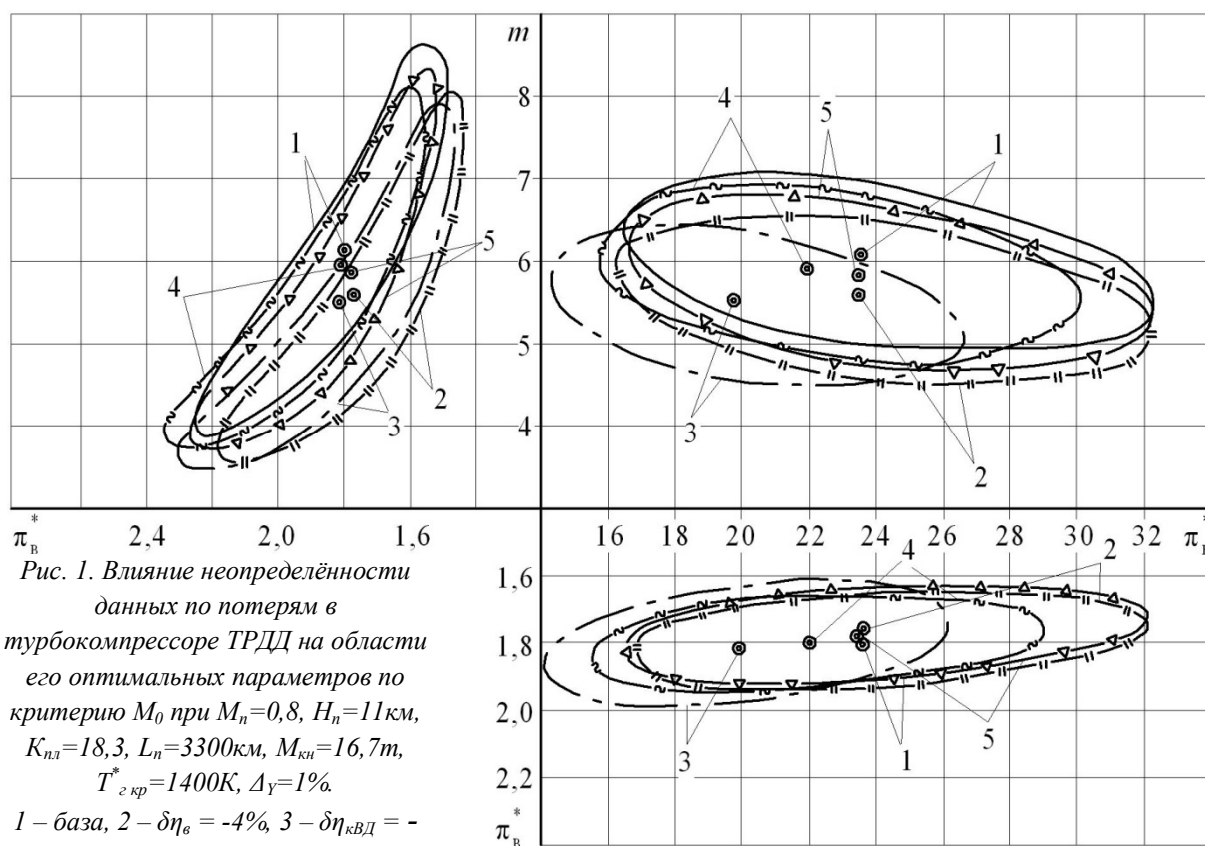
Полученные значения коэффициентов чувствительности позволили ранжировать исходные проектные данные для СУ и ЛА по степени их влияния на результаты оптимизации ТРДД в системе ЛА по рассматриваемым технико-экономическим критериям, выделить главные (они отмечены в табл. 1 звёздочкой \*) и второстепенные влияющие факторы.

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты исследования деформации пространственных областей оптимальных параметров ТРДД по критерию взлётной массы ЛА  $M_0$  под влиянием погрешностей прогнозных оценок величин некоторых исходных данных, характеризующих совершенство двигателя при заданной температуре газа перед турбиной. Проведённый анализ и по другим критериям показывал, что ухудшение термогазодинамического совершенства двигателя (например, уменьшение КПД компрессора высокого давления (ВД), увеличение потерь полного давления и т.п.) приводит как к уменьшению оптимальных значений  $\pi_k^*$  и  $m$  и увеличению  $\pi_{\text{в опт}}^*$ , так и к сужению области оптимальных параметров ТРДД. Области оптимальных параметров сужаются и при увеличении отборов воздуха на охлаждение и самолётные нужды.

Таблица 1 – Коэффициенты чувствительности оптимальных параметров рабочего процесса ТРДД и величин  $M_{0 \text{ min}}$ ,  $C_{\text{Т-км min}}$  и  $a_{\text{пр min}}$  к изменению некоторых исходных проектных данных по СУ и ЛА. ( $M_{\text{п}}=0,8$ ,  $H_{\text{п}}=11\text{км}$ ,  $T_{\text{г кр}}^*=1400\text{К}$ ,  $L_{\text{п}}=3500\text{км}$ )

Влияющие факторы $b_k$	Критерий оптимизации $M_0$				Критерий оптимизации $C_{\text{Т-км}}$				Критерий оптимизации $a_{\text{пр}}$			
	Отклики											
	$\delta \pi_{\text{к опт}}$	$\delta m_{\text{опт}}$	$\delta \pi_{\text{в опт}}$	$\delta M_{0 \text{ min}}$	$\delta \pi_{\text{к опт}}$	$\delta m_{\text{опт}}$	$\delta \pi_{\text{в опт}}$	$\delta C_{\text{Т-км min}}$	$\delta \pi_{\text{к опт}}$	$\delta m_{\text{опт}}$	$\delta \pi_{\text{в опт}}$	$\delta a_{\text{пр min}}$
$\delta \sigma_{\text{вх}}^*$	0,512	8,920	4,68	-1,56	0,85	5,75	2,77	-3,25	-0,377	6,743	-3,721	-2,022
$\delta \sigma_{\text{к}}^*$	0,746	0,106	0,153	-0,315	0,182	0,604	-0,044	-0,652	-0,684	-0,002	0,309	-0,414
$\delta \sigma_{\text{п}}$	0,158	7,7	-4,22	-0,82	0,230	5,95	-4,6	-1,98	-0,056	6,042	-3,446	-0,886

$\delta\eta_{в пол}^*$	0,014	1,84	-0,084	-0,47	0,165	0,696	0,404	-1,080	0,032	1,513	0,144	-0,534
$\delta\eta_{квД пол}^*$	0,315	0,272	0,349	-0,166	0,626	-0,49	0,36	-0,34	0,343	-0,326	0,42	-0,231
$\delta\eta_{квД пол}^*$	3,58	2,1	-0,604	-0,758	4,41	1,19	-0,220	-1,95	2,602	2,072	-0,716	-0,781
$\delta\eta_{твД пол}^*$	1,35	0,474	0,082	-0,411	1,99	-0,215	0,191	-1,05	0,929	0,733	-0,211	-0,428
$\delta\eta_{твД пол}^*$	-0,001	-1,41	-0,212	-0,598	0,175	0,41	0,655	-0,487	0,319	0,821	0,708	-0,72
$\delta\eta_{т}^*$	-0,093	0,045	-0,028	-0,642	0,065	0,253	-1,810	-1,59	-0,87	-0,178	-0,048	-0,694
$\delta\varphi_{сг}^*$	0,074	-0,166	-0,26	-0,485	0,98	-0,353	-0,258	-0,95	-0,163	-0,41	-0,354	-0,7
$\delta\varphi_{сп}^*$	0,334	7,26	-2,53	-1,99	1,05	2,99	-0,65	-4,32	0,9	8,76	-3,431	-2,329
$\delta v_{рквД}^*$	3,84	-1,92	0,338	-0,138	4,77	-0,244	0,165	-0,498	3,575	0,35	0,223	-0,084
$\delta v_{твД}^*$	2,94	0,016	1,21	-0,791	4,98	1,26	0,265	-1,96	3,347	0,53	1,173	-0,883
$\delta v_{отб сам}^*$	4,17	2,03	-0,175	-1,36	5,32	-0,42	0,739	-3,09	3,123	0,564	0,569	-1,692
$\delta\eta_{твД}^*$	3,12	0,324	0,118	-0,755	4,49	-0,568	0,342	-2,01	2,513	0,443	-0,003	-0,756
$\delta C_{хмг}^*$	-0,02	-0,54	0,262	0,073	-0,062	-0,259	0,106	0,166	-0,021	-0,431	0,216	0,083
$\delta K_{пл}^*$	0,426	0,153	-0,057	-1,15	0,337	0,096	-0,046	-2,32	-0,124	0,054	-0,008	-1,585
$\delta K_{св}, \delta K_{сг}$	-0,5	0,162	0,074	0,256	-0,317	0,002	0,023	0,228	-0,13	0	-0,012	0,242
$\delta \bar{C}_{пл}^*$	0,042	-0,02	0,005	1	-0,215	-0,022	0,023	2,01	0,165	-0,009	0,007	1,032
$\delta S_{ГСМ}^{вн}^*$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,095	0,028	-0,012	0,134
$\delta S_{Гдв}^*$	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,138	-0,075	0,03	0,23
$\delta T_{АМ дв}^*$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,134	0,01	0,006	-0,15
$\delta T_{АМ пл}^*$	-	-	-	-	-	-	-	-	0,017	0,009	-0,005	-0,106



Проведённые расчётные исследования показали, что при оптимизации параметров ТРДД по комплексу критериев области компромиссных решений существуют уже при отступлении от экстремума на величину  $\Delta\gamma$ , не превышающую обычных

критериальных допусков ( $\Delta_Y \leq 2\%$ ), если погрешность прогнозных оценок важнейших показателей термогазодинамического совершенства двигателя ( $\eta_{\text{лм пол}}, \varphi_{\text{СП}}, \sigma_{\text{П}}, v_{\text{охл}}$ ) не превышает 0,5–1%. В то же время допустимая величина погрешности прогнозных оценок таких показателей совершенства СУ и ЛА как  $K_{\text{ПЛ}}, \bar{M}_{\text{ПЛ}}, C_{x \text{ МГ}}, K_{\text{СУ}}$  может быть почти на порядок выше.

Результаты указанных исследований в обобщённом виде позволили сформировать базу знаний, предназначенную для интеллектуальной поддержки проектировщика при решении задач оптимизации параметров рабочего процесса ГТД в САПР.

Если в случае наиболее неблагоприятного сочетания исходных данных область компромиссов не образуется, то для сближения непересекающихся подмножеств можно ввести характеристики приоритета, используя весовые коэффициенты для главных влияющих факторов.

Одна из возможных ситуаций при определении области компромиссов – "выпадение" оптимальной области по одному из критериев из области пересечений. В этом случае данный критерий можно перевести в ограничения, т.е. оговорить его допустимый уровень. Теоретически возможен предельный случай – полное отсутствие пересечений оптимальных областей для всех рассматриваемых критериев. При этом можно использовать принцип оптимальности, заключающийся в выделении главного критерия. В этом случае проводят скалярную максимизацию главного критерия эффективности при условии, что уровень остальных критериев эффективности должен быть не меньше допустимого (например, главный критерий  $M_{\text{кн}}$ , ограничение – по величинам  $M_{\text{СУ+Т}}$  и  $C_{\text{ТКМ}}$ ). Следует заметить, что при оптимизации параметров авиационных ГТД этот случай обычно встречается крайне редко.

Если же получаемая при этом область компромиссов оказывается слишком широкой, то для того, чтобы её сузить и найти наиболее устойчивые значения параметров ГТД, можно использовать какой-либо принцип оптимальности. В большинстве случаев для выбора параметров

ГТД оказывается рациональным минимаксный принцип оптимальности, позволяющий быстро сузить область поиска и гарантирующий надёжность выбираемого оптимального решения  $X^0$ :

$$\min_X \max_Y \left[ \frac{\delta_{Y_i}}{\rho_i} \right] = f(X, Y_i, \rho_i, b_k, p) \rightarrow X^0.$$

В этом случае отыскивается минимум тех величин критериальных отклонений  $\delta Y = \frac{Y_{i \text{ к}} - Y_{\text{к min}}}{Y_{\text{к min}}}$ , которые максимальны при

всех рассматриваемых вариантах критериев оценки ЛА  $Y_i$  и исходных данных однозначной ( $p$ ) и неоднозначной ( $b_k$ ) величин с учётом "веса" каждого критерия  $\rho_i$ .

Отыскание области пересечения подмножеств оптимальных значений параметров ГТД по разным критериям оценки в условиях неопределённости исходных данных является наиболее сложным этапом расчётов. При этом в случае бивекторных задач трудность решения в значительной степени зависит от числа оптимизируемых параметров. Если число оптимизируемых параметров ГТД не превышает одного-двух, то решение имеет сравнительно простой вид, так как отыскиваемые в условиях неопределённости пересечения областей – плоские (рис. 1). При числе оптимизируемых параметров более двух, искомые области становятся пространственными или гиперпространственными. В этом случае методы определения области компромиссов существенно усложняются.

На заключительном этапе лицо, принимающее решение, осуществляет выбор параметров ГТД в пределах найденной области устойчивых оптимальных решений. Для этого определяется та её часть, которая свободна от проектных ограничений:

$$X_{\text{св.нв}} = \{x_{\text{нв}} \mid x_{\text{нв}} \in x_{\text{нв} \cap}, Z_{\text{огр}}(x) \leq C_z\}.$$

Здесь  $Z_{\text{огр}}$  – вектор рассматриваемых ограничений. На рис. 2 показан характерный вид таких ограничений по габаритным размерам  $D_{\text{МГ}}$ , шуму  $EPN$ , эмиссии  $EI$ , срокам создания  $\Delta T_{\text{созд}}$  и стоимости жизненного цикла  $S_{\text{ж.дв}}$ . Область  $X_{\text{св.нв}}$  на рис. 2 показана штриховкой.

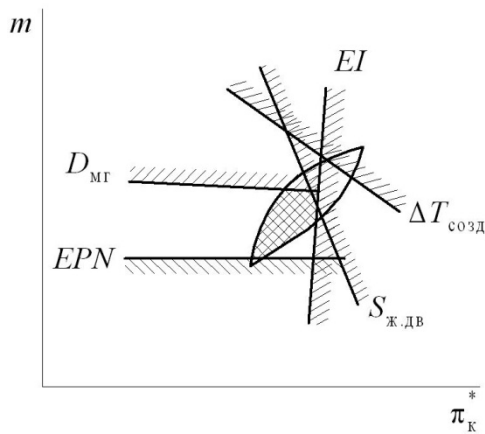


Рис. 2. Определение зоны области компромиссов, свободной от проектных ограничений

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании

постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

#### Библиографический список

1. Ткаченко, А.Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА-4) газотурбинных двигателей и энергетических установок [Текст] / А.Ю. Ткаченко, В.С. Кузьмичев, В.В. Кулагин, И.Н. Крупенич, В.Н. Рыбаков // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 28-30 июня 2011г. – Самара: СГАУ, 2009. – В 2 Ч. Ч2 - С. 80-82.

## INFLUENCE OF THE INITIAL DESIGN DATA UNCERTAINTY ON THE CHOICE OF OPTIMAL WORKING PROCESS PARAMETERS OF GAS TURBINE ENGINE

© 2012 V. S. Kuzmichev, A. Yu. Tkachenko, V. N. Rybakov, I. N. Krupenich, V. V. Kulagin

Samara State Aerospace University  
named after academician S.P. Korolov (National Research University)

Influence of the initial design data uncertainty on the choice of optimal working process parameters of gas turbine engine is described.

*Optimization, working process, gas turbine engine, the uncertainty of initial data, the choice of parameters.*

### Информация об авторах

**Кузьмичев Венедикт Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kuzm@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, начальный уровень проектирования ГТД, оценка научно-технического уровня ГТД, САПР ГТД.

**Ткаченко Андрей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tau@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, управление газотурбинными двигателями, методы расчета эксплуатационных характеристик, численные методы оптимизации.

**Рыбаков Виктор Николаевич**, аспирант кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: rybakov@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, оптимизация параметров рабочего процесса ГТД, начальный уровень проектирования ГТД, математическое моделирование.

**Крупенич Илья Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kru@ssau.ru. Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, проектирование турбокомпрессора ГТД, численные методы оптимизации.

**Кулагин Виктор Владимирович**, кандидат технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, начальный уровень проектирования ГТД, идентификация математических моделей ГТД. E-mail: kulvv@ssau.ru.

**Kuzmichev Venedikt Stepanovich**, Doctor of Science, Professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kuzm@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, initial level of gas turbine engine design, assessment of scientific and technological level of gas turbine engines, gas turbine engines computer-aided systems.

**Tkachenko Andrey Yurievich**, Candidate of Science, Associate professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: tau@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine controlling, design methods of field-performance data, numerical method of optimization.

**Rybakov Viktor Nikolaevich**, post-graduate student at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: rybakov@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, gas turbine engines parameters optimization, initial level of gas turbine engine design, mathematical simulation.

**Krupenich Iliya Nikolaevich**, Candidate of Science, Associate professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kru@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine's turbocompressor design, numbering method of optimization.

**Kulagin Viktor Vladimirovich**, Candidate of Science, Professor at Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: kulvv@ssau.ru. Area of research: gas turbine engines theory, initial level of gas turbine engine design, identification of mathematical model of gas turbine engines.