

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕШАННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Вересников Г.С., Панкова Л.А., Пронина В.А., Огородников О.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

veresnikov@mail.ru, ludmila_pankova@bk.ru, valeria.pronina@gmail.com, lapom_13@mail.ru,

Башкиров И.Г.

Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского

Россия, г. Жуковский, Жуковского ул., 1

aerobig@mail.ru

Аннотация: Описана методика оптимального проектирования технических объектов в условиях параметрической смешанной неопределенности. Предлагается модель оптимального проектирования в рамках шанс-теории, предназначенной для моделирования систем со смешанной неопределенностью. В качестве примера формализуется и решается задача расчета весовых параметров пассажирского летательного аппарата в предварительном проектировании в условиях параметрической смешанной неопределенности.

Ключевые слова: смешанная неопределенность, неопределенно-случайная величина, модель оптимального проектирования, шанс-теория, расчет весовых параметров летательного аппарата.

В методах проектирования технических объектов обычно используются параметры, представленные конкретными значениями. Как правило, исходные данные – это результат экспертной оценки или статистической обработки, т.е. параметры могут быть не заданы точно. Когда точные значения параметров неизвестны, применение моделей расчета и многокритериальной оптимизации, предназначенных для вычислений с точными значениями, может привести к неэффективным или недопустимым решениям. В связи с этим актуальна разработка методики оптимального проектирования технических объектов в условиях параметрической неопределенности (неточности).

Принятие решений в предварительном проектировании, как правило, происходит в условиях смешанной параметрической неопределенности, когда присутствуют параметры как алеаторные (случайные), так и эпистемические (информацию о параметре получают от экспертов). При построении моделей оптимизации в условиях параметрической неопределенности необходим переход от недетерминированных целевых функций и ограничений к их детерминированным дубликатам. В качестве детерминированных дубликатов целевых функций – критериев оптимизации – используются их числовые характеристики (среднее значение, дисперсия, квантиль и др.).

На рис. 1 представлена методика оптимального проектирования технических объектов в условиях параметрической смешанной неопределенности, которая была реализована и опробована при решении некоторых задач предварительного проектирования ЛА.

Опишем кратко эту методику. Задаются формулы расчетов, используемые в предварительном проектировании. Выбираются критерии оптимизации – целевые функции, отражающие степень удовлетворения заданных технических требований (ТТ). Определяются входные и проектируемые параметры, а также ограничения, которым должны удовлетворять проектируемые параметры. Входные и проектируемые параметры классифицируются по типу неопределенности: детерминированные, случайные и эпистемические. После сбора информации о недетерминированных параметрах строятся модели представления недетерминированных (эпистемических и случайных) параметров. Целевые функции и ограничения с неопределенными параметрами заменяются их детерминированными дубликатами, выбранными лицом, принимающим решение (ЛПР). Формируются модели оптимального проектирования. Для решения задач, представленных этими моделями, применяется алгоритм многокритериальной оптимизации, например генетический алгоритм. После оптимизационных расчётов выполняется анализ полученных результатов, который осуществляется на основе методов, предназначенных для выбора решений. Анализируя полученный Парето-фронт, ЛПР выбирает предпочтительную точку (вектор в пространстве целевых функций) и соответствующее Парето-решение (вектор проектируемых параметров).

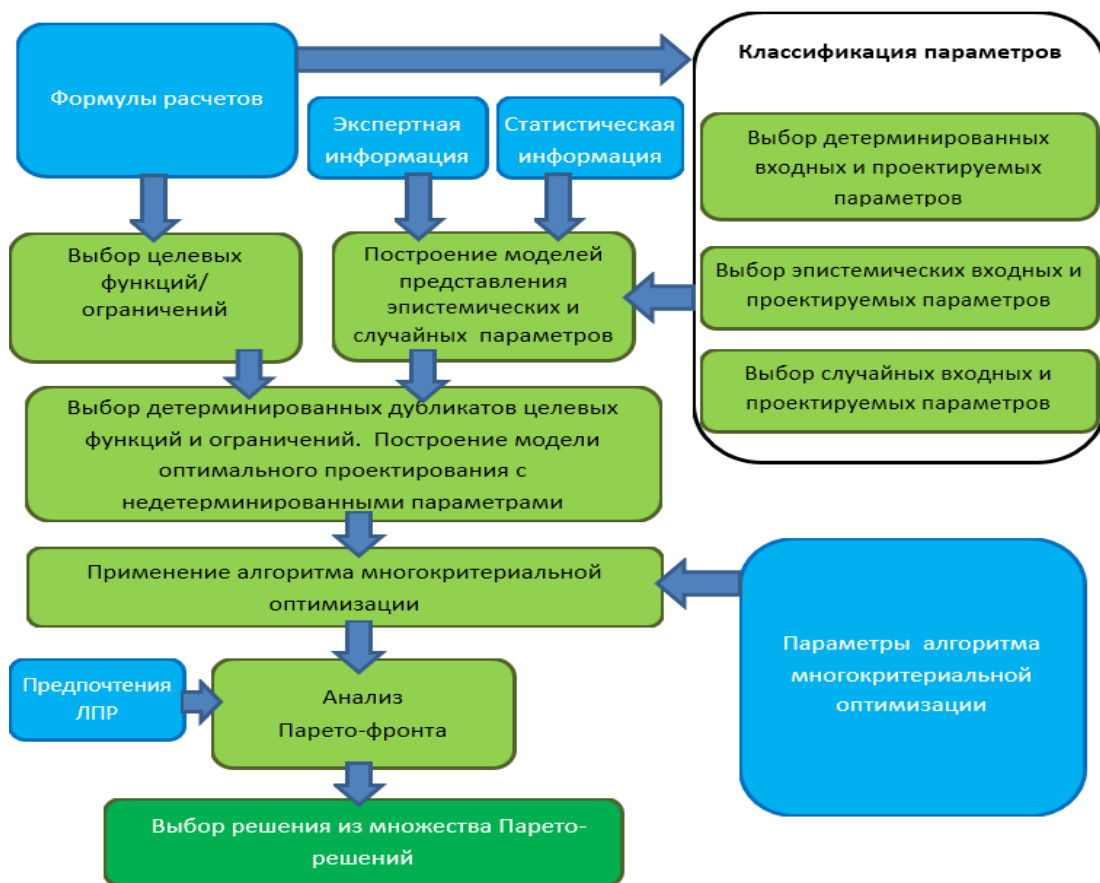


Рис.1. Методика оптимального проектирования технических объектов в условиях параметрической смешанной неопределенности

Опишем модель оптимального проектирования в рамках шанс-теории, предназначенной для моделирования систем со смешанной неопределенностью, где параметры с эпистемической неопределенностью моделируются неопределенными величинами, введенными в теории неопределенности [1]. В шанс-теории вводятся понятия шанс-меры (меры смешанной неопределенности), неопределенно-случайной величины, шанс-распределения, ожидаемого значения неопределенно-случайной величины, неопределенно-случайного программирования. В [1] предложена модель неопределенно-случайного программирования с использованием в качестве детерминированного дубликата ожидаемого значения целевой функции со смешанной неопределенностью, которая является неопределенно-случайной величиной. При моделировании ограничений с использованием шанс-меры выполнение ограничений требуется лишь «в среднем», а именно с гарантированной средней степенью уверенности, и не учитывается риск невыполнения ограничений. Предлагается дубликат ограничений, учитывающий риск невыполнения ограничений.

Пусть \bar{x} – вектор проектируемых параметров, $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$ – независимые случайные величины с функциями распределения $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m$ и $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ – независимые неопределенные величины с функциями распределения Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Тогда целевая функция $f(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ и функция ограничений $g(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ – неопределенно-случайные величины.

Задача неопределенно-случайного программирования имеет вид [1]:

$$\min_x E[f(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_n)], \text{ при условии } Ch\{g(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_n) \leq 0\} \geq \alpha, 0 \leq \alpha \leq 1,$$

где $E[f(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_n)]$ – ожидаемое значение неопределенно-случайной величины $f(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_n)$.

Так как шанс-мера – это математическое ожидание степени уверенности M [1], сформулированное ограничение означает, что $M(g(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \leq 0)$ может быть меньше α , т.е. допустимо выполнение ограничения с меньшей, чем α , степенью уверенности и явно не задается, с какой вероятностью это допустимо. В задачах оптимального управления и проектирования летательных аппаратов недопустим такой неопределенный риск. Предлагается в качестве ограничения использовать дубликат вида:

$$P(M(g(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \leq 0) \geq \alpha) \geq \beta,$$

где α и β задаются проектировщиком. В этом случае требуется, чтобы степень уверенности выполнения ограничения, меньшая α , осуществлялась с вероятностью, не большей $1-\beta$.

Тогда оптимизационная модель с ограничениями в условиях параметрической смешанной неопределенности имеет вид: $\min_x E[f(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_n)]$, при условии: $P(M(g(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \leq 0) \geq \alpha) \geq \beta$.

Используем теорию неопределенности для получения аналитических выражений в предложенной модели оптимизации. Тогда если $f(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \dots, \tau_k, \tau_{k+1}, \dots, \tau_n)$ – непрерывная строго возрастающая функция относительно $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ и строго убывающая функция относительно $\tau_{k+1}, \dots, \tau_n$, и $g(\bar{x}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r, \tau_{r+1}, \dots, \tau_n)$ – непрерывная строго возрастающая функция относительно $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r$ и непрерывная строго убывающая функция относительно $\tau_{r+1}, \dots, \tau_n$, тогда предложенная оптимизационная модель имеет вид:

$$\min_{R^m} (\max) \int_0^1 \int f(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \Phi_1^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_k^{-1}(\alpha), \Phi_{k+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) d\alpha dY_1 \dots dY_m, \text{ при условии}$$

$$P(g(\bar{x}, \eta_1, \dots, \eta_m, \Phi_1^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_r^{-1}(\alpha), \Phi_{r+1}^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) \leq 0) \geq \beta.$$

На основе методики расчета весовой сводки летательного аппарата (ЛА) [2] с использованием предложенной модели формализована и решена задача расчета весовых параметров пассажирского ЛА как двухкритериальная оптимизационная задача с ограничениями в условиях смешанной неопределенности. Построение выражений для расчета целевых функций выполняется на основе шанс-теории, а их вычисление и проверка ограничений – на основе статистического моделирования. В результате оптимизационных расчетов с использованием многокритериального генетического алгоритма получен Парето-фронт, который позволяет ЛПР найти компромисс между взлетной массой и массой топлива с учетом ограничений на посадочную массу ЛА.

Литература

1. Liu B. Uncertainty Theory: A Branch of Mathematics for Modeling Human Uncertainty, Springer-Verlag, Berlin, 2010.
2. Колоколова Л.Г. Метод обобщенных моделей свойств самолета для этапа раннего проектирования // Техника воздушного флота. 1995. № 5-6.