

УДК 519.6: 629.7.036.3

**Е.С. МЕНЯЙЛОВ¹, А.А. ТРОНЧУК¹, Е.М. УГРЮМОВА¹, Ю.Ф. БАСОВ²,
А.В. МЕНЯЙЛОВ²**¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОВОРОТНЫМИ НАПРАВЛЯЮЩИМИ АППАРАТАМИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

Предложен метод решения задачи выбора закона регулирования поворотными направляющими аппаратами (НА) в многоступенчатом осевом компрессоре с целью обеспечения максимальных КПД вдоль линии рабочих режимов при заданных запасах устойчивости в условиях неопределенности входных данных. Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач стохастической оптимизации (МЗСО). Разработан эволюционный метод решения МЗСО, основанный на использовании генетического алгоритма. Рассмотрен пример реализации предлагаемого метода при выборе закона регулирования поворотными входным и направляющими аппаратами первых четырех ступеней многоступенчатого осевого компрессора (МОК) современного турбореактивного двигателя для вертолета. Решена задача о назначении допусков на углы установки венцов компрессора в целях обеспечения заданных доверительных интервалов по интегральным характеристикам.

Ключевые слова: *стохастическая оптимизация, эволюционные методы, турбореактивные двигатели, многоступенчатый осевой компрессор, назначение допусков.*

Введение

В современном мире развитие сложных технических систем (СТС) характеризуется постоянным повышением требований к их энергетическим и эксплуатационным характеристикам. Одним из путей достижения этих требований является повышение точности изготовления СТС. Особенно актуально эти требования для современного серийного производства СТС и их подсистем. Повышение точности изготовления изделий (либо уменьшение допусков при их изготовлении) можно обеспечить установкой нового высокоточного оборудования, позволяющего производить СТС с заданными параметрами. Однако, установка нового оборудования всегда ведет к значительным финансовым затратам. Поэтому актуальной технической проблемой является сокращение затрат на доводку серийных СТС путем выбора рациональных параметров и соответствующих им допусков серийно изготавливаемых СТС и их подсистем с точки зрения достижения заданных интегральных критериев качества и допусков на их отклонения СТС в целом.

В настоящее время применяют три типа методов выбора допусков и посадок – методы прецедентов (метод аналогов), методы подобия и расчетные, которые являются наиболее обоснованными методами выбора допусков и посадок [1–3]. В свою оче-

редь существующие расчетные методы можно разделить на несколько основных классов: полной взаимозаменяемости, пригонки, регулирования, групповой взаимозаменяемости (селективной сборки), вероятностный. Наиболее перспективными для практики является вероятностные методы, поскольку они позволяют без введения дополнительных операций (а, значит, и увеличения себестоимости изделия) найти такие допуски на изготовление подсистем сложных изделий, которые обеспечивают не только заданные параметры изделия в целом, но и отклонения параметров изделия не более, чем заданные.

Задачи выбора рациональных параметров и соответствующих им допусков серийно изготавливаемых СТС и их подсистем относятся к задачам системного совершенствования СТС в условиях неопределенности входных данных. Анализ существующих литературных источников показывает, что задачи системного совершенствования серийных СТС (в том числе задачи о назначении допусков на изготовление подсистем СТС) могут быть сведены к задачам системной оптимизации (принятия решений) в условиях неопределенности входных данных, а те в свою очередь - к последовательности взаимосвязанных многокритериальных задач стохастической оптимизации (МЗСО). МЗСО управляющих переменных СТС, которые обычно имеют большую

размерность, относятся к трансвычислительным задачам, требующим высокой информационной ресурсоемкости. Существующие методы решения МЗСО, как правило, не позволяют находить множество оптимальных по Парето решений, а также не позволяют получать результат решения МЗСО с приемлемой с точки зрения практики точностью с использованием сравнительно небольших информационных ресурсов.

В связи с этим научная задача, которая состоит в разработке математических моделей, методов и реализующих их компьютерных систем для системного совершенствования объектов авиационной техники в условиях неопределенности входных данных является актуальной.

В данной работе представлен метод решения задачи выбора закона регулирования поворотными направляющими аппаратами многоступенчатого осевого компрессора с целью обеспечения максимальных КПД вдоль линии рабочих режимов при заданных запасах устойчивости в условиях неопределенности входных данных. Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач стохастической оптимизации (МЗСО). Разработан эволюционный метод решения МЗСО, основанный на использовании генетического алгоритма. Представлен пример реализации предлагаемого метода при выборе закона регулирования поворотными входным и направляющими аппаратами первых четырех ступеней МОК двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В. Решена задача о назначении допусков на углы установки венцов компрессора двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В в целях обеспечения заданных доверительных интервалов по интегральным переменным МОК.

1. Постановка задачи стохастической оптимизации со смешанными условиями

Задача стохастической оптимизации представляется в виде $f(x) \rightarrow \min$, где f – функция цели (ФЦ), вид которой зависит от условий рассматриваемой задачи, x – случайная величина с заданным законом распределения. В дальнейшем рассматриваются переменные x с нормальным или равномерным законами распределения. Переменную x однозначно можно определить, в случае нормального закона распределения, задав ее среднюю величину $M[x] = x_c$ и дисперсию $D[x] = \sigma_x^2$. Следует отметить, что в случае, когда рассматриваемая задача оптимизации является многопараметрической, переменная x и определяющие ее величины x_c и σ_x

являются векторами, размерность которых соответствует размерности решаемой задачи.

Вследствие случайной природы переменной x , ФЦ $f(x)$ также будет случайной величиной. Для представления случайной ФЦ определим ее среднее значение и дисперсию – $M[f(x)] = f_c$ и $D[f(x)] = \sigma_f^2$. При определении вероятности принадлежности значения ФЦ заданному диапазону при известных значениях величин x_c и σ_x случайным образом сформируем множество векторов $x = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$, вычислим соответствующие значения ФЦ $f_i = (1 \dots n)$ и определим количество элементов i_f , удовлетворяющих требованию $f_{\min} \leq f(x_i) \leq f_{\max}$. Полученное число нормируем путем деления на n .

Зачастую в выражение для ФЦ входит не одна переменная, а несколько. Допустим, ФЦ содержит J переменных. В таком случае используется скалярная «свертка» переменных ФЦ \hat{f} . Для вычисления вероятности принадлежности значения ФЦ заданному диапазону для элемента множества рассчитывается вектор $f_i = \{f_{1,i}, f_{2,i} \dots f_{J,i}\}$. В этом случае для каждой переменной задаются свои ограничения, а вместо требования $f_{\min} \leq f(x_i) \leq f_{\max}$ – дизъюнкция требований вида

$$f_{j \min} \leq f_j(x_i) \leq f_{j \max}, \quad j = 1 \dots J.$$

В классе задач стохастической оптимизации выделено три модели принятия решений: М-задача (задача нахождения минимального математического ожидания ФЦ), V-задача (задача нахождения минимальной дисперсии ФЦ) и P-задача (задача нахождения максимальной вероятности достижения заданной ФЦ) [4 – 7].

Следует отметить, что часто в задачах стохастической модификации необходимо наблюдать за изменениями средней величины и дисперсии ФЦ одновременно, не допускать превышения ими заданных значений.

Для решения этой проблемы рассматриваются модели со смешанными условиями. Обозначенные условия для многокритериальной задачи могут вводиться, например, в виде скалярной «свертки» ФЦ на основе концепции степенных средних А.Н. Колмогорова:

$$\hat{f}^0 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I f_{\text{fit}} \left(\Delta_{f_i}^2 \right) + \left(\frac{i_{\alpha, f}}{n_{\alpha}} - P^* \right)^2, \quad (1)$$

где $\Delta_{f_i} = \frac{M[f_i] - f_i^*}{\sigma_{f_i}^*}$; f_i^* , $\sigma_{f_i}^*$ – желаемые значения

ФЦ и их средних квадратичных отклонений, $i_{\alpha, f}$ – количество точек из n_α , принадлежащих заданному диапазону, P^* – желаемая вероятность достижения заданных ФЦ (для доверительного интервала $\pm 3\sigma_{f_i}^*$ – $P^* = 0,99$), f_{fit} – функция приспособленности вида: $f_{fit} = 1 - e^{-Cd}$, $C > 1$, d – аргумент ФЦ ($d > 1$).

Решением многокритериальной задачи стохастической модификации при использовании модели с ФЦ (1) является множество оптимальных по Парето решений. В таком случае возникает задача отбора единственного решения. В данной работе для отбора единственного решения в ФЦ используется дополнительное слагаемое, которое обеспечивает при синтезе решения максимальное приближение вектора решения задачи \bar{x} к вектору переменных прототипа \bar{x}_0 . При этом ФЦ принимает вид:

$$\hat{f}^0 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I f_{fit} (\Delta_{f_i}^2) + \left(\frac{i_{\alpha, f}}{n_\alpha} - P^* \right)^2 + \frac{\beta}{M_k} \times \left[\sum_{m=1}^{M_k} f_{fit} (\Delta_{x, m}^2) + \sum_{m=1}^{M_k} f_{fit} \left(\frac{1}{n_\alpha} \left| \chi_{x, m}^2 - n_\alpha \right| \right) \right], \quad (2)$$

где $\Delta_{x, m} = \frac{M_\alpha [x_m] - x_{m, 0}}{\sigma_m^*}$;

$$\chi_{x, m} = \frac{n_\alpha M_\alpha | (x_m - M_\alpha [x_m])^2 |}{(\sigma_m^*)^2};$$

$x_{m, 0}$ – значения переменных;

x_m – значения переменных для прототипа;

σ_m^* – средние квадратичные отклонения пере-

менных $x_{m, 0}$.

Квазирешение многокритериальных задач стохастической оптимизации со смешанными условиями (ЗСОСУ) – нормальное решение может быть найдено методом регуляризации А.Н. Тихонова:

$$\hat{X}_p^0 = \arg \inf_{X^0 \in D_X} \hat{f}^0 (X^0, \beta_p). \quad (3)$$

Параметр β_p в (3) выбирался

$$(\beta_{p+1} = \beta_p / q, q > 1, p = 0, 1, 2, \dots)$$

в соответствии с обобщенным принципом невязки для нелинейных задач [8].

Рассматривались каждый раз какие-либо экстремали $\hat{X}_p^0, \hat{X}_{p+1}^0$ и проверялось выполнение условия

$$\|f^0(\hat{X}_p^0) - C(\xi + h \|\Delta \hat{X}_{p+1}^0\|)\| \geq 0, \quad C > 1,$$

где ξ – погрешность определения $\|f^*\|$,

$$h \geq \hat{f}^0(\hat{X}_{p+1}^0, \beta_{p+1}) / \|\Delta \hat{X}_{p+1}^0\|.$$

Если оно выполнялось, то в качестве приближения к квазирешению выбирали экстремаль, подчиненную требованию $\|f^0(\hat{X}^0)\| \leq C(\xi + h \|\Delta \hat{X}^0\|)$.

В противном случае экстремаль выбиралась из условия $\|f^0(\hat{X}^0)\| \geq C(\xi + h \|\Delta \hat{X}^0\|)$.

Решение задачи (3) осуществлялось с помощью эволюционного метода [6, 7].

2. Результаты решения задачи нахождения закона регулирования поворотными направляющими аппаратами МОК

В качестве примера, рассматривалось решение задачи нахождения закона регулирования поворотными лопатками НА МОК авиационного турбовального двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В.

Известными являются проектные и режимные параметры, характеристики прототипа. В качестве управляющей переменной выбран вектор \vec{v} , компонентами которого являются углы установки ВНА и НА m первых ступеней МОК.

Для данной задачи характерно, что кроме нахождения математических ожиданий величин параметров компрессора и их средних квадратичных отклонений необходимо учитывать также и обеспечение запасов газодинамической устойчивости компрессора для найденных законов регулирования.

Методика решения поставленной задачи представлена в работе [9]. Были рассмотрены следующие законы регулирования:

- исходный закон регулирования для прототипа;
- закон регулирования при независимом регулировании углами установки лопаток НА в детерминированной постановке;
- закон регулирования с линейным законом зависимости между углами установки лопаток НА в стохастической постановке.

В серийном производстве в связи с наличием допусков при изготовлении невозможно соблюдать выбранные углы установки поворотных лопаток НА с абсолютной точностью, что может привести к ухудшению работы МОК.

Исходя из средних квадратичных отклонений углов установки входного и направляющих аппаратов первых четырех ступеней МОК двигателя

ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В $\sigma_v^* = 0,15$ град. получено, что максимальные средние квадратичные отклонения степени повышения давления могут достигать значения $\sigma_\pi = 0,34$, что является большой величиной, при средних квадратичных отклонениях КПД $\sigma_\eta \leq 0,0013$.

В связи с этим была сформулирована задача нахождения закона регулирования с линейным законом зависимости между углами установки лопаток НА как ЗСОСУ: выбрать такой закон регулирования поворотными лопатками НА – найти величины математических ожиданий и средних квадратичных отклонений углов установки лопаток НА, при которых математические ожидания и средние квадратичные отклонения интегральных характеристик вдоль линии рабочих режимов при заданных запасах газодинамической устойчивости ΔK_γ МОК равнялись бы желаемым.

В качестве интегральных характеристик МОК рассматривались КПД η_K^* , степень повышения давления π_K^* . В качестве структуры решения была выбрана зависимость углов установки лопаток НА, представленная следующей формулой:

$$\Delta v_i = a_i + b_i (1 - \bar{n}),$$

где Δv_i – изменение угла установки лопаток i -го НА МОК,

a_i и b_i – параметры закона регулирования НА,

\bar{n} – относительная приведенная скорость вращения вала компрессора.

В рассматриваемом случае можно обеспечить регулирование поворотными лопатками НА МОК с помощью всего лишь одного управляющего привода.

На рис. 1 и 2 показаны законы регулирования в виде зависимостей углов поворота лопаток НА Δv_i от относительной приведенной скорости вращения вала компрессора \bar{n} , полученные в разных постановках задачи.

Найденный закон регулирования в стохастической постановке со смешанными условиями обеспечивает при изменении относительной приведенной скорости вращения вала ротора \bar{n} в диапазоне значений $0,85 \dots 1,00$ изменение абсолютных значений КПД компрессора вдоль линии рабочих режимов на величину $0,0034 \dots -0,0010$.

Запасы устойчивости для всех режимов работы МОК, полученные для линейного закона регулирования поворотными лопатками НА в стохастической постановке, больше запасов, полученных для исходного закона регулирования.

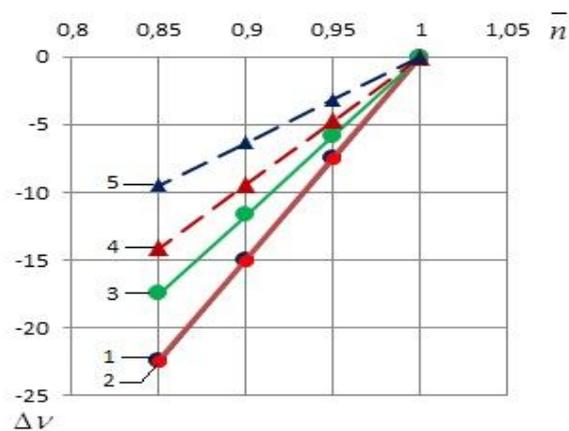


Рис. 1. Исходный закон регулирования углами установки лопаток НА (1 – ВНА, 2 – НА первой ступени, 3 – НА второй ступени, 4 – НА третьей ступени, 5 – НА четвертой ступени)

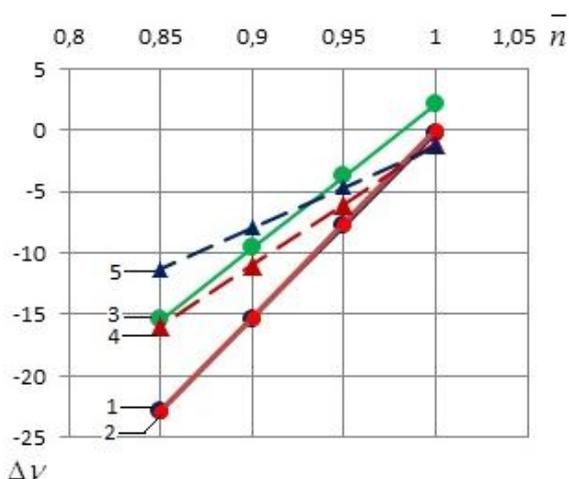


Рис. 2. Закон регулирования с линейным законом зависимости между углами установки лопаток НА в стохастической постановке со смешанными условиями (1 – ВНА, 2 – НА первой ступени, 3 – НА второй ступени, 4 – НА третьей ступени, 5 – НА четвертой ступени)

При средних квадратичных отклонениях углов установки входного и НА первых четырех ступеней МОК двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В $\sigma_v \leq 0,050$ град. на режимах $\bar{n} = [0,85 \dots 1,00]$ могут быть обеспечены следующие значения средних квадратичных отклонений суммарных характеристик МОК: $\sigma_\pi \leq 0,15$; $\sigma_\eta \leq 0,002$, с вероятностью $P^* = 0,99$.

На рис. 3 представлено сравнение зависимостей средних квадратичных отклонений степени сжатия компрессора (σ_π) от относительных приведенных скоростей вращения вала компрессора (\bar{n}) для исходного и найденного в стохастической постановке со смешанными условиями законов управления поворотными лопатками НА МОК.

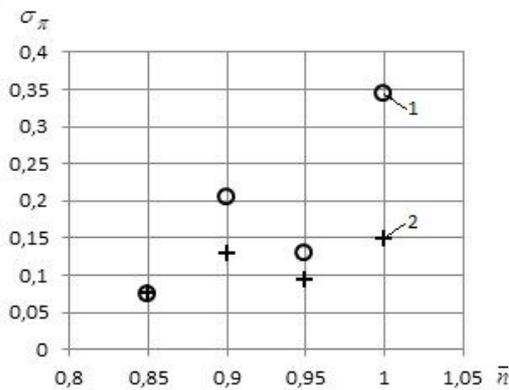


Рис. 3. Сравнение σ_{π} МОК (1 – исходный, 2 – найденный в стохастической постановке со смешанными условиями законы управления поворотными лопатками НА)

Очевидно, что значения средних квадратичных отклонений степени сжатия МОК, найденные при решении задачи оптимизации в условиях неопределенности входных данных – ниже полученных в детерминированной постановке. Таким образом, при использовании предложенного закона регулирования поворотными лопатками НА МОК можно добиться снижения доли брака при серийном производстве изделий.

Заключение

Решена задача о выборе закона регулирования углами установки поворотных лопаток входного и направляющих аппаратов первых четырех ступеней МОК двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В с целью обеспечения максимальных КПД вдоль линии рабочих режимов при заданных запасах устойчивости. Рассматриваемая задача относится к классу многокритериальных задач параметрической оптимизации. Предложен подход к решению поставленной задачи путем сведения ее к задаче модификации в детерминированной и стохастической постановках. Разработан эволюционный метод решения поставленной задачи, основанный на использовании генетического алгоритма (ГА).

Решена задача о назначении допусков на углы установки венцов компрессора двигателя ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В в целях обеспечения заданных доверительных интервалов по интегральным характеристикам МОК.

При среднеквадратичных отклонениях углов установки входного и направляющих аппаратов первых четырех ступеней МОК двигателя

ТВ3-117-ВМА-СБМ-1В $\sigma_{\nu} = 0,050$ на режимах $\bar{n} = [0,85 \dots 1,00]$ могут быть обеспечены следующие значения среднеквадратичных отклонений суммарных характеристик МОК: $\sigma_{\pi} \leq 0,15$; $\sigma_{\eta} \leq 0,002$, с вероятностью $P^* = 0,99$.

Литература

1. Анухин, В.И. Допуски и посадки. [Текст]: учеб. пособие / В.И. Анухин. – СПб.: Питер, 2008. – 207 с.
2. Захаров, В.И. Взаимозаменяемость, качество продукции и контроль в машиностроении. [Текст] / В.И. Захаров. – Л.: Лениздат, 1990. – 302 с.
3. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Учебник для вузов [Текст] / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
4. Юдин, Д.Б. Математические методы управления в условиях неполной информации. [Текст] / Д.Б. Юдин. – М.: Сов. радио, 1974. – 400 с.
5. Ермольев, Ю.М. Методы стохастического программирования. [Текст] / Ю.М. Ермольев. – М.: Наука. ФИЗМАТГИЗ, 1976. – 240 с.
6. Gas Turbine Engine Elements Systematic Improvement on the Base of Inverse Problem Concept by Stochastic Optimization Methods [Text] / M.L. Ugryumov, A.A. Tronchuk, V.E. Afanasjevska, A.V. Myenyaylov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 20-th ISABE Conference. – Gothenburg (Sweden). – 2011. – 9 p. (ISABE Paper No. 2011-1255).
7. Трончук, А.А. Математические модели и эволюционный метод решения задач стохастической оптимизации [Текст] / А.А. Трончук, Е.М. Угрюмова // Вісник Харківського національного університету: зб. наук. праць. Сер: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2012. – Вип. 19, № 1015. – С. 292-305.
8. Гончарский, А.В. Обобщенный принцип невязки [Текст] / А.В. Гончарский, А.С. Леонов, А.Г. Ягола // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973. – Т. 13, № 2. – С. 294-302.
9. Меняйлов, А.В. Применение эволюционных методов для решения задач оптимизации компрессоров газотурбинных двигателей [Текст] / А.В. Меняйлов, А.А. Трончук, Е.М. Угрюмова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 5 (52). – С. 59-65.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНУ РЕГУЛЮВАННЯ ПОВОРОТНИМИ НАПРАВЛЯЮЧИМИ АПАРАТАМИ БАГАТОСТУПІНЧАСТОГО ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВХІДНИХ ДАНИХ

Є.С. Меньяйлов, О.А. Трончук, К.М. Угрюмова, Ю.Ф. Басов, А.В. Меньяйлов

Запропоновано метод розв'язання задачі вибору закону регулювання поворотними напрямними апаратами в багатоступінчастому осьовому компресорі з метою забезпечення максимальних ККД вздовж лінії робочих режимів при заданих запасах стійкості в умовах невизначеності вхідних даних. Розглянута задача відноситься до класу багатокритеріальних завдань стохастичною оптимізацією. Розроблено еволюційний метод рішення МЗСО, заснований на використанні генетичного алгоритму. Розглянуто приклад реалізації запропонованого методу при виборі закону регулювання поворотними вхідним і направляючими апаратами перших чотирьох ступенів багатоступеневого вісьового компресора сучасного вертольота. Розв'язана задача про призначення допусків на кути установки вінців ком-компресора з метою забезпечення заданих довірчих інтервалів за інтегральними характеристикам.

Ключові слова: теорія великих систем, оптимізація, еволюційні методи, турбореактивні двигуни, осьовий багатоступінчастий компресор.

METHOD FOR DETERMINING THE LAW ON TILTGUIDE VANES OF MULTISTAGE AXIAL COMPRESSORS UNDER UNCERTAINTY OF INPUT DATA

E.S. Meniailov, A.A. Tronchuck, K.M. Ugryumova, Yu.F. Basov, A.V. Myenyaylov

We propose a method for solving the problem of the choice of law regulating rotating vanes in a multi-stage axial compressor in order to ensure maximum efficiency along the lines of the operating modes for a given stock of stability in an uncertain input data. The problem under consideration belongs to a class of multi-criteria problems of stochastic optimization. Developed an evolutionary method for, based on the use of genetic algorithm. An example of the proposed method for selecting control law rotary input and guide vanes of the first four stages of a multi-stage axial compressor of a modern jet engine helicopter. The problem of assigning tolerances on the angles of the rows of the compressor in order to set confidence intervals on the integral characteristics.

Keywords: theory of the large systems, optimization, evolutionary methods, turbojet engines, axial multi-stage compressor.

Меньяйлов Евгений Сергеевич – аспирант каф. інформатики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Трончук Алексей Адамович – ассистент каф. інформатики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Угрюмова Екатерина Михайловна – канд. техн. наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Басов Юрий Федорович – канд. техн. наук, Главный конструктор АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Меньяйлов Андрей Владимирович – канд. техн. наук, начальник расчетно-экспериментальной группы отдела компрессоров АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.