

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Марчуков Е.Ю.^{1*}, Вовк М.Ю.^{2**}, Кулалаев В.В.^{2***}

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

² *Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки -
филиал ОДК-Уфимского моторостроительного производственного объединения (УМПО),
ул. Касаткина, 13, Москва, 129301, Россия*

* *e-mail: kaf205@mail.ru*

** *e-mail: mvovk@yandex.ru*

*** *e-mail: kulalayev.viktor@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 16.10.2019

Рассмотрена энергетическая система (ЭС) в общем виде, как механическая машина преобразования входной энергии в полезную работу. Представлены методологические основы прогноза основных показателей технического облика ЭС методами математической статистики. Показано, что для любых ЭС возможна разработка универсального специального статистического критерия, который объединяет в себе все эксплуатационные параметры в виде многопараметрической неразрывной функции и может быть назван критерием технического прогноза. Приведен алгоритм составления и расчёта специального критерия в общем виде. Для демонстрации правомерности введения специального критерия дается пример расчёта прогноза технического облика ЭС в общем виде.

Ключевые слова: технический облик, специальный статистический критерий, статистический прогноз, математическая модель, многопараметрическая функция, экстремальная задача оптимизации.

Развитие авиационно-космической промышленности невозможно без внедрения современных образцов высокоэффективных энергетических систем (ЭС) нового поколения. Известно, что разработка и создание новой техники, в том числе ЭС в авиационной и космической отрасли, приводит к необходимости принятия компромиссных оптимальных или рациональных конструкторских и технологических решений [15]. При этом обязательно решение задач обеспечения заданного уровня безопасности, надежности, экономичности и эффективности, а также минимальных материальных затрат при создании и освоении ЭС [13,14]. Кроме того, перед разработчиком всегда стоит требование соответствия прогноза технического облика разрабатываемой ЭС реальному образцу. Технический облик — совокупность параметрических, конструктивных и технологических решений, отражающих наиболее существенные особенности образца системы [1—6]. Решению указанных задач и выполнению отмеченных требований должен помочь инженерный подход на базе статистическо-

го аналогового метода принятия решений при создании перспективной техники [10, 15]. Суть указанного метода в том, что при создании перспективной техники проводится глубокий анализ и синтез полей статистических конструктивных и энергетических данных выбранных аналогов и прототипов ЭС согласно параметрам технических требований (ТТ) к разработке по рекомендациям работ [15—17]. Например, для ЭС общего вида это: выходная мощность — $N_{ЭС}$ в Вт (как показатель термодинамического совершенства ЭС), которая определена математической моделью (ММ); масса — $M_{ЭС}$ в кг и габаритные размеры — $V_{ЭС} = S_{пр\ ЭС} L_{пр\ ЭС}$ в м³ (как показатели конструктивного, материаловедческого и технологического совершенства) входящих в поле статистических данных. Структурная схема основных выходных параметров ЭС общего вида представлена на рис. 1.

При разработке перспективной ЭС выдвигается общепринятое требование получения максимальной выходной энергии при минимальных или рациональных значениях массы и габаритных раз-

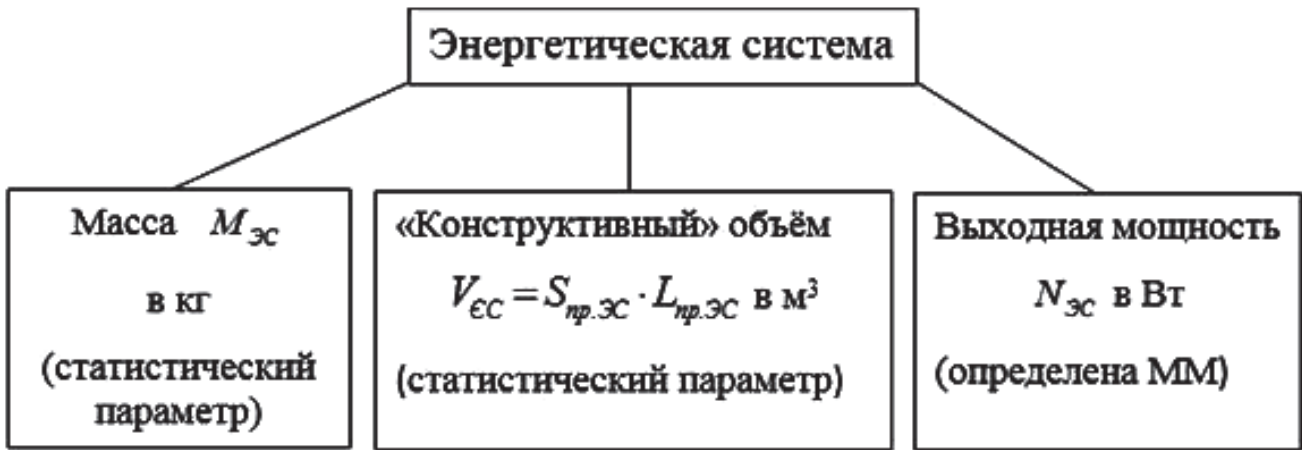


Рис. 1. Структурная схема основных выходных параметров ЭС общего вида ($S_{пр.ЭС}$, $L_{пр.ЭС}$ — приведенные площадь миделя и длина системы)

мерах. Начальный этап прогноза технического облика ЭС нового поколения связан с большой трудоёмкостью оценок выходных параметров по принятым расчётным ММ, которые должны обладать высоким уровнем адекватности к параметрам реального изделия. Это приводит к увеличению стоимости разработки, общих сроков создания и внедрения новой техники [14, 15]. По мнению авторов работы, решение поставленной научной проблемы лежит в плоскости постановки и решения экстремальной задачи оптимизации соотношения между основными указанными выше выходными параметрами создаваемой ЭС нового поколения. Решение проблемы основывается на использовании методов прикладной математической статистики и оптимизации ожидаемых выходных параметров ЭС с повышенными энергетическими и оптимальными массово-габаритными характеристиками.

Поставленная научная проблема приводит к формулировке цели исследований данной работы: разработка методологии определения прогноза облика новой ЭС на основании введения специального статистического критерия в виде многопараметрической функции с конечным числовым значением.

1. Методология достижения цели и задачи исследования

Проведем морфологический анализ схемы, приведенной на рис. 1. Для этого в конструкции разрабатываемой ЭС выделим группу основных конструктивных признаков, например элемент преобразования энергии, другие узлы с массовыми и объёмными (габаритными) характеристиками конструктивных элементов и узлов [1]. Любая

ЭС общего вида, как механическая машина, содержит корпус заданного «конструктивного» объёма, в котором устанавливаются все элементы и конструктивные узлы, включая систему автоматического управления. При этом в любой ЭС можно выделить конструктивный элемент, принятый в качестве основного, с массой $M_{о.эл}$ и «конструктивным» объёмом $V_{о.эл}$. Тогда массово-объёмные характеристики ЭС будут определяться зависимостями:

— масса ЭС

$$M_{ЭС} = \frac{M_{о.эл}}{\Psi_M} \cdot (1 + \tilde{\mu}_{M\Sigma_{ст}}(p)); \quad (1)$$

— «конструктивный» объём ЭС в составе общего изделия, например летательного аппарата:

$$V_{ЭС} = \frac{V_{о.эл}}{\Psi_V} \cdot (1 + \tilde{\mu}_{V\Sigma_{ст}}(p)), \quad (2)$$

где $\tilde{\mu}_{M\Sigma_{ст}}(p) = \sum_{i=1}^n \mu_{M_i}(p)$ и $\tilde{\mu}_{V\Sigma_{ст}}(p) = \sum_{i=1}^n \mu_{V_i}(p)$ —

функции в виде зависимостей аппроксимации статистических данных, составленных по массовым и объёмным характеристикам узлов аналоговых ЭС в зависимости от выбранного общего параметра, определяющего рабочие процессы ЭС (p);

$$\mu_{M_i}(p) = \frac{M_i}{M_{о.эл}} \quad \text{и} \quad \mu_{V_i}(p) = \frac{V_i}{V_{о.эл}} \quad \text{— приведенный}$$

массовый и объёмный коэффициенты i -го конструктивного элемента массой M_i и объёмом V_i в со-

ставе ЭС; $\psi_M \geq 1,0$ и $\psi_V \geq 1,0$ — статистические критерии принятия оптимальных конструкторских и технологических решений, которые получены на основании обработки полей статистических эксплуатационных данных ЭС, выбранных в качестве аналоговых и рассчитанных по методике работы [15].

Таким образом, ставится задача составления и системного исследования универсального статистического *специального критерия статистического прогноза* (далее критерий) оптимального облика ЭС нового поколения, отвечающего требованиям математического определения критерия как стационарной конечной числовой величины [6—11, 24].

Введём критерий прогноза первичного оптимального облика ЭС в виде соотношения

$$M_{удЭС} = \frac{M_{ЭС}}{\left(\frac{N_{ЭС}}{V_{ЭС}}\right)} \frac{\text{кг}}{\left(\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}\right)}. \quad (3)$$

Здесь $N_{ЭС} = f_N(\eta_{ЭС}, p, x_k)$ — принятая глобальная ММ расчёта выходных энергетических параметров ЭС, где $\eta_{ЭС}$ — КПД системы; $x_k, k = 1, 2, 3, \dots, n$, n — число независимых расчётных и экспериментальных параметров — аргументов глобальной ММ ЭС.

Физической сущностью введённого специального критерия (3) является определение того, сколько можно получить с единицы массы разрабатываемой ЭС нового поколения выходной мощности, приведенной к «конструктивному» объёму,

т.е. с «конструктивной» плотностью $\rho_{N_{ЭС}} = \frac{N_{ЭС}}{V_{ЭС}}$, кВт/м³.

Введённый критерий является стационарной многопараметрической неразрывной функцией независимых аргументов: статистических, расчётных и экспериментальных параметров глобальной ММ ЭС и при заданных аргументах принимает конечное числовое значение

$$M_{удЭС} = f(\eta_{ЭС}, M_{о.эл}, V_{о.эл}, p, x_k) = M, \quad (4)$$

что отвечает математическим требованиям понятия «критерий» [10—12, 24].

Таким образом, нахождение экстремума критерия в виде (3) неразрывной многопараметрической функции (4) сводится к решению экстремаль-

ной задачи оптимизации известными математическими методами [18—24]. При заданной ТТ минимальной или необходимой приведенной массе ЭС в виде специального критерия $[M_{удЭС}]_{о.мин\ зад}$ предоставляется возможность однозначного нахождения значений всех независимых параметров, определяющих критерий. В конечном итоге решение поставленной экстремальной задачи приводит к определению однозначного оптимального прогноза технического облика ЭС нового поколения на этапе эскизного проектирования при минимальных затратах времени и интеллектуального труда. При этом в единицу рабочего времени можно предложить больше вариантов первичного прогноза технического облика ЭС нового поколения для проведения последующего системного анализа.

2. Методология и алгоритм решения задачи нахождения минимума введенного критерия

Нахождение минимума введенного специального критерия — универсальной функциональной многопараметрической функции с независимыми аргументами в виде функциональной зависимости (4) — приводит к нахождению однозначных первичных параметров, определяющих оптимальный статистический прогноз технического облика вновь создаваемой ЭС на базе глубокого анализа и обработки полей статистических конструктивных данных ЭС, выбранных в качестве аналогов. Общая частная производная функции (4) приводит к виду

$$\frac{\partial M_{удЭС}}{\partial M_{о.эл} \partial V_{о.эл} \partial \eta_{ЭС} \partial p \partial x_1 \partial x_2 \dots \partial x_k} = \frac{\partial M_{удЭС}}{\partial M_{о.эл}} + \frac{\partial M_{удЭС}}{\partial V_{о.эл}} + \frac{\partial M_{удЭС}}{\partial p} + \frac{\partial M_{удЭС}}{\partial \eta_{ЭС}} + \sum_{v=1}^n \frac{\partial M_{к\ удЭС}}{\partial x_k} \Rightarrow 0. \quad (5)$$

Здесь под знаком суммирования частные производные находятся посредством дифференцирования функции (4) по каждому независимому аргументу: $M_{о.эл}, V_{о.эл}, \eta_{ЭС}, p$ и параметрам глобальной ММ x_k при $k = 1, 2, 3, \dots, n$ с выполнением условия, что все остальные независимые аргументы рассматриваются как постоянные, «замороженные» величины. Дифференцирование зависимости (4) производится по всем независимым искомым параметрам N . На основании (5) составляется система нелинейных алгебраических уравнений (6), решение которой находится известными градиентны-

ми методами [18—24]. Тогда решение поставленной экстремальной задачи можно свести к решению системы нелинейных алгебраических уравнений методом, например, «наискорейшего спуска»:

$$\left(N \text{ уравнений} \right) \begin{cases} \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial M_{\text{о.эс}}} = f(V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_k) \Rightarrow 0; \\ \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial V_{\text{о.эс}}} = f(M_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_k) \Rightarrow 0; \\ \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial \eta_{\text{ЭС}}} = f(M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, p, x_k) \Rightarrow 0; \\ \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial p} = f(M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_k) \Rightarrow 0; \\ \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial x_{k=1}} = f(M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_{k-1}) \Rightarrow 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial M_{\text{уд}\text{ЭС}}}{\partial x_{k=n}} = f(M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_{k-n}) \Rightarrow 0. \end{cases} \quad (6)$$

Геометрическая интерпретация метода «наискорейшего спуска» (разновидность градиентного метода) показана на рис. 2. Для наглядности приведена схема для функции двух аргументов x_1 и x_2 , т.е. $M_{\text{уд}}(x_1, x_2)$ при остальных «замороженных». В данном случае градиентный спуск показан по аргументу x_1 при $x_2 \Rightarrow$ «замороженном», так как пространственно представление задачи при размерности больше трех невозможно.

Идея метода «наискорейшего спуска» заключается в том, чтобы осуществлять решение экстремальной задачи в направлении оптимального вектора спуска \vec{L}_i . Направление вектора задаётся антиградиентом

$$-\nabla M_{\text{уд}}^j : x_i^{[k]} - \lambda^{[k]} \cdot \nabla M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k]}), \lambda < 0,$$

где $x_i^{[k+1]}$ уточняется на каждой итерации; ∇ — оператор дифференцирования.

Алгоритм решения экстремальной задачи:

шаг 1 — выбираем начальное приближение для каждого независимого параметра в виде:

$$x_1 = x_1^0; \dots; x_n = x_n^0,$$

где x_i^0 — начальные значения должны быть в поле реальных значений выбранного параметра рабочего цикла (p) ЭС;

шаг 2 — выполняем далее ряд приближений

$$k \in [1, 2, \dots, m], m \in \mathbb{N},$$

где

$$x_n^{[k+1]} = x_n^{[k]} - \lambda^{[k]} \cdot \nabla M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k]});$$

шаг 3 — направление «наискорейшего спуска» будет найдено при

$$\lambda_{\text{опт}}^{[k]} = \arg \min M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k]} - \lambda^{[k]} \cdot \nabla M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k]})),$$

$\lambda^{[k+1]} < 1$ выбирается произвольно при $k = 1$, но в дробном масштабе независимого параметра x_i ;

шаг 4 — условие останова алгоритма по аргументу x_i принимает вид

$$\frac{|M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k+1]}) - M_{\text{уд.зад}}^{j \min}|}{M_{\text{уд}}^j(x_i^{[k+1]})} \leq \varepsilon \quad (\varepsilon = 10^{-4} \div 10^{-5}). \quad (7)$$

Опыт проведенных расчетов по предлагаемому алгоритму показывает, что решение экстремальной задачи, в данном случае поиск минимума критерия

$$\begin{aligned} M_{\text{уд}\text{ЭС}} &= f(\eta_{\text{ЭС}}, M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, p, x_k) = \\ &= M_{\text{уд}}^j(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow M_{\text{уд.зад}}^{j \min}, \end{aligned}$$

заканчивается при небольшом числе итераций. На каждом шаге $\lambda^{[k]}$ выбирается так, чтобы следующая итерация была точкой минимума функции

$M_{\text{уд}}^{j \min*}(x_{1 \min}^*, \dots)$ на векторе \vec{L}_i (см. алгоритм *шаг 3* и рис. 2) [19].

В рассматриваемой постановке экстремальной задачи оптимизации величина удельной массы ЭС

$M_{\text{уд.зад}}^{j \min}$ и мощность $N_{\text{ЭС}}(\eta_{\text{ЭС}}, p, x_k)$ заданы ТТ на разработку и глобальной ММ ЭС нового поколения. Приведенный выше алгоритм позволяет однозначно найти все необходимые параметры рабочего цикла ЭС нового поколения в виде $x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*$, которые определяют оптимальное значение критерия в виде соотношения (4). Получен-

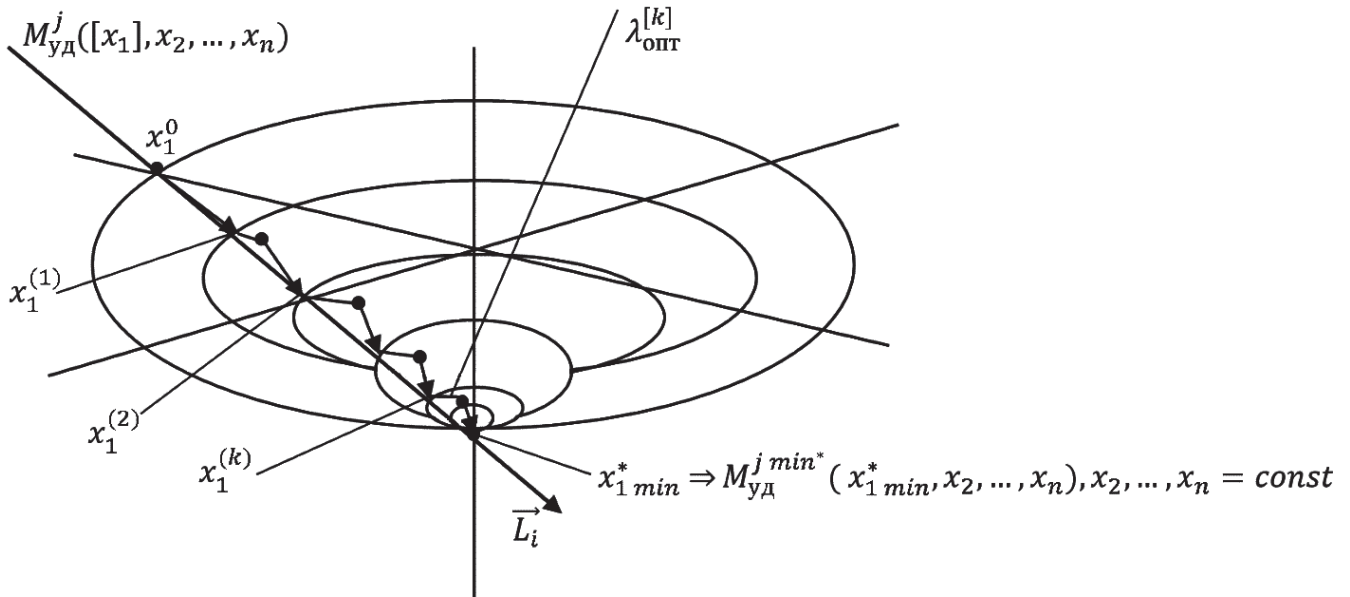


Рис. 2. Геометрическая интерпретация метода «наискорейшего спуска» на примере изменения по одному параметру в направлении спуска по $x_1 = \text{var}, x_2, \dots, x_n = \text{const}$

ные параметры $\eta_{\text{ЭС}}^*, M_{\text{о.эл}}^*, V_{\text{о.эл}}^*, p^*, x_k^*$, соответствующие условию (7), определяют оптимальный прогноз технического облика ЭС нового поколения по предложенному критерию, в силу однозначности аргументов неразрывной функции (4), с заданной точностью.

3. Доказательство правомерности введения критерия

Для доказательства правомерности введения критерия в форме (3) приведём расчётный пример. Допустим, что ставится задача разработки ЭС нового поколения с повышенными выходными энергетическими и оптимальными массово-объёмными конструктивными характеристиками. Нам известны результаты статистического анализа массовых и габаритных характеристик ЭС, выбранных в качестве аналоговых, в виде зависимостей аппроксимации по выбранному параметру (p), характеризующих рабочие процессы ЭС. Для простоты изложения материала выберем зависимости (линии тренда) в линейной аппроксимации:

— для массовых характеристик

$$M_{\text{ЭС}} = M_{\text{о.эл}} (1 + \tilde{\mu}_{M_{\Sigma_{\text{ст}}}}(p)) = M_{\text{о.эл}} (1 + a_m p + b_m); \quad (8)$$

— для конструктивных объёмных характеристик

$$V_{\text{ЭС}} = V_{\text{о.эл}} (1 + \tilde{\mu}_{V_{\Sigma_{\text{ст}}}}(p)) = V_{\text{о.эл}} (1 + a_v p + b_v), \quad (9)$$

где начальные параметры $M_{\text{о.эл}}$ и $V_{\text{о.эл}}$ заданы, а коэффициенты a_i и b_i известны.

Тогда при принятой глобальной ММ расчета мощности ЭС критерий в форме (3) преобразуется к виду

$$M_{\text{удЭС}}(M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_k) = \frac{M_{\text{о.эл}} (1 + a_m p + b_m)}{\left(\frac{N_{\text{ЭС}}(\eta_{\text{ЭС}}, p, x_k)}{V_{\text{о.эл}} (1 + a_v p + b_v)} \right)}, \quad (10)$$

где $M_{\text{о.эл}}, V_{\text{о.эл}}, \eta_{\text{ЭС}}, p, x_k$ — независимые аргументы числом N .

Решение экстремальной задачи проводим по изложенному выше алгоритму при заданном значении $M_{\text{уд.зад}}^{j \min}$ (см. соотношение (7)) и известной глобальной ММ расчета энергетических параметров разрабатываемой ЭС нового поколения. Отметим, что представленный пример носит характер качественного расчета оптимального прогноза технического облика вновь создаваемой ЭС общего вида. Так как графическое представление экстремальной задачи при размерности больше трёх невозможно, ограничимся критерием вида $M_{\text{удЭС}}(M_{\text{о.эл}}, p)$ при заданном $V_{\text{о.эл}}$ и известной глобальной расчетной ММ ЭС $N_{\text{ЭС}} = f(\eta_{\text{ЭС}}, p, x_k)$.

На рис. 3 представлено решение трехмерной экстремальной задачи нахождения

$$M_{удЭС} = f(M_{о.эл}, V_{о.эл}, p, x_k) \Rightarrow \min$$

в виде 3D-графика, где принято, что глобальная ММ выходной мощности ЭС известна и имеет упрощенный вид:

$$N_{ЭС} = f(\eta_{ЭС}, p, x_{k+3}) = A_{N_0} \eta_{ЭС} (a_N p^2 + b_N p + C_N). \quad (11)$$

Проведенный анализ 3D-поверхности на рис. 3 показывает, что в данных условиях решения экстремальной задачи получена ограниченная конусная поверхность с явным выражением минимальных значений, обозначенных прямой линией. Совокупность минимальных значений

$$M_{удЭС} = f(M_{о.эл}, V_{о.эл}, \eta_{ЭС}, p, x_{k+3}) \Rightarrow \min$$

получена по алгоритму, представленному выше, при значениях параметров-аргументов: $\eta_{ЭС} = 0,95$; $A_{N_0} = 1,0$; $a_N = -0,98$; $b_N = 13,1$; $C_N = 150,08$, где $x_k \in [A_{N_0}, a_N, b_N, C_N]$. При этом получены эквидистантные плоские поверхности по параметру «конструктивного» объема $V_{о.эл} = Var$ (рис. 3, обозна-

чение пл. α с плоским графиком по линии A-B). Полученный результат указывает на возможность сведения решения экстремальной задачи к оптимизации в двумерной постановке по выбранному обобщенному параметру (p) при заданных остальных величинах независимых аргументов. Данный факт подтверждается результатами расчетов, представленных в виде графиков на рис. 4.

На графиках рис. 4 видно, что изменение введенного критерия разрабатываемой ЭС общего вида при фиксированной условной массе $M_{о.эл} = 1,0$ и изменении условного «конструктивного» объема $V_{о.эл} = Var$ приводит к увеличению оптимального значения критерия $M_{удЭС}$ от 0,41 до 0,46, т.е. примерно на 10,9% при расчетной по ММ выходной мощности (11). При этом условный «конструктивный» объем ЭС меняется на 13% для оптимальной величины параметра $p \approx 6,77$.

Кроме того, введенный критерий позволяет исследовать изменения (уточнения), т.е. корректировать адекватность глобальной ММ ЭС реальному образцу. Для приведенного выше примера допустим, что в глобальной ММ был уточнен независимый параметр b_N на 12,08% и он принял значение: $b_N = 14,9$. Результаты изменения критерия для данного случая приведены на рис. 5.

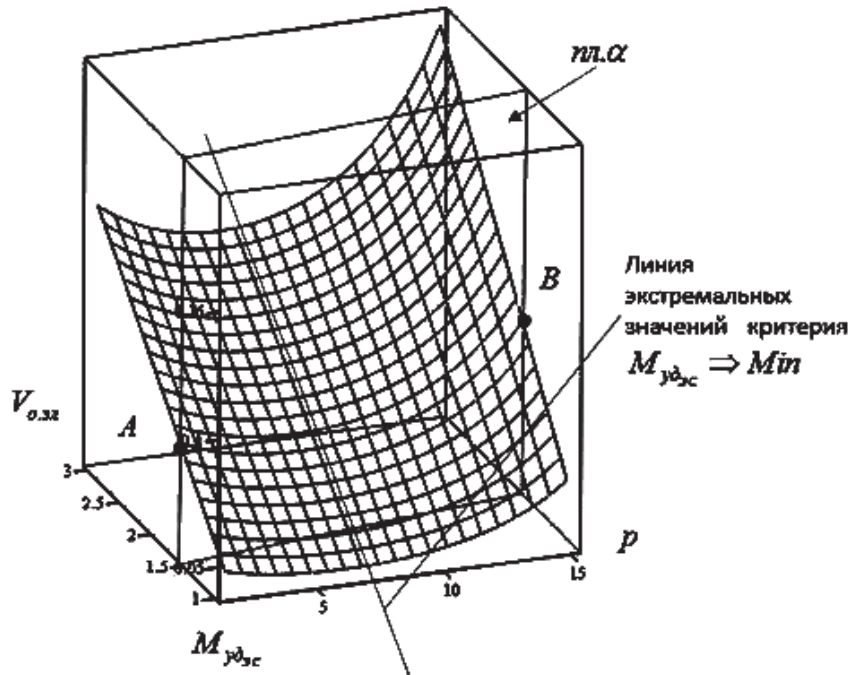


Рис. 3. Вид решения трёхмерной экстремальной задачи $M_{удЭС}(M_{о.эл}, p)$ определения оптимальных значений критерия для ЭС общего вида при $p \in [0,1 - 15] = Var$; заданном «конструктивном» объёме выбранного основного узла $V_{о.эл} \in [1,0 - 3,0] = Var$ и массе $M_{о.эл} = 1,0 = const$ этого же узла конструкции

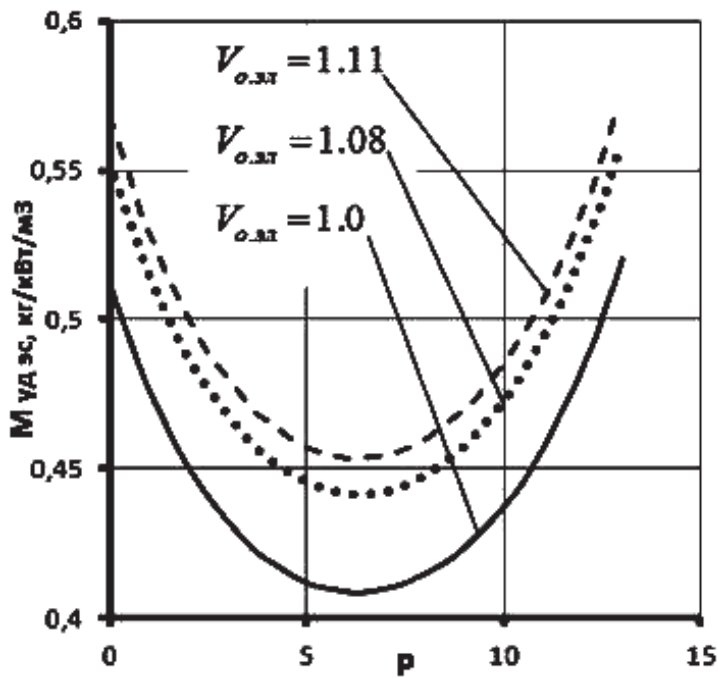


Рис. 4. График зависимости критерия изменения условного «конструктивного» объема $V_{0,эл} = \text{Var}$ разрабатываемой ЭС общего вида при фиксированной условной массе $M_{0,эл} = 1,0$

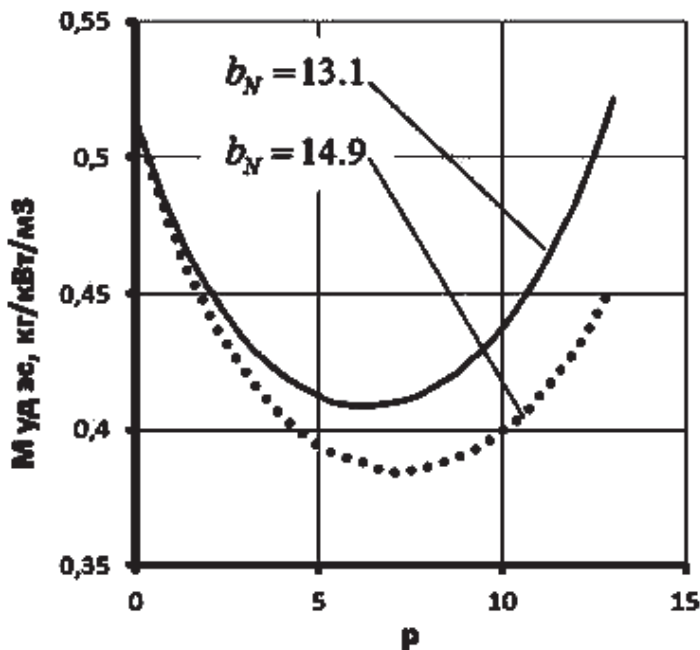


Рис. 5. Изменение критерия за счёт уточнения глобальной ММ ЭС нового поколения

Проведенный анализ графиков рис. 5 показывает, что уточнение глобальной ММ разрабатываемой ЭС приводит, при тех же массовых и объёмных (габаритных) характеристиках, к уменьшению критерия на 6,09%. Изменение принятого обоб-

щенного оптимального параметра p от 6,5 до 7,6 со сдвигом вправо указывает на необходимость проведения дополнительного анализа описанных ММ рабочих процессов в создаваемой ЭС.

Таким образом, введенный статистический специальный критерий (см. формулы (3) и (4)), характеризующий оптимальный прогноз технического облика ЭС нового поколения различного типа и назначения, позволяет проводить системные всесторонние исследования эксплуатационных параметров системы. При этом появляется возможность прогнозировать оптимальный технический облик ЭС на стадии эскизного проектирования по заданному ТТ, что существенно снижает материальные, интеллектуальные и временные затраты при создании образцов новой техники.

Выводы

1. На основании проведенного морфологического анализа состава ЭС общего вида впервые предложен и синтезирован универсальный специальный статистический критерий, который позволяет на стадии эскизного проектирования прогнозировать технический облик ЭС нового поколения с оптимальными выходными энергетическими и массово-объёмными (габаритными) конструктивными характеристиками с высокой адекватностью реальному изделию.

2. Анализ полученных результатов проведенных исследований показывает, что при создании перспективной ЭС существует настоятельная необходимость проведения глубокого статистического исследования эксплуатационных данных успешных аналоговых ЭС для выявления объективного прогноза развития систем заданного типа в будущем.

3. Показано, что точность прогнозирования технического облика ЭС нового поколения зависит от достоверности предшествующего глубокого статистического анализа полей эксплуатационных данных ЭС, принятых в качестве аналоговых.

4. Представленный в работе специальный критерий позволяет спрогнозировать оптимальный технический облик ЭС на стадии эскизного проектирования с высокой степенью соответствия заданным ТТ, что существенно снижает материальные и интеллектуальные временные затраты на разработку.

5. Разработанный специальный критерий позволяет в единицу времени интеллектуального труда предложить больше вариантов прогноза технического облика перспективной ЭС для проведения системного конструктивного и технологического анализа.

Библиографический список

1. Морфологический анализ, <https://mylektsii.ru/7-124821.html>
2. Киров А.В. Основные аспекты определения облика системы управления полным жизненным циклом изделия // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 9-1. С. 31-34.
3. Фокин Д.Б., Селиванов О.Д., Эзрохи Ю.А. Исследования по формированию оптимального облика турбопрямоточного двигателя в составе силовой установки высокоскоростного самолёта // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 3. С. 82-96.
4. Емельянец Г.И., Моисеев Э.С., Солнцев А.Н. Современные требования и облик навигационного комплекса для боевых надводных кораблей начала XXI века // *Навигация и гидрография*. 1995. № 1. С. 37-42.
5. Востриков О.В. Обоснование облика навигационной системы ударного беспилотного летательного аппарата // *Труды МАИ*. 2011. № 48. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26757>
6. Анисимов К.С., Кажан Е.В., Курсаков И.А., Лысенков А.В., Подаруев В.Ю., Савельев А.А. Разработка облика самолета с использованием высокоточных методов вычислительной аэродинамики и оптимизации // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 7-19.
7. Вязгин В.А., Федоров В.В. Математические методы автоматизированного проектирования. — М.: Высшая школа, 1989. — 184 с.
8. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 400 с.
9. Козлов А.Е. Экспортный потенциал авиастроительного предприятия: тенденции развития и прогнозное моделирование (на примере Арсеньевской авиационной компании «Прогресс» им. Н.И. Сазыкина) // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 1. С. 243-255.
10. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений // *Знание. Сер. «Математика, кибернетика»*. 1985. — 32 с.
11. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. — М.: Наука, 1982. — 256 с.
12. Михалевиц В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. — М.: Наука, 1982. — 286 с.
13. Скибин В.А., Солонин В.И. (ред.). Иностранные авиационные двигатели: справочник ЦИАМ. — М.: Авиамир, 2005. — 592 с.
14. Бакулев В.И., Голубев В.А., Крылов Б.А. и др. Теория, расчёт и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник. — 3-е изд. — М.: МАИ — САТУРН, 2003. — 688 с.
15. Кулалаев А.В., Кулалаев В.В. Введение критерия оптимальных конструкторских решений при создании энергетических систем // *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29(68). № 3. Ч. 1. С. 28-34.
16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.
17. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика: Пер. с нем. Л.Н. Большева / Под ред. Н.В. Смирнова. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. — 436 с.
18. Уайлд Д.Дж. Методы поиска экстремума: Пер. с англ. А.Н. Кабалева, Е.П. Маслова, В.Д. Спиридонова / Под ред. А.А. Фельдбаума. — М.: Наука, 1967. — 268 с.
19. Метод градиентного спуска, http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод_градиентного_спуска
20. Мальцев А.И. Основы линейной алгебры. — М.: Гостехиздат, 1956. — 340 с.
21. Buehler R.J., Shah B.V., Kempthorne O. Some properties of steepest ascent and related procedures for finding optimum conditions. — Jowa State University Statistical Laboratory. Technical rept. no. 1 on Contract Nonr-530(05). 1961, pp. 8 — 10, 18.
22. Zellnick H.E., Sondak N.E., Davis R.S. Gradient search optimization // *Chemical Engineering Progress*. 1962. No. 58(8), pp. 35 — 41.
23. Blum J.R. Approximation methods which converge with probability one // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1954. Vol. 2. No. 2, pp. 382-386.
24. Гриняев С.В. Нечеткая логика в системах управления // *Компьютерра*. 2001. URL: <http://www.computerra.ru/offline/2001/415/13052/>

TECHNICAL APPEARANCE ANALYSIS OF ENERGY SYSTEMS BY MATHEMATICAL STATISTICS TECHNIQUES

Marchukov E.Yu.^{1*}, Vovk M.Yu.^{2**}, KulalaeV V.V.^{2***}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

² A.Lyulka Design Bureau - a branch of the UEC - Ufa Engine Industrial Association,
13, Kasatkina str., Moscow, 129301, Russia

* e-mail: kaf205@mail.ru

** e-mail: mvovk@yandex.ru

*** e-mail: kulalayev.viktor@gmail.com

Abstract

Aerospace industry development is impossible without implementation of up-to-date samples of high-efficiency new generation energy systems (ES). The term “technical appearance” implies the aggregate of parametric, structural and technological solutions, reflecting most substantial specifics of the system appearance [5]. It is well-known that designing and production of new technology, inclusive of ES in aerospace industry, leads to the necessity of taking compromise optimal or rational engineering and technological decisions. Besides, designer always faces the requirement for conformity of technical appearance forecast of the ES being developed to its real-life prototype. An engineering approach based on statistical analog technique for decision-making while developing new technology may be of help for the appointed tasks solution and meeting the above said requirements [10, 15]. This technique foundation consists in the fact, that deep analysis and synthesis of static structural and energy data of the ES, selected analogs and prototypes according to the parameters of technical requirements to the design according to [15–17] are performed while prospective equipment development. The article regards the energy system (ES) in general form as a mechanical machine for input energy conversion into useful work. Methodological basics of the new generation ES optimal appearance forecasting by mathematical statistics techniques [15–24]. The article demonstrates that development and introduction of the special statistical criterion, integrating all operational parameters in the form of multi-parametrical function, is urgent for solving scientific and engineering problems of new ESs development with specified properties of enhanced effectiveness. This criterion may be named forecast criterion. The introduced special forecast criterion is based on ES statistical analog data fields processing (already created and successfully operated) by mathematical statistics techniques [15–17]. The criterion of the analytical form analysis by independent

parameters-arguments leads to formulation and solution of the extreme problem of a multi-parameter function optimizing by known mathematical methods [18, 20, 24], where obtained optimal parameters determine the forecast of the newly created ES optimal technical appearance. Algorithm for compiling and special forecast criterion computing in general is presented. To demonstrate the legitimacy of the criterion introduction, an example of computing the forecast of the ES technical appearance in general is given. The scientific results of the article may be used to develop a comprehensive software product for modeling technical optimal concept of a new generation ES with increased output energy operational parameters and optimal mass-dimensional (volumetric) characteristics.

Keywords: technical appearance, special statistical criterion, statistical forecast, mathematical model, multiparametric function, extreme optimization problem.

References

1. *Morfologicheskii analiz*, <https://mylektsii.ru/7-124821.html>
2. Kirov A.V. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 9-1, pp. 31-34.
3. Fokin D.B., Selivanov O.D., Ezrokhi Yu.A. The studies on optimal shape forming of a turbo-ramjet engine as a part of a high-speed aircraft power plant. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 82-96.
4. Emel'yantsev G.I., Moiseev E.S., Solntsev A.N. *Navigatsiya i gidrografiya*, 1995, no. 1, pp. 37–42.
5. Vostrikov O.V. *Trudy MAI*, 2011, no. 48. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26757>
6. Anisimov K.S., Kazhan E.V., Kursakov I.A., Lysenkov A.V., Podaruev V.Y., Savel'ev A. A. Aircraft layout design employing high-precision methods of computational aerodynamics and optimization. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 7-19.
7. Vyazgin V.A., Fedorov V.V. *Matematicheskie metody avtomatizirovannogo proektirovaniya* (Mathematical

- methods of computer-aided design), Moscow, Vysshaya shkola, 1989, 184 p.
8. Koryachko V.P., Kureichik V.M., Norenkov I.P. *Teoreticheskie osnovy SAPR* (Theoretical basics of CAD), Moscow, Energoatomizdat, 1987, 400 p.
 9. Kozlov A.E. Export potential of an aircraft building enterprise: development trends and predictive modeling (on the example of Progress Arsenyev Aviation Company). *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 243-255.
 10. Emel'yanov S.V., Larichev O.I. *Mnogokriterial'nye metody prinyatiya reshenii* (Multicriteria decisionmaking methods), Moscow, Znanie. Ser. "Matematika, kibernetika", 1985, 32 p.
 11. Podinovskii V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* (Pareto-optimal solutions for multicriteria problems), Moscow, Nauka, 1982, 256 p.
 12. Mikhalevich B.C., Volkovich V.L. *Vychislitel'nye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* (Computational methods of complex systems study and design), Moscow, Nauka, 1982, 286 p.
 13. Skibin V.A., Solonin V.I. (eds.) *Inostrannye aviatsionnye dvigateli: spravochnik TsIAM* (Foreign Aircraft Engines), Moscow, Aviamir, 2005, 592 p.
 14. Bakulev V.I., Golubev V.A., Krylov B.A. et al. *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants), Moscow, MAI – SATURN, 2003, 688 p.
 15. Kulalaev A.V., Kulalaev V.V. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V.I. Vernads'kogo. Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2018, vol. 29(68), no. 3, part 1, pp. 28-34.
 16. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists), Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p.
 17. Waerden B.L. *Mathematische Statistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1957, 360 p. DOI: 10.1007/978-3-642-64974-5
 18. Wilde D.J. *Optimum seeking methods*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.Y., 1964, 202 p.
 19. *Metod gradientnogo spuska*, http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Метод_градиентного_спуска
 20. Mal'tsev A.I. *Osnovy lineinoi algebry* (Fundamentals of linear algebra), Moscow, Gostekhizdat, 1956, 340 p.
 21. Buehler R.J., Shah B.V., Kempthorne O. *Some properties of steepest ascent and related procedures for finding optimum conditions*. Iowa State University Statistical Laboratory. Technical rept. no. 1 on Contract Nonr-530(05). 1961, pp. 8 - 10, 18.
 22. Zellnick H.E., Sondak N.E., Davis R.S. Gradient search optimization. *Chemical Engineering Progress*, 1962, no. 58(8), pp. 35-41.
 23. Blum J.R. Approximation methods which converge with probability one. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1954, vol. 2, no. 2, pp. 382-386.
 24. Grinyayev S.V. *Komp'yuterra*, 2001. URL: <http://www.computerra.ru/offline/2001/415/13052/>