

## **О МЕТОДЕ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕННОЙ СРЕДЫ**

**Химич В.Л., Кузнецов Ю.П.**

*ФГБ ОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева», Нижний Новгород, Россия (603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24), e-mail: tseu@nntu.nnov.ru*

---

Предложена методика более простого и оперативного определения влияния изменений коэффициента полезного действия узлов двигателей на их характеристики. Обоснована актуальность использования метода малых отклонений для определения связи между параметрами газотурбинного двигателя. Раскрыта сущность метода применительно к решению задач взаимосвязи между параметрами рабочего процесса газотурбинного двигателя. Показано взаимодействие метода малых отклонений и детального газодинамического расчёта. Описаны особенности применения метода малых отклонений для оперативной оценки изменения параметров газотурбинных двигателей, работающих в условиях загрязненной среды. Проанализирован опыт использования метода малых отклонений и выполнена оценка его преимуществ и недостатков. Проиллюстрировано использование метода малых отклонений применительно к турбореактивному двигателю. Сделаны выводы относительно применения метода малых отклонений для анализа рабочего процесса газотурбинного двигателя.

---

Ключевые слова: газотурбинные двигатели, оценка параметров, загрязненная рабочая среда.

## **ABOUT THE METHOD OF RAPID ASSESSMENT OF CHANGES IN THE PARAMETERS OF THE GAS TURBINE ENGINE OPERATING IN A POLLUTED ENVIRONMENT**

**Khimich V.L., Kuznetsov Y.P.**

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, Minin street, 24), e-mail: tseu@nntu.nnov.ru*

---

We offered the technique of simpler and expeditious definition of influence of changes of efficiency of knots of engines on their characteristics. We proved the relevance of use of a method of small deviations for definition of communication between parameters of the gas-turbine engine. We discovered the essence of a method in relation to the solution of problems of interrelation between parameters of working process of the gas-turbine engine. We shown the interaction of a method of small deviations and detailed gasodynamic calculation. We described the features of application of a method of small deviations for an operational assessment of change of parameters of the gas-turbine engines working in the conditions of the polluted environment. We analysed the experience of use of a method of small deviations and made the assessment of its advantages and shortcomings. We illustrated using of a method of small deviations in relation to a turbojet. We made the conclusions concerning application of a method of small deviations for the analysis of working process of the gas-turbine engine.

---

Keywords: gas-turbine engines, parameter estimation, contaminated fluids

Важной задачей в процессе создания надежной силовой установки является обеспечение заданных параметров двигателя в целом на всех эксплуатационных и переходных режимах. Жесткие ограничения по нагрузке масс экранопланов не позволяют предусматривать большие запасы по мощности (тяге) по отношению к потребной для компенсации влияния различного рода факторов в процессе эксплуатации силовой установки. Поэтому на всех этапах доводки двигателей – от их стендовых испытаний до объектовых испытаний в составе силовой установки – приходится решать задачи, связанные с необходимостью определения влияния тех или иных условий на характеристики

двигателей, в том числе мощность (тягу), расход топлива, газодинамическую устойчивость и т.д. [5]

### **Цель исследования**

В процессе исследования возможности использования двигателей для условий эксплуатации, отличающихся от первоначально заданных, возникает практически важная задача – определение влияния изменений КПД узлов на характеристики двигателей. Эта задача в общем и численном виде, удобном для анализа и практического использования достаточно просто решается методом малых отклонений. Поэтому он нашел достаточно широкое применение в процессах оперативного анализа результатов испытаний газотурбинных силовых установок.

### **Материал и методы исследования**

Суть метода состоит в том, что при решении каждой задачи ведется расчет не нового двигателя с изменившимися параметрами, а ведется нахождение сравнительно небольших отклонений параметров рабочего процесса от их исходных значений на заданном режиме работы двигателя. Это позволяет использовать более простой способ решения, который сводится к определению связи непосредственно между изменениями параметров рабочего процесса ГТД.

Использование метода малых отклонений по существу означает линейризацию исходных уравнений процесса, что значительно упрощает анализ зависимостей между приращениями связанных между собой параметров. Особенно важно проводить анализ изменений параметров двигателей при работе их в условиях загрязненной среды (например, морские условия эксплуатации). [3]

Метод малых отклонений для решения рассматриваемых задач выбран не случайно. Но прежде всего необходимо отметить, что расчет этим методом не исключает обычных методов газодинамического расчета двигателей. Наоборот, исследованию методом малых отклонений всегда предшествует детальный газодинамический расчет и определяются все исходные параметры рабочего процесса. Оценивая преимущества и недостатки расчетов газодинамического метода и метода малых отклонений применительно к решению задач взаимосвязи между параметрами ГТД, можно сравнивать лишь трудоемкость этих методов и точность получаемых результатов, так как число неизвестных величин не меняется.

С точки зрения удобства практического использования метод малых отклонений обладает неоспоримым преимуществом, поскольку решение сложных нелинейных уравнений, связывающих значения параметров рабочего процесса ГТД, заменяется решением относительно простых линейных уравнений, связывающих величины отклонений параметров от их исходных значений. К примеру, рабочий процесс ГТД описывается

системой из 10 – 20 нелинейных уравнений, включающих до 10 – 15 и более исходных независимых параметров. Проведение анализа такой системы уравнений, вследствие обилия расчетных вариантов, чрезвычайно сложно. При исследовании какого-либо ГТД метод малых отклонений позволяет составить таблицу численных значений коэффициентов взаимного влияния, с помощью которой разнообразные задачи решаются с минимальной затратой времени и не требуют анализа уравнений в общем виде.

Использование метода малых отклонений позволяет выявить такие закономерности рабочего процесса двигателей, которые трудно уловить при расчете обычными методами. В подавляющем большинстве практических задач о взаимосвязи параметров двигателя можно уверенно пользоваться методом малых отклонений, не прибегая к оценке погрешности результатов, поскольку при изменении величин  $\pi_k, \pi_T, \pi_c$  и др. до 10 – 15% конечная ошибка результата не превышает 1%.

В процессе испытаний и доводки силовой установки необходимо оценивать, как скажется то или иное изменение корабельных конструкций (ВПУ, ГВУ) и внешних условий на параметры рабочего процесса. [4]

Для решения указанных задач была разработана методика исследования характера изменения основных параметров двигателя в целом от изменения параметров его отдельных элементов с учетом взаимного влияния параметров рабочего процесса друг на друга

Суть методики состоит в следующем. Составляется система уравнений рабочего процесса исследуемого двигателя в малых отклонениях, которая отражает зависимость параметров друг от друга. При решении системы уравнений для последующего оперативного анализа изменений параметров составляются таблицы *коэффициентов взаимного влияния*. Коэффициентами взаимного влияния будем называть коэффициенты при относительных изменениях параметров, приведенных в соответствующих уравнениях. Каждый из этих коэффициентов взаимного влияния указывает величину и знак изменения соответствующего параметра от изменения независимой переменной.

Покажем использование метода малых отклонений применительно к турбореактивному двигателю, схема которого приведена на рис.1.

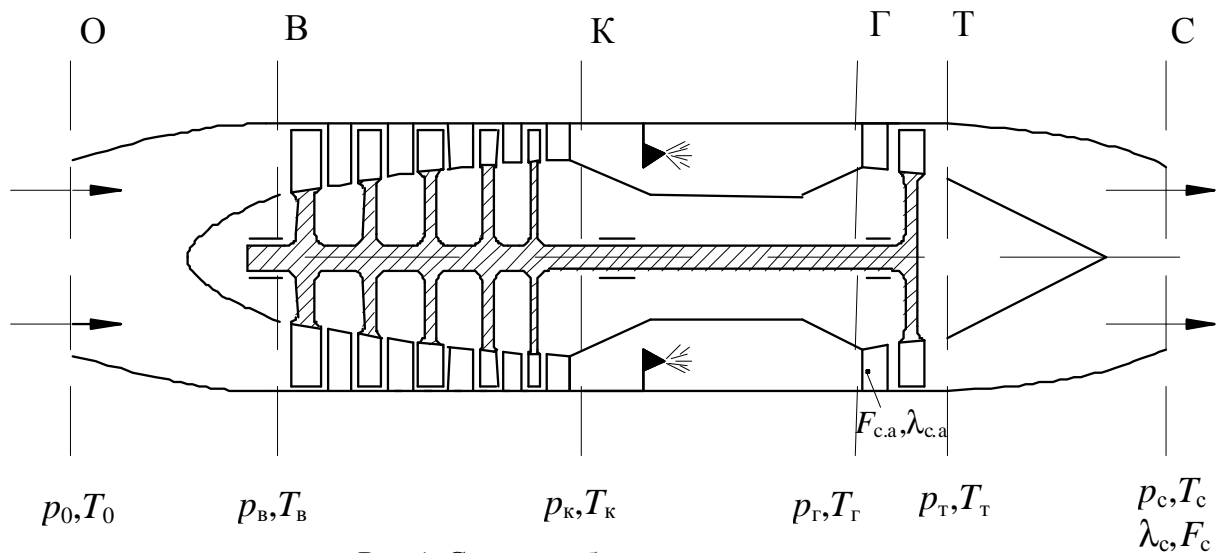


Рис. 1. Схема турбореактивного двигателя

Система уравнений, характеризующая взаимно обусловленные изменения параметров рабочего процесса ТРД имеет вид:

1.  $K_3 \delta \pi_T = (K_1 - K_{11}) \delta \pi_K - \delta T_\Gamma - \delta \eta_K - \delta \eta_T;$
2.  $\delta \pi_C = \delta \pi_K - \delta \pi_T + \delta \sigma_B + \delta \sigma_\Gamma + \delta \sigma_C;$
3.  $\left(1 - \frac{1}{2} K_3 K_4\right) \delta \pi_T = \delta \sigma_C + \delta F_C - \delta F_{c.a} + K_6 \delta \pi_C + \frac{1}{2} K_4 \delta \eta_T;$
4.  $\delta G_B = K_{10} \delta \pi_K + \delta \sigma_B;$
5.  $(1 - K_{10}) \delta \pi_K = \frac{1}{2} \delta T_\Gamma - \delta \sigma_\Gamma - \delta F_{c.a};$
6.  $\delta T_K = (K_1 - K_{11}) K_2 \delta \pi_K - K_2 \delta \eta_K;$
7.  $\delta T_T = \delta T_\Gamma - K_4 \delta \eta_\Gamma - K_3 K_4 \delta \pi_T;$
8.  $\delta R = K_9 \delta F_C + K_7 K_8 K_9 \delta \pi_C - (K_9 - 1) \delta G_B.$

Для условий работы двигателя в загрязненной среде, преобразованная система уравнений приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned}
 1. K_3 \delta \pi_T &= K_1 \delta \pi_K - \delta T_\Gamma - \delta \eta_K - \delta \eta_T; \\
 2. \delta \pi_c &= \delta \pi_K - \delta \pi_T; \\
 3. (1 - 0,5 K_3 K_4) \delta \pi_T &= K_6 \delta \pi_c + 0,5 K_4 \delta \eta_T; \\
 4. \delta G_B &= \delta \pi_K - 0,5 \delta T_\Gamma; \\
 5. \delta T_K &= K_1 K_2 \delta \pi_K - K_2 \delta \eta_K; \\
 6. \delta T_T &= \delta T_\Gamma - K_3 K_4 \delta \pi_T - K_4 \delta \eta_T; \\
 7. \delta R &= K_7 K_8 K_9 \delta \pi_c - (K_5 - 1) \delta T_K; \\
 8. \delta G_T &= \delta G_B + K_5 \delta T_\Gamma - (K_5 - 1) \delta T_K; \\
 9. \delta C_R &= \delta G_T - \delta R.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь  $C_R$  – удельный расход топлива (по тяге двигателя). [2]

Система (1), состоящая из девяти уравнений, содержит двенадцать неизвестных. В качестве исходных данных для ее решения лучше всего подходят  $\delta \pi_K$ ;  $\delta T_K$  и  $\delta G_T$ . Решаем систему уравнений (1) в следующем порядке.

Из уравнения *пять* системы находим  $\delta \eta_K = K_1 \delta \pi_K - \frac{1}{K_2} \delta T_K$ .

Решая совместно уравнения *четыре* и *восемь*, определяем

$$\delta T_\Gamma = -\frac{1}{K_5 - 0,5} \delta \pi_K + \frac{K_5 - 1}{K_5 - 0,5} \delta T_K + \frac{1}{K_5 - 0,5} \delta G_T$$

и

$$\delta G_B = \frac{K_5}{K_5 - 0,5} \delta \pi_K - \frac{K_5 - 1}{2(K_5 - 0,5)} \delta T_K - \frac{1}{2(K_5 - 0,5)} \delta G_T.$$

Подставим из уравнения *два*  $\delta \pi_c$  в уравнение *три* системы (1) и запишем это уравнение в виде

$$\frac{2}{K_4} (1 + K_6) \delta \pi_T - \frac{2K_6}{K_4} \delta \pi_K = K_3 \delta \pi_T + \delta \eta_T.$$

Представим уравнение *один* в виде:

$$\frac{1}{K_2} \delta T_K = \delta T_\Gamma + K_3 \delta \pi_T + \delta \eta_T.$$

Вычитая из уравнения *три* уравнения *один*, определяем

$$\delta\pi_{\text{т}} = \frac{1}{1+K_6} \left[ K_6 + \frac{K_4}{2(K_5-0,5)} \right] \delta\pi_{\text{к}} + \frac{K_4}{2(1+K_6)} \left[ \frac{1}{K_2} - \frac{K_5-1}{K_5-0,5} \right] \delta T_{\text{к}} - \frac{K_4}{2(1+K_6)(K_5-0,5)} \delta G_{\text{т}}.$$

Из уравнения *три* системы (1) получим выражение, характеризующее изменение КПД турбины:

$$\delta\eta_{\text{т}} = \frac{1}{1+K_6} \left[ \frac{1-0,5K_3K_4+K_6}{K_5-0,5} - K_3K_6 \right] \delta\pi_{\text{к}} + \frac{1-0,5K_3K_4+K_6}{1+K_6} \left( \frac{1}{K_2} - \frac{K_5-1}{K_5-0,5} \right) \delta T_{\text{к}} - \frac{1-0,5K_3K_4+K_6}{(1+K_6)(K_5-0,5)} \delta G_{\text{т}}.$$

Из уравнения *два* системы (1)

$$\delta\pi_{\text{с}} = \frac{K_5-0,5K_4-0,5}{(1+K_6)(K_5-0,5)} \delta\pi_{\text{к}} - \frac{K_4}{2(1+K_6)} \left[ \frac{1}{K_2} - \frac{K_5-1}{K_5-0,5} \right] \delta T_{\text{к}} + \frac{K_4}{2(1+K_6)(K_5-0,5)} \delta G_{\text{т}}.$$

Умножая уравнение *один* на коэффициент влияния  $K_4$  и складывая его с уравнением *шесть*, получим

$$\delta T_{\text{т}} = -\frac{K_4+1}{K_5-0,5} \delta\pi_{\text{к}} + \left[ \frac{(K_4+1)(K_5-1)}{K_5-0,5} - \frac{K_4}{K_2} \right] \delta T_{\text{к}} + \frac{K_4+1}{K_5-0,5} \delta G_{\text{т}}.$$

Из уравнений *семь* и *девять* находим  $\delta R$  и  $\delta C_R$ .

На основании выведенных уравнений для ТРД с параметрами

$$\pi_{\text{к}} = 8,41; T_{\text{к}} = 579\text{К}; L_{\text{к}} = 412 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; p_{\text{т}} = 1,91 \cdot 10^5 \text{ Па}; \sigma = 0,93,$$

было получено удобное для анализа выражение об изменении КПД компрессора и турбины в малых отклонениях от изменений  $\pi_{\text{к}}$  (степень повышения полного давления воздуха в компрессоре) и температуры газов за компрессором  $T_{\text{к}}$  и расходе топлива  $G_{\text{т}}$ . [1]

$$\delta\eta_{\text{к}} = 0,63\delta\pi_{\text{к}} - 1,99\delta T_{\text{к}}$$

$$\delta\eta_{\text{т}} = 0,38\delta\pi_{\text{к}} + 1,1\delta T_{\text{к}} - 0,43\delta G_{\text{т}}.$$

## **Результаты исследования и их обсуждение**

Опыт применения метода малых отклонений для анализа рабочего процесса газотурбинных двигателей рассмотренных схем, работающих в условиях морской среды, показал его эффективность и достаточную для анализа точность. Кроме существенного снижения трудоемкости расчетов метод позволяет рационально спланировать методику проведения измерений контролируемых параметров двигателей во время их испытаний и оперативно оценивать изменения параметров двигателей в процессе этих испытаний.

## **Заключение**

Применяя метод малых отклонений можно получить характеристические уравнения изменения КПД компрессора и турбины в малых отклонениях для любого типа газотурбинных двигателей.

## **Список литературы**

1. Кузнецов Ю.П. Создание неавтономных турбоприводов на базе синтеза высокоэффективных микротурбин различных кинематических схем : дис.... док. тех. наук. - СПб. 1995. – с.21-29.
2. Кузнецов Ю.П., Чуваков А.Б. Экспериментальная установка для исследования малоразмерных турбинных ступеней. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – с. 54
3. Химич В.Л., Барышников В.И., Чернигин Ю.П. Расчёт характеристик газотурбинных двигателей в условиях загрязненного воздуха методом малых отклонений. // Учебное пособие для студентов высших учебных заведений – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та, 2008. – 71с.
4. Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок высокоскоростных судов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева – 2006. – с. 22-34
5. Химич В.Л., Чернигин Ю.П. Проектирование силовых установок экранопланов // Учебник для курсантов Военно-морского инженерного института и студентов высших учебных заведений – СПб.: Судостроение, 2011. – 428с.

## **Рецензенты:**

Зуев В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Кораблестроение и авиационная техника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород;

Ваганов А.Б., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Аэро- гидродинамика, прочность машин и сопротивление материалов» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.