

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ С НЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ САМОЛЕТА

Мартиросян М. П.¹, Огородников О. В.²
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Рассмотрен процесс синтеза алгоритма решения многокритериальной оптимизационной задачи с эпистемической неопределенностью. Такого рода задачи возникают на этапе предварительного расчета технических характеристик маневренного самолета при наличии параметров, которые не могут быть заданы экспертом точным значением. Потребность в учете неопределенности параметров возникла по причине увеличения стоимости перспективной авиационной техники. В связи с этим значительно возросла роль этапа предварительного проектирования, так как ошибки, допущенные при расчете технических характеристик летательного аппарата, впоследствии могут привести к значительному ущербу на всех остальных этапах жизненного цикла. Для описания параметров с эпистемической неопределенностью применена теория неопределенности Б. Лю, так как она предоставляет аналитические выражения для вычисления числовых характеристик целевых функций и ограничений, что позволяет эффективно решать оптимизационные задачи с эпистемической неопределенностью, сводя неопределенные модели оптимизации к детерминированным моделям математического программирования. В результате разработан и реализован численный оптимизационный алгоритм одновременной минимизации требований к аэродинамическому качеству и характеристикам двигателя, получаемым на этапе предварительного расчета перспективного самолета. Алгоритм учитывает экспертные оценки неопределенных параметров и позволяет получить значения технических характеристик создаваемого летательного аппарата с разными показателями степени уверенности в их реализации.

Ключевые слова: эпистемическая неопределенность, модель оптимизационной задачи, предварительное проектирование, Парето-решения, маневренный самолет, неопределенное программирование.

1. Введение

Предварительный расчет технических характеристик перспективного летательного аппарата (ЛА) представляет собой начальный этап проектирования, в ходе которого принимаются

¹ Мария Пилосовна Мартиросян, техник (martirosyan.mp@phystech.edu).

² Олег Викторович Огородников, н.с. (o.v.ogorodnikov@gmail.com).

решения, определяющие последующий облик ЛА как технической системы, и выполняется расчет его технических характеристик.

В настоящий момент из-за удорожания авиационной техники значительно возросла роль этапа предварительного проектирования, так как ошибки, допущенные при определении технического облика ЛА, впоследствии могут привести к большому ущербу на всех остальных этапах жизненного цикла.

Предварительное проектирование нового ЛА неизбежно сопровождается неопределенностью его итоговых технических характеристик. Это связано с тем, что на этапе предварительного расчета летно-технических и маневренных характеристик перспективного ЛА невозможно сказать, каков будет уровень технологического совершенства конструкции планера, материалов, двигателя и других элементов на момент его непосредственного создания. Отсюда возникает целесообразность учета неопределенности исходных данных в предварительном расчете характеристик создаваемого ЛА. Неопределенность исходных данных означает, что невозможно точно сказать, какое значение будет принимать тот или иной параметр, однако можно определить диапазон значений, где каждому значению соответствует некоторая степень уверенности в его реализации. Такие параметры задаются на основе экспертной оценки специалиста, которую он делает на основе своего опыта.

Существует два типа неопределенности – алеаторная (статистическая) и эпистемическая (экспертная). Первая из них возникает, когда параметры характеризуются вариабельностью, зафиксированной в статистических данных, достаточных для принятия статистических гипотез о неопределенных параметрах. В этом случае параметру соответствует функция распределения вероятности. Эпистемическая неопределенность возникает из-за недостатка знаний, результатов наблюдений. В этом случае информацию получают от экспертов. Для работы с эпистемической неопределенностью существует много математических теорий. Наиболее популярные из них – это интервальная математика [5], теория нечетких множеств Л. Заде [10] и теория возможностей Л. Заде [11]. В данной работе для описания неопределенных параметров ЛА предлагается теория неопределенности Б. Лю,

так как в ней существует эффективный инструмент для решения оптимизационных задач с эпистемической неопределенностью, а именно, простые аналитические выражения для вычисления числовых характеристик целевых параметров для достаточно широкого класса функций. Ранее с применением теории Б. Лю решались другие задачи предварительного проектирования в условиях параметрической [3, 8] и смешанной [4, 9] неопределенности.

2. Модель многокритериальной оптимизационной задачи в условиях эпистемической неопределенности

2.1 ТЕОРИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Приведем базовые понятия теории неопределенности Б. Лю [7], необходимые для формализации выбранной задачи предварительного расчета технических характеристик перспективного ЛА. Центральным понятием теории неопределенности служит мера неопределенности M , которая удовлетворяет аксиомам нормальности, дуальности, субаддитивности и произведения (мера произведения событий равна минимальной из мер этих событий). Мера неопределенности события отражает степень уверенности эксперта в том, что это событие произойдет.

В теории неопределенности вводится понятие неопределенной переменной ξ , которая определяется функцией распределения неопределенности $\Phi(x) = M\{\xi \leq x\}$, где $\Phi(x)$ есть функция $\Phi: R \rightarrow [0,1]$.

Распределение неопределенности содержит информацию о неопределенной переменной. Оно представляет собой совокупность значений вещественной переменной x и меры неопределенности $M\{\xi \leq x\}$, соответствующей этому значению. Эксперт на основе своего опыта ставит в соответствие каждому значению переменной ξ степень уверенности M (меру неопределенности) в том, что она не больше x . Функция распределения неопределенности $\Phi(x)$ строится как аппроксимация полученных от эксперта значений x и $M\{\xi \leq x\}$ (рис. 1).

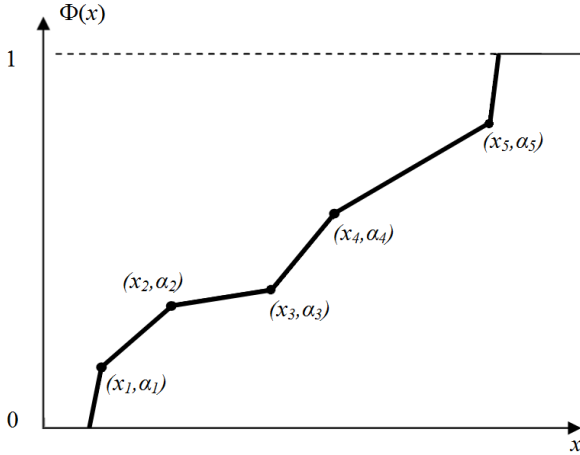


Рис. 1. Пример функции распределения неопределенности

В теории неопределенности приводятся выражения для расчета числовых характеристик функции, зависящей от неопределенных параметров – ожидаемого значения $E[\xi]$, дисперсии $V[\xi]$, критических значений $SUP_a[\xi]$ и $INF_a[\xi]$.

Если \bar{x} – вектор действительных чисел (вектор детерминированных параметров) и f – непрерывная строго возрастающая по $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m$ и строго убывающая по $\xi_{m+1}, \xi_{m+2}, \dots, \xi_n$, то $\xi = f(\bar{x}, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, имеет следующие ожидаемое значение и дисперсию при любом \bar{x} :

$$(1) E[\xi] = \int_0^1 f(\bar{x}, \Phi_1^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) d\alpha,$$

$$(2) V[\xi] = \int_0^1 (f(\bar{x}, \Phi_1^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) - E[\xi])^2 d\alpha,$$

где $\Phi_1^{-1}, \dots, \Phi_n^{-1}$ – функции, обратные функциям распределения неопределенных переменных ξ_1, \dots, ξ_n .

Критические значения (аналогичные квантилю) неопределенной переменной ξ :

$$(3) SUP[\xi] = f(\bar{x}, \Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_m^{-1}(\alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(1-\alpha), \Phi_{m+2}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)),$$

$$(4) \quad \text{INF}[\xi] = f\left(\bar{x}, \Phi_1^{-1}(1 - \alpha), \Phi_2^{-1}(1 - \alpha), \dots, \Phi_m^{-1}(1 - \alpha), \Phi_{m+1}^{-1}(\alpha), \Phi_{m+2}^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(\alpha)\right).$$

2.2 ЗАДАЧА НЕОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Общая постановка задачи оптимального проектирования с неопределенными параметрами выглядит таким образом:

$$(5) \quad \begin{cases} \min(\max) f(\bar{x}, \bar{\xi}), \\ g_j(\bar{x}, \bar{\xi}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p, \end{cases}$$

\bar{x} – вектор проектируемых параметров (вектор решений);
 $\bar{\xi}$ – вектор неопределенных параметров; $f(\bar{x}, \bar{\xi})$ – целевая функция; $g_i(\bar{x}, \bar{\xi})$ – функции ограничения.

В таком виде эта задача не имеет решения, так как целевая функция f , зависящая от неопределенных параметров, сама является неопределенной. Чтобы перейти к задаче математического программирования, необходимо заменить целевые функции и ограничения их числовыми характеристиками:

$$(6) \quad \begin{cases} \min_x d[f(\bar{x}, \bar{\xi})], \\ d_j^*[g_j(\bar{x}, \bar{\xi})] \leq 0, i = 1, 2, \dots, p, \end{cases}$$

где d – множество числовых характеристик целевой функции, d_j^* – числовые характеристики функций ограничений.

3. Алгоритм предварительного расчета параметров маневренного самолета под заданные требования

Предлагается алгоритм расчета параметров маневренного самолета в условиях эпистемической неопределенности, который основан на инженерной методике расчета основных технических характеристик маневренного самолета под заданные тактико-технические требования (ТТТ) [2, 6]: требуемую дальность L крейсерского [1] полета на дозвуковой скорости, нормальную перегрузку в режиме маневра $n_{z \text{ req}}$ (характеризует маневренность самолета), энергетическую скороподъемность P_s (насколько быстро самолет может увеличивать свою кинетическую энергию)

и массу полезной нагрузки m_{ec} . Разработанный алгоритм позволяет получить требования к геометрическим и массовым характеристикам, аэродинамическому качеству [1], параметрам силовой установки. Выходные параметры: объём самолета, площадь омываемой поверхности, взлетная масса, масса топлива, конструкции, силовой установки, взлетная форсажная тяга двигателя, а также максимальное аэродинамическое качество на режиме маневра и крейсерского полета. Выполнение полученных требований к аэродинамике, силовой установке, геометрическим и массовым характеристикам обеспечит выполнение заданных ТТТ.

3.1 ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ

Задачу расчета параметров маневренного самолета можно представить как многокритериальную оптимизационную задачу в условиях эпистемической неопределенности исходных данных. Предлагается минимизировать расчетные требования к максимальному аэродинамическому качеству на режиме крейсерского полета $K_{max cr}$ создаваемого самолета и взлетной тяге двигателя P_0 :

$$(7) \begin{cases} \min K_{max cr}, \\ \min P_0, \\ 400 \leq \gamma_a \leq 600, \\ 3 \leq F \leq 3,5, \\ 0.13 \leq \gamma_{eng} \leq 0,2. \end{cases}$$

Оптимизируемые детерминированные параметры: γ_a – плотность самолета; γ_{eng} – отношение веса силовой установки к тяге двигателей; F – коэффициент формы (равен отношению площади поверхности самолета к поверхности равновеликой по объему сферы).

Неопределенные параметры: K_{compr} – отношение аэродинамического качества на режиме маневра к качеству на режиме крейсерского полета ($K_{max cr}$ к $K_{max man}$); k_{qs1} и k_{qs2} – коэффициенты, требующиеся для расчета массы 1 м^2 поверхности планера самолета; \bar{m}_{cl} – относительная масса топлива, затраченного на участке набора высоты перед крейсерским полетом; \bar{m}_{des} – относительная масса топлива, затраченного на участке снижения после крейсерского полета; L_{des+cl} – сумма длин участков набора высоты и снижения; C_f – коэффициент эквивалентного трения [2].

Минимизация требований к аэродинамическому качеству расширяет возможности для подбора аэродинамической компоновки перспективного ЛА, а минимизация требований к двигателю расширяет возможности по его подбору из уже существующих либо по разработке нового, так как время, затрачиваемое на создание нового авиационного двигателя, сопоставимо со временем создания всего самолета в целом.

В текущей постановке задачи отсутствуют ограничения в виде функций от неопределенных переменных, но присутствуют ограничения на оптимизируемые детерминированные параметры.

Применив модель оптимизационной задачи (6) и аналитические выражения для числовых характеристик целевых функций (4), перейдем к детерминированной двухкритериальной задаче оптимизации критических значений $K_{max cr}$ и P_0 :

$$(8) \quad \begin{cases} \min \inf_{\alpha_{K_{max cr}}} [K_{max cr}], \\ \min \inf_{\alpha_{P_0}} [P_0], \\ 400 \leq \gamma_a \leq 600, \\ 3 \leq F \leq 3,5, \\ 0.13 \leq \gamma_{eng} \leq 0,2, \end{cases}$$

где $\alpha_{K_{max cr}}$, α_{P_0} – соответственно уровни степеней уверенности в том, что значения $K_{max cr}$ и P_0 будут меньше определенного фиксированного значения.

3.2 СИНТЕЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ

Для численного решения поставленной оптимизационной задачи было разработано программное обеспечение на языке Matlab. Схема взаимодействия программных модулей представлена на рис. 2. На вход программы поступает набор входных переменных (детерминированных, неопределенных и их функции распределения неопределенности) и ограничения. Далее происходит выбор способа расчета числовых характеристик целевых функций и ограничений. В результате работы программы вычисляется множество Парето-решений, каждому из которых соответствует некоторая степень уверенности (мера неопределенности) в реализации этого решения.

Для оптимизации целевых функций применяется многокритериальный генетический алгоритм, встроенный в Matlab. Для каждой комбинации варьируемых в процессе оптимизации проектируемых параметров выполняется расчет согласно алгоритму, из п. 2.2 и вычисляются числовые характеристики целевых функций.



Рис. 2. Схема взаимодействия программных функций/модулей

3.3 РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА

Перед решением поставленной задачи предварительного расчета технических характеристик перспективного ЛА в условиях неопределенности необходимо задать степени уверенности $\alpha_{K_{max\ cr}}$, α_{P_0} и вид функций распределения неопределенности Φ неопределенных проектных параметров γ_a , γ_{eng} и F .

В результате применения описанного в п 3.2 программного обеспечения получены Парето-фронты, представленные на рис. 3.

С увеличением значений $\alpha_{K_{max\ cr}}$ и α_{P_0} повышается степень уверенности в том, что итоговые значения $K_{max\ cr}$ и P_0 при создании ЛА не превысят значений из соответствующего Парето-фронта.

Расчет выполнен для маневренного самолета типа J-20. Номинальные значения для неопределенных проектных параметров

γ_a , γ_{eng} и F заданы на основе экспертных оценок, взятых из открытых источников. Стандартное отклонение σ принято равным 4% от номинала. Реальные значения $K_{max cr}$ и P_0 , взятые из открытой печати, также обозначены на рис. 3. Видно, что они соответствуют степени уверенности, которая лежит в диапазоне 0,75–0,8. На этапе предварительного проектирования данные значения степени уверенности принято считать удовлетворительными. В приведенном расчете значения $\alpha_{K_{max cr}}$ и α_{P_0} взяты равными.

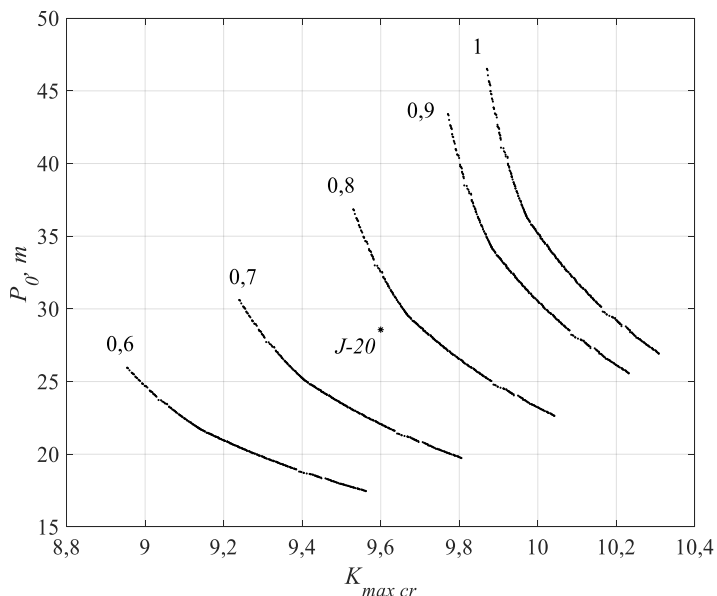


Рис. 3. Парето-фронты, соответствующие различным степеням уверенности от 0,6 до 1

4. Заключение

Предложена модель многокритериальной оптимизационной задачи расчета летно-технических характеристик маневренного ЛА в условиях параметрической эпистемической неопределенности и программное обеспечение для ее решения. Параметры с эпистемической неопределенностью моделируются с помощью

теории неопределенности. Реализован численный оптимизационный алгоритм, в котором учитываются мнения экспертов, для получения технических характеристик ЛА с различными уровнями степени уверенности.

Литература

1. *Авиация : Энциклопедия* / Гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая рос. энцикл.: Центр. аэрогидродинам. ин-т, 1994. – С. 407–408.
2. *Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов* / Под ред. Г.С. Бюшгенса. – М.: Физматлит, 1998. – 816 с.
3. ВЕРЕСНИКОВ Г.С., ПРОНИНА В.А., ПАНКОВА Л.А., ОГОРОДНИКОВ О.В. *Решение задач предварительного проектирования в условиях параметрической неопределенности* // Проблемы управления. – 2017. – №4. – С. 65–73.
4. ВЕРЕСНИКОВ Г.С., ПАНКОВА Л.А., ПРОНИНА В.А., ОГОРОДНИКОВ О.В. *Предварительное проектирование летательных аппаратов в условиях смешанной неопределенности* // Труды 13-го Всерос. совещ. по проблемам управления (ВСПУ XIII, Москва, 2019). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 3155–3160.
5. ДОБРОНЕЦ Б.С. *Интервальная математика: учеб. пособие*. – Красноярск: Красноярский гос. ун-т., 2004. – 216 с.
6. BASHKIROV I.G., IRODOV R.D. *Calculation of Jet Aircraft Parameters Under Design Requirements* // World Aviation Congress, October 13–16. – Anaheim, California, 1997. – Paper No. 975598.
7. LIU B. *Theory and Practice of Uncertain Programming*. – Berlin: Springer-Verlag, 2007. – 485 p.
8. VERESNIKOV G.S., OGORODNIKOV O.V., PANKOVA L.A., PRONINA, V.A. *Determining maneuverable aircraft parameters in preliminary design under conditions of uncertainty* // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 112. – P. 1123–1130.
9. VERESNIKOV G.S., PRONINA V.A., PANKOVA L.A., OGORODNIKOV O.V. *Optimal design of technical objects under mixed parametric uncertainty* / Proc. of the 12th Int. Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD).

Moscow, 2019. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8911060>.

10. ZADEH L.A. *Fuzzy Sets* // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338–353.
11. ZADEH L.A. *Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility* // Fuzzy Sets and Systems. – 1978. – Vol. 8. – P. 3–28.

SYNTHESIS OF THE ALGORITHM FOR THE SOLUTION OF THE OPTIMIZATION PROBLEM WITH UNCERTAIN PARAMETERS IN THE PRELIMINARY DESIGN OF THE AIRCRAFT

Mariya Martirosyan, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow (martirosyan.mp@phystech.edu).

Oleg Ogorodnikov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow (o.v.ogorodnikov@gmail.com).

Abstract: The process of synthesis of an algorithm for solving a multicriteria optimization problem with epistemic uncertainty is considered. Such problems arise at the stage of preliminary calculation of the technical characteristics of a maneuverable aircraft in the presence of parameters that cannot be specified by an expert with an exact value. The need to take into account the uncertainty of the parameters arose due to the increase in the cost of promising aviation technology. In this regard, the role of the preliminary design stage has significantly increased since mistakes made when calculating the technical characteristics of the aircraft can subsequently lead to significant damage at all other stages of the life cycle. To describe parameters with epistemic uncertainty, B. Liu's theory of uncertainty is used, since it provides analytical expressions for calculating the numerical characteristics of objective functions and constraints, which allows you to effectively solve optimization problems with epistemic uncertainty, reducing uncertain optimization models to deterministic models of mathematical programming. As a result, a numerical optimization algorithm was developed and implemented for the simultaneous minimization of requirements for aerodynamic quality and engine characteristics obtained at the stage of preliminary calculation of a promising aircraft. The algorithm takes into account expert assessments of uncertain parameters and makes it possible to obtain the values of the technical characteristics of the aircraft being created with different indicators of the degree of confidence in their implementation.

Keywords: epistemic uncertainty, optimization problem model, preliminary design, Pareto solutions, maneuverable aircraft, undefined programming.

УДК 51.7 + 629.7.01
ББК 39.53-02