УДК 627.7.025.1 DOI: 10.18698/0536–1044–2015–11–114–122

Применение метода анализа иерархий при определении весовых коэффициентов целевой функции оптимизации крыла из гибридного композиционного материала для многоразового космического аппарата

А.В. Пилюгина, Т.Г. Агеева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Analytic Hierarchy Process for Weight Coefficient Definition of Performance Function for Optimization of Hybrid Composite Wing for Reusable Space Vehicle

A.V. Pilyugina, T.G. Ageyeva

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: pilyuginaanna@bmstu.ru, tageeva888@gmail.com

Задача оптимизации конструкций из композиционных материалов в большинстве случаев является многокритериальной. Параметры ее целевой функции зачастую «конфликтуют» между собой. Один из способов решения таких задач — это приведение их к однокритериальной задаче посредством формирования единой целевой функции, включающей все оптимизируемые параметры. Сложность составления целевой функции на начальном этапе проектирования заключается в том, что связанные обратной зависимостью параметры могут отличаться порядком и, кроме того, иметь различную значимость (вес). Решить эту проблему можно путем нормирования параметров, входящих в функцию, а также определения значимости каждого из них с помощью введения весовых коэффициентов, значения которых могут быть получены с учетом экспертных мнений. В работе определены весовые коэффициенты целевой функции для оптимизации крыла из гибридного композиционного материала для многоразового космического аппарата туристического класса одним из традиционных методов теории принятия решений — методом анализа иерархий.

Ключевые слова: многоразовый космический аппарат, гибридные композиционные материалы, крыло, многокритериальная оптимизация, метод анализа иерархий.

In most cases, the optimization problem for composite material constructions involves considering multiple criteria, and the performance function parameters often conflict with each other. One of the solutions in such cases is the reduction of the multi-criteria problem to a single-criterion problem through generating one performance function that includes all the objective variables. The problem of generating a performance function at the initial design stage lies in the fact that the inversely related parameters may differ in order and furthermore, may have different importance (weighting). This problem can be solved by normalizing the parameters contained in the function, and determining the importance of each parameter by introducing weight coefficients. The weight coefficient values can be defined through expert evaluations. In this paper the authors determine weight coefficients for the performance func-

tion for optimization of a hybrid composite wing for a reusable tourist class space vehicle with the help analytic hierarchy process, one of the traditional methods in decision theory.

Keywords: reusable space vehicle, hybrid composite materials, wing, multi-criteria optimization, analytic hierarchy process.

Для конструкций из композиционных материалов (КМ) в силу ряда причин: высокой стоимости сырьевых компонентов и высокого уровня издержек в процессе производства, а также в результате зависимости характеристик конечного изделия не только от свойств сырьевых материалов, но и от выбранной структуры КМ (количество и соотношение слоев, углы укладки армирующего наполнителя и т. д.), проблема оптимизации стоит особенно остро. Задача оптимизации конструкций из КМ в большинстве случаев является многокритериальной, зависящей от двух и более «конфликтующих» между собой параметров [1–4]. Примером может служить крыло из гибридного композиционного материала (ГКМ) для многоразового космического аппарата туристического класса (МКА ТК) [5, 6]. К оптимизируемым параметрам крыла относятся масса изделия, производственные издержки (далее в работе — «стоимость») и прогиб конструкции [7], которые являются взаимозависимыми и обусловлены выбранным составом и структурой ГКМ.

Для решения задачи оптимизации крыла из ГКМ для МКА ТК помимо математической модели и оптимизационного алгоритма необходима целевая функция, которая взаимоувязывает перечисленные параметры, формализует требования, предъявляемые к объекту, и, по сути, сводит задачу многокритериальной оптимизации к однокритериальной. Описанная целевая функция включает в себя три локальных критерия — массу, стоимость и прогиб конструкции, которые не только «конфликтуют» между собой (критерии массы и стоимости должны быть минимизированы, однако они связаны обратной зависимостью, поэтому при снижении значения одного из них значение второго, напротив, увеличивается), но и имеют различные единицы измерений и, соответственно, различный порядок значений. Кроме того, каждый локальный критерий, входящий в функцию, обладает разным весом, который зависит от цели и назначения проектируемой конструкции. Поэтому для достижения оптимума при составлении целевой функции необходимо, во-первых, провести нормализацию локальных критериев и, во-вторых, определить весовые коэффициенты для каждого критерия.

Нормализация критериев осуществляется путем следующего преобразования [8, 9]:

$$\left(\frac{f_{i\max} - f_i(x)}{f_{i\max} - f_{i\min}}\right)^m,$$

где $f_{i\max}$, $f_{i\min}$ — максимальное и минимальное значения i-го критерия f; $f_i(x)$ — текущее значение критерия; m — степень ($m = 1, 2, \ldots$).

В данной работе для приведения многокритериальной оптимизации к однокритериальной предлагается использовать целевую функцию G в следующем виде [10]:

$$G = k_1\left(\frac{W_{i\max} - W_i}{W_{i\max} - W_{i\min}}\right)^3 + k_2\left(\frac{M_{i\max} - M_i}{M_{i\max} - M_{i\min}}\right)^3 + k_3\left(\frac{C_{i\max} - C_i}{C_{i\max} - C_{i\min}}\right)^3, \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 — весовые коэффициенты; W, M, C — прогиб, масса и стоимость крыла.

Весовые коэффициенты могут быть определены на основании экспертного заключения, полученного в ходе опроса специалистов. Для сбора, обобщения и анализа информации, полученной от экспертов, особенно эффективно применение специальных математических методов — методов экспертных оценок. Чтобы повысить обоснованность выбора оптимальной структуры крыла из ГКМ для МКА ТК, наиболее предпочтительно использовать один из методов, разработанных в теории принятия решений, — метод анализа иерархий [11]. Зачастую количественная оценка важности какого-либо фактора, данная экспертом, носит субъективный характер, в то время как метод анализа иерархий предполагает качественную оценку, основанную на попарном сравнении исследуемых факторов, что определяет высокую степень достоверности полученных оценок. К преимуществам метода анализа иерархий также относятся его четкая математическая аргументация и относительная простота вычислительных алгоритмов. Универсальность метода обусловливает его применение не только для решения задач экономики, управления и бизнеса, но и

для решения широкого круга инженерных задач [12].

Указанный метод заключается в построении многоуровневой иерархической структуры посредством декомпозиции задачи на простые составляющие: в вершине иерархии должна быть расположена цель, на втором уровне — критерии, которые могут влиять на достижение цели, на третьем — возможные альтернативы, или исходы, и т. д. Затем следует попарное сравнение экспертом отдельных элементов, находящихся на одном уровне иерархии, и обработка мнений эксперта с помощью алгоритма, предложенного Томасом Саати [11], в результате чего определяется относительная значимость исследуемых альтернатив для всех критериев, находящихся в иерархии. Численным выражением относительной значимости является вектор приоритетов.

Алгоритм метода анализа иерархий в общем случае включает в себя следующие шаги [13].

1. *Построение иерархии посредством декомпозиции задачи на отдельные составляющие и установление функциональных отношений между ними*. Разбиение задачи начинается с определения цели исследования и факторов (критериев), которые в той или иной степени влияют на достижение цели. Все критерии объединяют в функциональные группы, расположенные на различных уровнях иерархии. Пример графического представления иерархической структуры приведен на рис. 1.

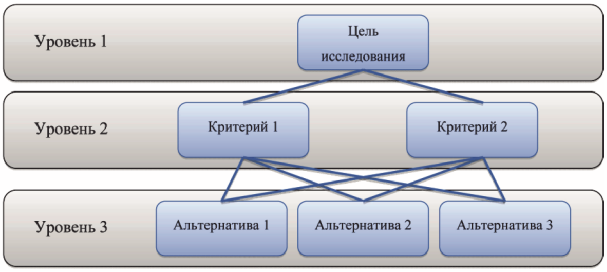


Рис. 1. Пример построения иерархической структуры

2. Введение шкалы парных сравнений критериев (табл. 1). Обоснование выбора шкалы парных сравнений для установления приоритетов каждого критерия приведено в работе [11].

Используя приведенную в табл. 1 девятибалльную шкалу, эксперт сравнивает два фактора по их влиянию на критерий, расположенный на вышестоящем уровне иерархии. Полученные значения заносят в специальную матрицу, называемую матрицей попарных сравнений.

3. Вычисление главного собственного вектора для каждой матрицы. После нормализации

Таблица 1

Шкала парных сравнений критериев

Степень важности	Определение	Толкование
1	Идентичная значимость критериев	Два фактора вносят одинаковый вклад в достижение цели
3	Некоторое преобладание значимости одного критерия перед другим (умеренное превосходство)	Опыт и суждение дают легкое предпочтение одному фактору перед другим
5	Существенная или сильная значимость критерия (сильное превосходство одного критерия над другим)	Опыт и суждение дают сильное предпочтение одному фактору перед другим
7	Очень сильное превосходство одного критерия над другим	Убедительное свидетельство в пользу одного действия (альтернативы) перед другим
9	Абсолютное превосходство одного критерия над другим	Свидетельство в пользу предпочтения одного фактора другому в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение

Примечание. Если критерию *i* при сравнении с критерием *j* приписывается одна из приведенных в таблице степеней важности, то критерию *j* при сравнении с критерием *i* приписывается обратное значение.

он становится вектором приоритетов. Методика определения вектора приоритетов приведена в работе [11]. Главный собственный вектор матрицы служит критерием степени согласованности полученных от экспертов суждений: чем ближе значение главного собственного вектора к размерности матрицы, тем большей степенью согласованности она обладает.

Отклонение от согласованности выражается величиной, которая называется индексом согласованности (ИС) и определяется соотношением

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1},$$

где $\lambda_{\max}$ — максимальное собственное значение матрицы; n — размерность матрицы.

Согласованность суждений для каждой конкретной задачи оценивают путем сравнения ИС и случайного индекса согласованности (СИ), который представляет собой ИС, сгенерированный случайным образом по шкале от 1 до 9 [11, 12].

Отношение ИС к среднему значению СИ называется отношением согласованности (ОС):

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{СИ}}.$$

Отношение согласованности считается приемлемым, если оно лежит в пределах 0…10 % включительно [11–13].

4. Осуществление иерархического синтеза. Он заключается в перемножении матрицы локальных приоритетов на вектор-столбец приоритетов критерия вышестоящего уровня. Описанную процедуру продолжают до самого нижнего уровня. В заключение для всей иерархии вычисляют значения ИС и ОС.

Применим описанную методику к определению весовых коэффициентов целевой функции для оптимизации крыла из ГКМ для МКА ТК (формула (1)). При проведении исследования была сформирована команда экспертов, цель которой заключалась в оценке значимости каждого из критериев исследуемого объекта, входящих в целевую функцию, по шкале, приведенной в табл. 1. Крыло МКА ТК должно удовлетворять следующим критериям: надежность, весовое совершенство и экономическая эффективность конструкции.

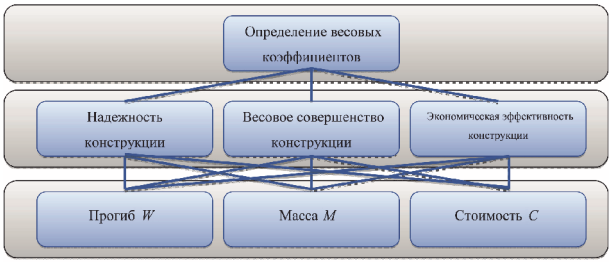


Рис. 2. Иерархическая структура определения весовых коэффициентов целевой функции

В соответствии с поставленной целью исследования была сформирована трехуровневая иерархическая структура (рис. 2).

Затем были определены приоритеты первичных критериев относительно их воздействия на общую цель. Для сравнения относительной важности критериев второго уровня была разработана форма, в которой сравниваемые критерии записаны по горизонтали и вертикали (табл. 2). Для приведенной в таблице матрицы были определены максимальное собственное значение $\lambda_{\max}$ матрицы, индекс согласованности и отношение согласованности. Значение отношения согласованности составило менее 10 %, поэтому матрица оценок (см. табл. 2) считается согласованной. В этой же таблице приведен вектор приоритетов критериев второго уровня.

Таблица 2

Матрица оценок важности критериев второго уровня относительно общей цели и вектор приоритетов

Критерий	Надежность конструкции	Весовое совершенство конструкции	Экономическая эффективность конструкции	Вектор приоритетов
Надежность конструкции	1	3/1	7/1	**0,6**
Весовое совершенство конструкции	1/3	1	5/1	**0,3**
Экономическая эффективность конструкции	1/7	1/5	`1	**0,1**
$\lambda_{\max}$ = 3,10; ИС = 0,05; ОС = 0,086				

Далее были построены матрицы парных сравнений элементов третьего уровня относительно каждого из критериев второго уровня. Для каждой матрицы оценок относительной важности были определены вектор приоритетов, максимальное собственное значение, ИС и ОС (табл. 3–5).

В табл. 6 приведены локальные приоритеты критериев третьего уровня относительно критериев второго уровня, а также результат иерархического синтеза — искомые весовые коэффициенты, полученные путем перемножения матрицы локальных приоритетов третьего уровня на вектор приоритетов второго уровня.

Таким образом были определены весовые коэффициенты целевой функции для многокритериальной оптимизации крыла из ГКМ для МКА ТК, в результате чего целевая функция

Таблица 3

Матрица оценок важности критериев третьего уровня относительно критерия «надежность конструкции» и вектор приоритетов

Критерий	Прогиб *W*	Масса *M*	Стоимость *C*	Вектор приоритетов
Прогиб *W*	1	7	9	**0,7**
Масса *M*	1/7	1	3	**0,2**
Стоимость *C*	1/9	1/3	1	**0,1**
λ_{max} = 3,117; ИС = 0,058; ОС = 0,1				

Таблица 4

Матрица оценок важности критериев третьего уровня относительно критерия «весовое совершенство конструкции» и вектор приоритетов

Критерий	Прогиб *W*	Масса *M*	Стоимость *C*	Вектор приоритетов
Прогиб *W*	1	1/5	3	**0,2**
Масса *M*	5	1	7	**0,7**
Стоимость *C*	1/3	1/7	1	**0,1**
λ_{max} = 3,093; ИС = 0,0465; ОС = 0,08				

Таблица 5

Матрица оценок важности критериев третьего уровня относительно критерия «экономическая эффективность конструкции» и вектор приоритетов

Критерий	Прогиб *W*	Масса *M*	Стоимость *C*	Вектор приоритетов
Прогиб *W*	1	1/5	1/7	**0,1**
Масса *M*	5	1	1/3	**0,3**
Стоимость *C*	7	3	1	**0,6**
λ_{max} = 3,10; ИС = 0,05; ОС = 0,086				

Таблица 6

Локальные приоритеты критериев третьего уровня относительно критериев второго уровня

Критерий	Надежность конструкции	Весовое совершенство конструкции	Экономическая эффективность конструкции	Весовой коэффициент
Прогиб *W*	0,75	0,22	0,07	0,5
Масса *M*	0,18	0,70	0,34	0,4
Стоимость *C*	0,07	0,08	0,59	0,1

приняла следующий вид:

$$G = 0,5\left(\frac{W_{i\max} - W_i}{W_{i\max} - W_{i\min}}\right)^3 + 0,4\left(\frac{M_{i\max} - M_i}{M_{i\max} - M_{i\min}}\right)^3 + 0,1\left(\frac{C_{i\max} - C_i}{C_{i\max} - C_{i\min}}\right)^3.$$

Для проверки значений весовых коэффициентов, полученных методом анализа иерархий, был проведен расчет, в рамках которого рассматривалась модель крыла с обшивкой из ГКМ [6], состоящей из шести монослоев стекло- и углепластика (СП и УП). Весовые коэффициенты были проварьированы в диапазоне 0,1…0,8 с шагом 0,1 при соблюдении условия

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1.$$

Каждой уникальной комбинации (набору) весовых коэффициентов присвоено буквенное обозначение (*A*, *B*, *C*, …), общее число таких комбинаций составило 36. Различные наборы весовых коэффициентов выборочно приведены в табл. 7.

Затем определены значения целевой функции для всех полученных комбинаций весовых коэффициентов и построено семейство кривых (графиков) целевой функции (для удобства каждая кривая обозначена латинской буквой, соответствующей определенному набору весовых коэффициентов). На рис. 3 выборочно приведены полученные графики. Кривые, имеющие обозначения *A* и *N*, являются крайними, ограничивающими области расположения семейства графиков.

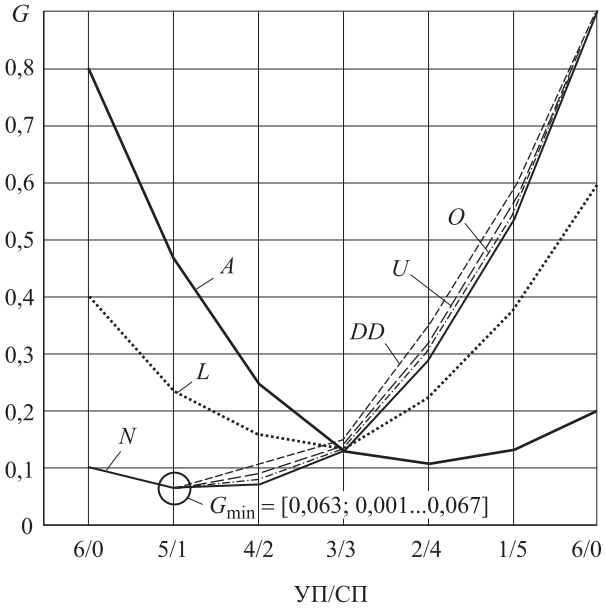


Рис. 3. Семейство кривых целевой функции при различных комбинациях весовых коэффициентов

Абсолютный минимум целевой функции (см. табл. 7 и рис. 3) равен 0,063 и достигается при значениях весовых коэффициентов $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,8$; $k_3 = 0,1$ (кривая *N*). Однако вблизи абсолютного минимума расположены еще четыре точки, доставляемые кривыми *O*, *U*, *Z* и *DD*, со значениями $G = 0,064$; 0,065; 0,066 и 0,067 соответственно (см. табл. 8). Разброс значений ми-

Таблица 7

Выборочные комбинации значений весовых коэффициентов и соответствующие значения минимума целевой функции

Обозначение комбинаций весовых коэффициентов	Значения весовых коэффициентов			Значение минимума целевой функции
	k_1	k_2	k_3	
A	0,1	0,1	0,8	0,104
B	0,1	0,2	0,7	0,129
C	0,1	0,3	0,6	0,129
D	0,1	0,4	0,5	0,129
…	…	…	…	…
L	0,2	0,4	0,4	0,134
N	**0,1**	**0,8**	**0,1**	**0,063**
O	0,2	0,7	0,1	0,064
U	0,3	0,6	0,1	0,065
Z	0,4	0,5	0,1	0,066
DD	0,5	0,4	0,1	0,067

нимумов целевой функции при перечисленных наборах весовых коэффициентов относительно абсолютного минимума составляет не более 6 %, что лежит в пределах погрешности, поэтому можно говорить о существовании нескольких целевых функций с весовыми коэффициентами, соответствующими комбинациям *N*, *O*, *U*, *Z* и *DD*, которые способны обеспечить достижение минимума целевой функции.

Наборы весовых коэффициентов *N*, *O*, *U*, *Z* и *DD*, при которых целевая функция достигает своего минимума, свидетельствуют о том, что вес параметра стоимости не должен превышать 10 %, а оставшиеся 90 % могут быть распределены между прогибом и массой конструкции в следующих процентных соотношениях: 20/70; 30/60; 40/50 и 50/40 (см. табл. 7). Результат оптимизации при этом слабо зависит от выбранной комбинации. Необходимо отметить, что весовые коэффициенты, определенные методом анализа иерархий ($k_1 = 0{,}5$; $k_2 = 0{,}4$; $k_3 = 0{,}1$), соответствуют варианту комбинации весовых коэффициентов *DD*, что подтверждает достоверность полученных экспертных оценок.

Выводы

1. Впервые применен алгоритм метода анализа иерархий для определения весов критериев, входящих в целевую функцию задачи оптимизации крыла из ГКМ, на начальной стадии проектирования.

2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вес параметра стоимости в составе целевой функции не должен превышать 10 %, а веса таких параметров, как прогиб и масса конструкции, должны быть в сумме равны 90 %, при этом распределены они могут быть в следующих процентных соотношениях: 20/70; 30/60; 40/50 и 50/40. При выборе указанных соотношений весов результат оптимизации будет фактически одинаков, а погрешность составит не более 6 %.

3. Весовые коэффициенты, полученные методом анализа иерархий (50 % для прогиба, 40 % для массы и 10 % для стоимости), хорошо согласуются с результатами проведенного оптимального проектирования модели крыла из ГКМ для МКА ТК. Различие между результатом, полученным методом опроса экспертов, и точным решением составляет 6 %.

4. Предложенная модель определения весов параметров проектирования может быть расширена для учета издержек на всей стадии жизненного цикла изделия, включая стоимость обслуживания и эксплуатации.

5. Метод анализа иерархий подразумевает качественную оценку эксперта (которая преобразуется в количественную с использованием описанного в работе алгоритма), что минимизирует риск получения субъективного мнения при опросе и повышает степень достоверности полученных результатов.

Литература

[1] Баничук Н.В., Кобелев В.В., Рикардс Р.Б. *Оптимизация элементов конструкций из композиционных материалов.* Москва, Машиностроение, 1988. 224 с.

[2] Гаврюшин С.С., Евгенев Г.Б. Многокритериальная оптимизация в жизненном цикле изделий. *Информационные технологии*, 2014, № 2, с. 37–42.

[3] Statnikov R.B., Gavriushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.

[4] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.

[5] Агеева Т.Г., Резник С.В. Сравнительный анализ конструктивно-технологического совершенства многоразовых космических аппаратов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск «Актуальные проблемы развития ракетно-космической техники и систем вооружения», посвященный 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2010, с. 19–34.

[6] Резник С.В., Просунцов П.В., Агеева Т.Г. Оптимальное проектирование крыла суборбитального многоразового космического аппарата из гибридного полимерного композиционного материала. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2013, № 1(17), с. 38–43.

[7] Васильев В.В., Добряков А.А., Дудченко А.А. *Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов.* Москва, МАИ, 1985. 218 с.

[8] Чегодаев А.И. Математические методы анализа экспертных оценок. *Вестник Самарского государственного экономического университета*, 2010, № 2(64), с. 130–135.
[9] Орлов А.И. *Организационно-экономическое моделирование. В 3 ч. Ч. 2.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 486 с.
[10] Штойер Р. *Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения*. Москва, Радио и связь, 1992. 504 с.
[11] Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий.* Москва, Радио и связь, 1993. 278 с.
[12] Evangelos Triantaphyllou, Stuart H.M. Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 1995, vol. 2, no. 1, pp. 35–44.
[13] Омельченко И.Н., Пилюгина А.В., Иванов А.Г. *Принятие решений о выборе рациональной структуры капитала предприятия на основе метода анализа иерархий*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 20 с.

References

[1] Banichuk N.V., Kobelev V.V., Rikards R.B. *Optimizatsiia elementov konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Optimization of structural elements made of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988. 224 p.
[2] Gavriushin S.S., Evgenev G.B. Mnogokriterial'naia optimizatsiia v zhiznennom tsikle izdelii [Multicriteria Optimization in the Life Cycle of Products]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2014, no. 2, pp. 37–42.
[3] Statnikov R.B., Gavriushin S.S., Dang M.H., Statnikov A.R. Multicriteria Design of Composite Pressure Vessels. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 252–278.
[4] Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennye prirodoi* [Modern algorithms of search engine optimization. Algorithms inspired by nature]. Moscow, Bauman Press, 2014. 446 p.
[5] Reznik S.V., Ageeva T.G. Sravnitel'nyi analiz konstruktivno-tekhnologicheskogo sovershenstva mnogorazovykh kosmicheskikh apparatov [Comparative analysis of the structural and technological excellence reusable spacecraft]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spets. vypusk «Aktual'nye problemy razvitiia raketno-kosmicheskoi tekhniki i sistem vooruzheniia» posviashchennyi 180-letiiu MGTU im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering. Special issue «Actual problems of development of rocket and space technology and weapons systems» dedicated to the 180th anniversary of the BMSTU]. 2010, pp. 19–34.
[6] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Ageeva T.G. Optimal'noe proektirovanie kryla suborbital'nogo mnogorazovogo kosmicheskogo apparata iz gibridnogo polimernogo kompozitsionnogo materiala [Optimal design of the suborbital reusable spacecraft wing made of polymer composite]. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Bulletin NPO named after S.A. Lavochkin]. 2013, no. 1(17), pp. 38–43.
[7] Vasil'ev V.V., Dobriakov A.A., Dudchenko A.A. *Osnovy proektirovaniia i izgotovleniia konstruktsii letatel'nykh apparatov iz kompozitsionnykh materialov* [Fundamentals of design and manufacture of aircraft structures made of composite materials]. Moscow, MAI publ., 1985. 218 p.
[8] Chegodaev A.I. Matematicheskie metody analiza ekspertnykh otsenok [Mathematical Methods of Expert Estimation Analysis]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Vestnik of Samara State University of Economics]. 2010, no. 2(64), pp. 130–135.
[9] Orlov A.I. *Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie. V 3 ch. Ch. 2* [Organizational-economic modeling. In 3 pt. Pt. 2]. Moscow, Bauman Press, 2009. 486 p.
[10] Shtoier R. *Mnogokriterial'naia optimizatsiia. Teoriia, vychisleniia i prilozheniia* [Multicriteria optimization. The theory, computation and applications]. Moscow, Radio i sviaz' publ., 1992. 504 p.

[11] Saati T. *Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Making decisions. Analytic hierarchy]. Moscow, Radio i sviaz' publ., 1993. 278 p.
[12] Triantaphyllou E., Mann S.H. Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 1995, vol. 2, no. 1, pp. 35–44.
[13] Omel'chenko I.N., Piliugina A.V., Ivanov A.G. *Priniatie reshenii o vybore ratsional'noi struktury kapitala predpriiatiia na osnove metoda analiza ierarkhii* [Making decisions about the choice of a rational capital structure of the enterprise, based on the analytic hierarchy process]. Moscow, Bauman Press, 2011. 20 p.

Статья поступила в редакцию 15.10.2015

Информация об авторах

ПИЛЮГИНА Анна Валерьевна (Москва) — кандидат экономических наук, доцент кафедры «Инновационное предпринимательство». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: pilyuginaanna@bmstu.ru).

АГЕЕВА Татьяна Геннадьевна (Москва) — аспирантка кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tageeva888@gmail.com).

Information about the authors

PILYUGINA Anna Valerievna (Moscow) — Candidate of Science (Economics), Associate Professor, Department of Innovative Entrepreneurship. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: pilyuginaanna@bmstu.ru).

AGEYEVA Tatiana Gennadievna (Moscow) — Post Graduate, Department of Rocket and Airspace Composite Constructions. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tageeva888@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие
под редакцией **Д.А. Ягодникова**

«Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок»

Изложены основы теории, расчета и проектирования агрегатов регулирования жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и ЖРДУ в целом. Рассмотрены основные характеристики ЖРДУ, даны примеры определения статических и динамических режимов работы двигательной установки. Описаны схемы и элементы конструкции агрегатов регулирования ЖРДУ. Приведена конструкторская оценка динамической устойчивости систем регулирования. На примере реальных схем ЖРДУ рассмотрено практическое применение агрегатов регулирования.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов. Может быть полезно также инженерам, работающим в области теории регулирования ЖРД.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru