УДК 629.735.3

Брыкалов А.В.

Государственное предприятие «Государственное Киевское конструкторское бюро «Луч». г. Киев, Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПО МНОГИМ КРИТЕРИЯМ ПРИ ВЫБОРЕ ОБЛИКА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье представлен подход к решению многокритериальной задачи параметрической оптимизации при проектировании беспилотного летательного аппарата (БПЛА), приведены локальные критерии оптимизации при выборе проектных параметров БПЛА и его подсистем, сформулирована постановка задачи параметрической оптимизации по многим критериям и приведен алгоритм решения этой задачи.

Ключевые слова: концептуальное проектирование; параметрическая оптимизация; вектор проектных параметров; локальные критерии оптимальности; область Парето.

Введение

Создание конкурентоспособных БПЛА во многом определяется передовой технологией их изготовления, наличием легких и прочных материалов, миниатюризацией электроники и другого бортового оборудования. Однако важнейшим звеном в длиной цепи создания современных БПЛА является проект, особенно его начальный этап. Это объясняется тем, что начальный поиск проектных решений составляет всего несколько процентов от общей стоимости проекта, но влияет на все последующие работы, поскольку каждое изменение проекта в ходе конструирования и изготовления воспринимается с большим трудом.

На начальном этапе проектирования формируется технический облик вновь создаваемого БПЛА, основными задачами здесь являются выбор структуры и определение основных параметров БПЛА.

Данные задачи можно трансформировать в задачи структурной и параметрической оптимизации, поскольку все задачи проектирования многокритериальны по своему существу.

В общем смысле критерии представляют собой группу проектных характеристик БПЛА, к нахождению лучших или предельных значений которых следует стремиться в процессе проектного поиска. При выборе оптимального варианта облика БПЛА критерии служат мерой предпочтения сравниваемых вариантов. Данное определение предполагает в начале проектного поиска формулировку целей проектирования и построение на этой основе критериев соответствия проектного решения этим целям.

К критериям оптимальности БПЛА и его подсистем можно отнести следующие показатели, которые зависят от проектных параметров.

Критериями при выборе аэродинамической схемы служат аэродинамическая несущая способность, аэродинамическое качество, шарнирные моменты, продольное демпфирование, качество поперечной стабилизации и динамические свойства в продольном движении.

Критерием при выборе геометрии фюзеляжа и несущих поверхностей является значение аэродинамического сопротивления при ограничении на поперечную перегрузку и степень статической устойчивости.

Критериями конструкции планера служат масса конструкции, степень модернизации, технологичность изготовления и эксплуатационные свойства.

Критериями при выборе параметров системы управления служат точность управления, помехозащищенность работы и степень автоматизации. В качестве ограничения задаются динамические свойства БПЛА, масса, габариты и стоимость бортовой аппаратуры.

Критериями при выборе параметров исполнительных механизмов и бортовых источников энергии служат продолжительность работы, надежность и безопасность работы, простота устройства. Ограничениями являются величина внешней нагрузки, постоянная времени, масса, габариты и стоимость.

Критериями двигательной установки являются масса, габариты, время работы, расход топлива и технологичность изготовления.

Достижение наилучших значений вышеуказанных критериев с учетом ограничений позволяет сформировать перечень (вектор) оптимальных проектных параметров.

Необходимость создания методологии концептуального проектирования БПЛА, в которой был бы заложен принцип единого научного подхода к способам поиска и обоснованного выбора проектных решений требует внедрения в методики и алгоритмы проектирования эффективных методов и моделей параметрической оптимизации.

Проблема параметрической оптимизации в процессе разработки концептуальных проектов технических объектов исследуется уже длительное время, что отражено в работах [1—7]. Анализ указанных работ показал, что большинство методов параметрической оптимизации направлены на решение однокритериальных задач и их модификаций. Некоторые авторы в своих работах, в частности [8—10], приводят исследования оптимизационных задач на основе обобщенного критерия качества, что подразумевает под этим сведение многокритериальных задач к однокритериальным.

На практике широкое применение получили методы, основанные на сведении векторной задачи оптимизации к скалярной, в частности, метод свертки векторного критерия, метод последовательных уступок, метод минимизируемых уступок и метод оптимизации по доминирующему критерию [11].

Перечисленные выше методы сведения векторной задачи оптимизации к скалярной удобны тем, что методы оптимизации скалярных функционалов хорошо исследованы.

Однако недостаток исходной информации приводит к субъективным действиям при постановке задачи и, как следствие, разбросу значений оптимизируемых параметров.

Субъективность формализации задачи и неоднозначность принимаемых решений, свойственные методам оптимизационных задач в однокритериальной постановке, требуют перехода к методам многокритериальной оптимизации, основанных на стремлении к одновременному учету всех выделенных частных критериев качества.

Постановка задачи

Сформулируем постановку задачи многокритериальной параметрической оптимизации технического облика БПЛА.

Пусть задан вектор проектных параметров БПЛА $X = (X_1, ..., X_n)^T$, который будем считать точкой в n — мерном пространстве, где n — число проектных параметров; T — знак транспонирования.

Имеем вектор-функцию $G(X) = (G_1(X), ..., G_e(X))^T$, описывающую функционирование исследуемого БПЛА, где e — число функций.

Имеем вектор частных критериев $W(X) = (W_1(X), ..., W_k(X))^T$, значения компонентов которого по смыслу целевого назначения БПЛА, предположим, требуется увеличивать, где k — число критериев.

В том случае, если критерии $W_1(X),..., W_k(X)$ противоречивы и среди них имеются такие, величину которых, желательно, уменьшить, то формально их можно представить в виде обратных функций, которые требуется увеличить.

В процессе решения оптимизационной задачи необходимо учесть ограничения:

- параметрические $(X_i)_{\min} \le X_i \le (X_i)_{\max}$ при $i = 1, 2,..., n$, где $(X_i)_{\min}$, $(X_i)_{\max}$ — соответственно нижняя и верхняя границы изменения параметра X_i , которые задаются в начале проектирования;
- функциональные $G_j^* \le G_j(X) \le G_j^{**}$ при $j = 1, 2,..., e$, где G_j^*, G_j^{**} — соответственно нижняя и верхняя границы изменения функции $G_j(X)$, которые также задаются в начале проектирования;
- критериальные $W_t(X) \ge W_t^*$ при $t = 1, 2,..., k$, где W_t^* — наихудшие значения критериев $W_t(X)$, на которое можно согласиться и которое задается в процессе решения оптимизационной задачи после предварительного исследования возможности проектируемого объекта по каждому из критериев $W_1(X),..., W_k(X)$.

Тогда общая постановка задачи векторной оптимизации технического облика БПЛА может быть представлена в виде

$$X^o = \max W(X);$$

$$X \in H \qquad (1)$$

$$(X_i)\min \le X_i \le (X_i)\max;\ G_j^* \le G_j(X) \le G_j^{**};\ W_t(X) \ge W_t^*,$$

где X^o — вектор оптимальных проектных параметров в области H.

Решение многокритериальных задач приводит к некоторым проблемам. Одной из них является противоречивость критериев, связанная с минимизацией одной группы критериев и максимизацией другой. Противоречивость критериев не позволяет произвести точную оптимизацию векторного функционала. Выходом из этой ситуации является поиск формального результата в виде множества Парето и последующего анализа этого множества с целью выбора разумного компромисса, который и будет окончательным результатом. Однако применение такого подхода при проектировании облика БПЛА потребует значительных вычислительных ресурсов.

Множество Парето-оптимальных вариантов облика БПЛА, которое находится в области допустимых решений характеризуется тем свойством, что варианты облика БПЛА, составляющие это множество, нельзя одновременно улучшить по всем оптимизируемым критериям, не ухудшив при этом значения хотя бы одного из них. Очевидно, что искомый оптимальный вариант облика БПЛА должен быть Парето-оптимальным.

Заключительным этапом решения задачи многокритериальной оптимизации является неформальный анализ допустимого и Парето-оптимального множеств и выбор на них наиболее предпочтительного варианта вектора проектных параметров облика БПЛА.

Построение множества допустимых и Парето-оптимальных решений выполняется следующим образом.

Ограничения $(X_i)_{\min} \le X_i \le (X_i)_{\max}$ выделяют в n-мерном пространстве параметров параллелепипед П.

Ограничения $G_j^* \le G_j(X) \le G_j^{**}$ выделяют в параллелепипеде П некоторое подмножество J, в котором находятся варианты вектора X, удовлетворяющие параметрическим и функциональным ограничениям. В предположении, что объем подмножества $J > 0$, то введение ограничений $W_t(X) \ge W_t^*$ позволяет выделить на области J некоторое подмножество H, для которого справедливо соотношение $H \subset J \subset П$. Очевидно, что подмножество H содержит множество не улучшаемых по Парето вариантов проектируемого объекта.

Решением задачи (1) является определение вектора проектных параметров X^o на множестве Парето P ($X^o \in P$), который является наиболее предпочтительным.

Вектор $X^o = (X_1^o, ..., X_m^o)T$, где m — число эффективных по Парето решений, содержит множество равнозначных (в смысле не улучшения критериев) решений.

Единственное решение в области Парето сводится к нахождению экстремума модуля векторного критерия в области Парето.

Задачу определения единственного решения в области Парето X^* можно представить в следующем виде

$$X^* = \arg\max\sqrt{W_1^2(X^o)+W_2^2(X^o)+...+W_k^2(X^o)}. \qquad (2)$$

Смысл задачи (2) состоит в том, чтобы выбрать из множества решений по Парето X^o вариант решения X^*, для которого сумма квадратов частных критериев достигала бы максимума. Если указанная сумма квадратов окажется наибольшей, то и сами критерии будут наибольшими по абсолютной величине.

При невыполнении критериальных ограничений следует потребовать от лица принимающего решения уступок на их предельные значения. Если такие уступки не желательны, то следует вернуться к начальному этапу решения задачи (1), увеличить число компонентов вектора проектных параметров X и выполнить поиск оптимальных вариантов сначала.

Алгоритм решения

Решение оптимизационной задачи (1) может быть найдено с помощью метода, основанного на систематическом просмотре (зондировании) многомерных областей точками последовательности, равномерно распределенной в пространстве параметров [11—13].

Наиболее простой способ генерации пробных точек основан на использовании следующей формулы

$$x_i = (x_i)_{\min} + r_i((x_i)_{\max} - (x_i)_{\min}) \quad \text{при } i = 1,2,...,N, \qquad (3)$$

где x_i — пробная точка; r_i — случайные числа, равномерно распределенные на интервале (0,1); $(x_i)_{\max}$ — верхняя граница точки x_i; $(x_i)_{\min}$ — нижняя граница точки x_i; N — число пробных точек.

Применение случайных чисел с высокой плотностью распределения на заданном интервале позволяет получать сравнительно полную информацию об исследуемом объекте в результате эффективного просмотра пространства параметров и вычисления значений критериев в пробных точках.

Предпочтениями в пользу выбора данного метода являются относительная простота, получение требуемого результата за приемлемое время, минимальные требования к гладкости областей функциональных ограничений и критериев, возможность автоматизации численного алгоритма.

Модель процесса параметрической оптимизации по многим критериям можно представить в виде алгоритма, блок-схема которого изображена на рис. 1.

Согласно представленной блок-схеме, на первом этапе параметрической оптимизации с использованием электронно-вычислительной машины выбирается конечное число N пробных точек x_i, ..., x_N, равномерно расположенных в n — мерной области J. Ограничением на выбор N служит время счета.

Для выбора пробных точек может быть использован генератор случайных чисел, при каждом обращении к которому возвращается случайное число, равномерно распределенное на отрезке (0,1). При этом Декартовы координаты точки x_i, принадлежащей параллелепипеду П, определяются по формуле (3).

Для очередной точки x_i с помощью принятых математических моделей рассчитываются проектные характеристики БПЛА и проверяются функциональные ограничения $G_j^* \le G_j(x_i) \le G_j^{**}$, где ($j$ = 1, 2,..., e). Если для исследуемой точки x_i функциональные ограничения выполняются, то она отбирается в качестве пробной в области J и вычисляются все критерии $W_t(x_i)$ (t = 1, 2, ..., k), в противном случае точка x_i отбрасывается.

По каждому критерию $W_t(x_i)$ составляется таблица испытаний, в которой значения критериев расположены в порядке возрастания

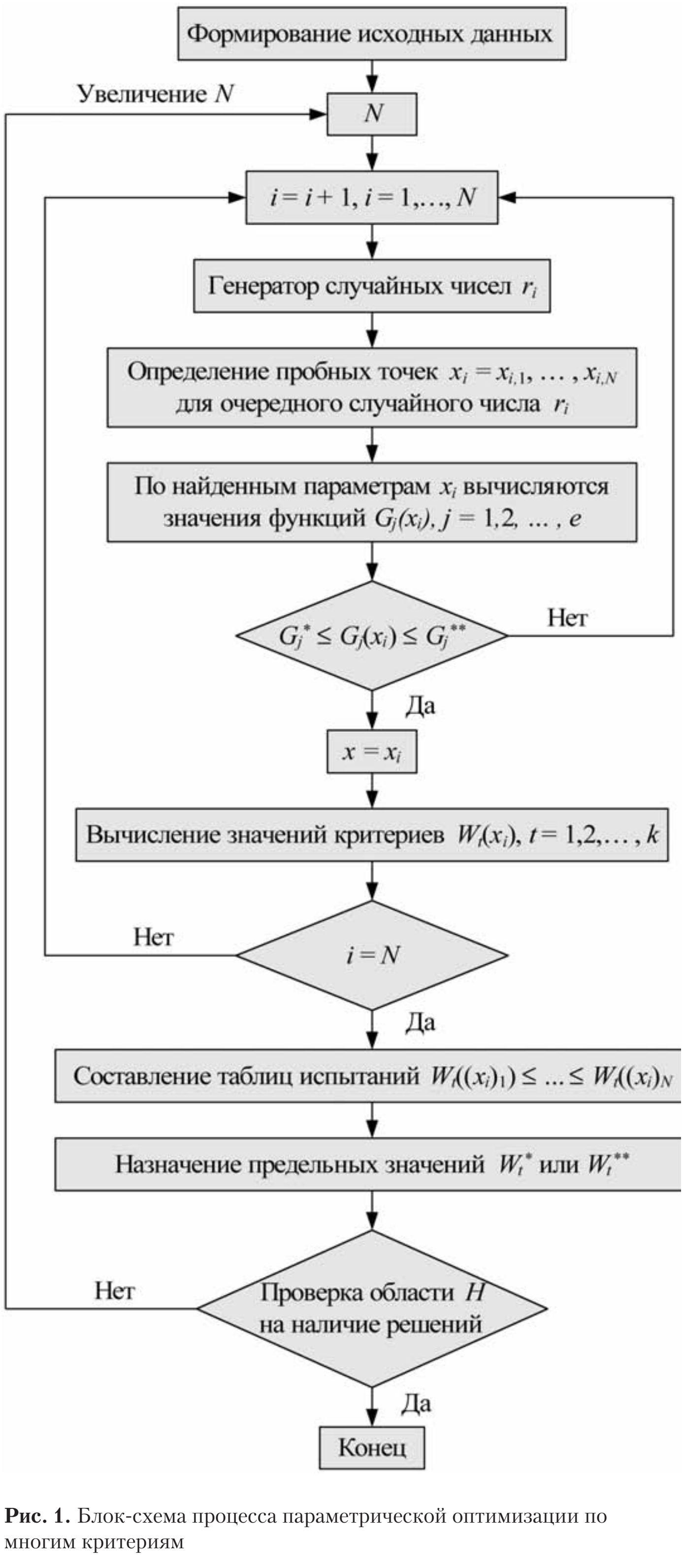

Рис. 1. Блок-схема процесса параметрической оптимизации по многим критериям

$$W_t((x_i)_1) \leq ... \leq W_t((x_i)_N) \,. \qquad (4)$$

На втором этапе проводится неформальный анализ таблиц испытаний с целью изучения возможностей проектируемого БПЛА по каждому критерию и определения возможного диапазона изменения критериев.

В результате анализа таблиц испытаний лицо принимающее решение назначает критериальные ограничения W_t^*.

На третьем этапе осуществляется проверка разрешимости оптимизационной задачи (1). Для этого с помощью электронно-вычислительной машины проводится перебор значений таблиц испытаний с целью выявления точек x_i, для которых справедливы все три типа ограничений (параметрические, функциональные и критериальные).

При существовании таких точек x_i множество допустимых решений H, определяемое указанными типами ограничений, не пусто и задача (1) разрешима. В этом случае для полученного множества Парето оптимальных решений X^o решается задача по определению единственного решения X^* в области Парето (2).

Если среди значений таблиц испытаний (4) искомых точек xi обнаружить не удалось, то следует вернуться на второй этап данного численного алгоритма и сделать послабления на значения критериальных ограничений W_t^*. При этом, если с точки зрения логики выполнения задачи послабления критериальных ограничений осуществить не возможно, то следует вернуться к первому этапу и увеличить число пробных точек N, чтобы повторить расчет с большим числом вариантов точек x_i.

Выводы

1. Показано, что решение большинства задач параметрической оптимизации при формировании облика технических объектов, в том числе и БПЛА, основанное на использовании существующих методов решения однокритериальных задач, приводит к субъективным действиям при постановке задачи и, как следствие, разбросу значений оптимизируемых параметров в связи с неоднозначностью принимаемых решений.

2. Предложена методика параметрической оптимизации облика БПЛА. Сформулирована постановка задачи параметрической оптимизации, как задачи многокритериальной оптимизации и приведен алгоритм ее решения.

3. Предложены способ выбора единственного решения на области Парето и процедура выбора пробных точек просмотра области допустимых решений с использованием генератора случайных чисел.

Литература

[1] Синєглазов В. М. Багатокритеріальність задачі проектування об'єктів одного класу/ В. М. Синєглазов, А. В. Брикалов//Матеріали ІІІ Міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2001».– К.: НАУ, 2001. — Т. 2. — С. 5.16–5.20.

[2] Брусов В. С. Оптимальное проектирование ЛА. Многоцелевой подход / В. С. Брусов, С. К. Баранов — М.: Машиностроение, 1989. — 232 с.

[3] Солнышков Ю. С. Обоснование решений: Методологические вопросы/ Ю. С. Солнышков — М.: Экономика, 1980. — 168 с.

[4] Основы научных исследований / под ред. В. И. Крутова и В. В. Попова. — М.: Высшая школа, 1989. — 400 с.

[5] Вентцель Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель — М.: Наука, 1988. — 208 с.

[6] Растригин Л. А. Поисковые алгоритмы определения множества Парето: Адаптация в вычислительных системах / Л. А. Растригин, Я. Ю .Эйдук — Рига: Зинатне, 1978. — С. 69–76.

[7] Подиновский В. В. О решении многокритериальных задач как задач по одному критерию в условиях неопределенности / В. В. Подиновский // Автоматика и вычислительная техника. — 1976. — № 2. — С. 6–11.

[8] Воронин А. Н. Определение весовых коэффициентов составного критерия качества: Промышленная системология / А. Н. Воронин, Д. И. Палейчук, В. Д. Сябро, В. Н. Черторыжская — К.: Техніка, 1974.

[9] Кожинская Л. И. Роль способа свертывания в векторной оптимизации / Л. И. Кожинская, Л. И. Слуцкий // Автоматика и телемеханика. — 1973. — № 3. — С. 167–170.

[10] Каплинский А. И. Обучение принципу свертывания в задаче векторной оптимизации / А. И. Каплинский, А. С. Красненкер, А. В. Назин // Автоматика и вычислительная техника. — 1978. — №4. — С. 43–47.

[11] Соболь И. М. Наилучшие решения — где их искать / И. М. Соболь, Р. Б. Статников // Математика, кибернетика. — М.: Знание, 1981. — № 1. — 64 с.

[12] Соболь И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями / И. М. Соболь, Р. Б. Статников — М.: Наука, 1981. — 110 с.

[13] Статников Р. Б. Многокритериальное проектирование машин / Р. Б. Статников, И. Б. Матусов // Математика, кибернетика. — М.: Знание, 1989. — № 5. — 47 с.

Brykalov A.V.

"Luch", State-owned Kyiv Design Bureau. Ukraine, Kyiv

SOLUTION OF PARAMETRIC OPTIMIZATION BY MANY CRITERIA CHOOSING A LAYOUT DESIGN OF UNMANNED AIRCRAFT VEHICLE

Article presents an approach to solving multicriteria tasks of parametric optimization designing of unmanned aircraft vehicle, the local criteria are given determining the design parameters of unmanned aircraft vehicle, its subsystems, the task of parametric optimization on many criteria are stated, and an algorithm to solve this task presented.

Keywords: conceptual design; parametric optimization; vector design parameters; local optimality criteria; Pareto area.

References

[1] Sineglazov V. M. Bagatokryterialnist zadachi proektuvanja objektiv odnogo klasu / V. M. Sineglazov, A. V. Brykalov // Materialy III Mignar. nauk.-tehn. Konf. "Avia-2001". — K.: NAU, 2001. — T. 2. — P. 5.16–5.20. (In Ukrainian).

[2] Brusov V. S. Optimalnoe proektirovanie LA. Mnogocelevoj podhod / V. S. Brusov, S. K. Baranov — M.: Mashinostroenie, 1989. — 232 p. (In Russian).

[3] Solnyshkov Ju. S. Obosnovanie reshenij: Metologicheskie voprosy / Ju. S. Solnyshkov — M.: Ekonomika, 1980. — 168 p. (In Russian).

[4] Osnovy nauchnyh issledovanij / pod redakciej V. I. Krutova i V. V. Popova. — M.: Vysshaja shkola, 1989. — 400 p. (In Russian).

[5] Ventcel E.S. Issledovanie operacij / E.S. Ventcel — M.: Nauka, 1988. — 208 p. (In Russian).

[6] Rastrygin L. A. Poiskovye algoritmy opredelenija mnogestva Pareto: Adaptacija v vychislitelnyh sistemah / L. A. Rastrygin, Ja. Ju. Ejduk — Riga: Zinatne, 1978. — P. 69–76. (In Russian).

[7] Podinovskij V. V. O reshenii mnogokriterialnyh zadach kak zadach po odnomu kriteriju v uslovijah neopredeljonnosti / V. V. Podinovskij // Avtomatika i vychislitelnaja tehnika. — 1976. — № 2. — P. 6–11. (In Russian).

[8] Voronin A. N. Opredelenije vesovyh koefficientov sostavnogo kriterija kachestva: Promyshlennaja sistemologiya / A. N. Voronin, D. I. Palejchuk, V. D. Sjabro, V. N. Chertorygskaja — K.: Tehnika, 1974. (In Russian).

[9] Koginskaja L. I. Rol sposoba svertyvanija v vektornoj optimizacii / L. I. Koginskaja, L. I. Sluckij // Avtomatika i telemehanika. — 1973. — № 3. — P. 167–170. (In Russian).

[10] Kaplinskij A. I. Obuchenie principu svertyvanija v zadache vektornoj optimizacii // A. I. Kaplinskij, A. S. Krasnenker, A. V. Nazin // Avtomatika i vychislitelnaja tehnika. — 1978. — № 4. — P. 43–47. (In Russian).

[11] Sobol I. M. Nailuchshie reshenija – gde ih iskat / I. M. Sobol, R. B. Statnikov // Matematika, kibernetika. — M.: Znanie, 1981. — № 1. — 64 p. (In Russian).

[12] Sobol I. M. Vybor optimalnyh parametrov v zadachah s mnogimi kriterijami / I. M. Sobol, R. B. Statnikov. — M.: Nauka, 1981. — 110 p. (In Russian).

[13] Statnikov R. B. Mnogokriterialnoe proektirovanie mashin / R. B. Statnikov, I. B. Matusov // Matematika, kibernetika. — M.: Znanie, 1989. — № 5. — 47 p. (In Russian).