

УДК 621.4, 629.7

## **Методы анализа конструктивно-технологических решений в авиационном газотурбостроении**

Артёмов А.В., Завалишин И.В., Чернецов В.И.

### **Аннотация:**

В статье приводится обоснование необходимости анализа конструктивно-технологических решений в процессе технической подготовки производства деталей ГТД. Авторами предложена методика анализа, обеспечивающая выполнение оценки и сравнения конструктивно-технологических решений с учетом многовариантности этих решений.

### **Ключевые слова:**

конструктивно-технологические решения; газотурбостроение; методика оценки.

Для обеспечения и поддержания высокого уровня конкурентоспособности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) на рынке, необходимо осуществлять их динамичную модернизацию и создавать новые конструкции с заданными технико-экономическими показателями. Наиболее трудоемким и продолжительным этапом создания ГТД является техническая подготовка производства, при которой процессы конструкторской и технологической подготовки, зависящие от эффективности проектирования, традиционно выполняются раздельно и последовательно.

Перспективным путем повышения эффективности и качества проектирования является применение интегрированных автоматизированных систем конструирования и технологического проектирования [1]. Для накопления и использования отработанных в производстве решений создана единая форма представления и хранения проверенной конструктивно-технологической информации, учитывающей современные возможности вычислительной техники и требования к адекватности проектируемых технологических процессов. Поскольку процессы технической подготовки производства деталей ГТД являются итерационными и многовариантными, необходимо разработать методику анализа, обеспечивающую выполнение оценки вариантов конструктивно-технологических решений.

При формировании конструктивно-технологического решения важное место занимает постановка задачи.

При технологическом проектировании поставить задачу означает:

1. Определить объект, его начальное (до применения технологического процесса) и конечное (после применения технологического процесса) состояния.
2. Определить критерии и сформировать объединяющий их функционал или определить приоритетность критериев.
3. Определить граничные условия изменения всех ресурсов системы и предельные значения.
4. Определить векторы управляемых и неуправляемых параметров и зависимости между ними, критериями и граничными условиями.
5. Определить систему переменных, оптимальные значения которых требуется найти в процессе решения задачи.

Если задача не представлена в соответствии с перечисленными требованиями, но нет логических противоречий, тогда возможна не строгая постановка задачи.

В том случае, когда при постановке задачи имеют место логические противоречия - некорректная постановка задачи.

Для постановки задач функционально-стоимостного анализа конструктивно-технологических решений деталей турбины авиационных двигателей детально анализируются этапы подготовки производства и изготовления. Подготовка производства в соответствии с подходами к моделированию производственной системы подразделяется на следующие этапы: группирование изделий и элементов конструкции, отработка технологичности, проектирование технологических процессов, проектирование и изготовление технологического оснащения (оборудования, инструмента, приспособлений), проектирование и создание технологических систем и управление производством на основе моделирования материальных и информационных потоков [2].

В связи с тем, что повторяемость решений при технической подготовке производства деталей турбин достигает 85%, было предложено укрупнение элемента технологической структуры детали ТВД до уровня группы поверхностей, формируемой одним технологическим оператором.

На основе имитационной модели производственной системы и соответствующих банков данных, содержащих информацию о различных состояниях объектов и технологической системы, формируются также промежуточные состояния с соответствующими технологическими операторами. Форма описания начальных ( $F_H, N_H$ ) и

конечных ( $F_K, N_K$ ) состояний объекта, а также технологических операторов, состоящих из действий и оснащения, – типовая. Технологический оператор  $\tau_i$  связан с группой начальных ( $F_N, N_N$ ) и конечных ( $F_K, N_K$ ) состояний детали, записанных в единой форме в базе данных. При этом элементы технологического оператора  $\tau_i \cup \pi_i$  (действия и оснащение) образуют начальные и конечные состояния технологической системы при переводе изделия из одного состояния в другое (рис. 1). В том случае, если топология процесса допускает параллельное осуществление нескольких процедур (изготовление керамических стержней и пресс-формы), в описании этих процессов с помощью векторов конструктивно-технологических решений появятся разветвления. Итерации в описании технологического процесса также возможно моделировать предложенными средствами.

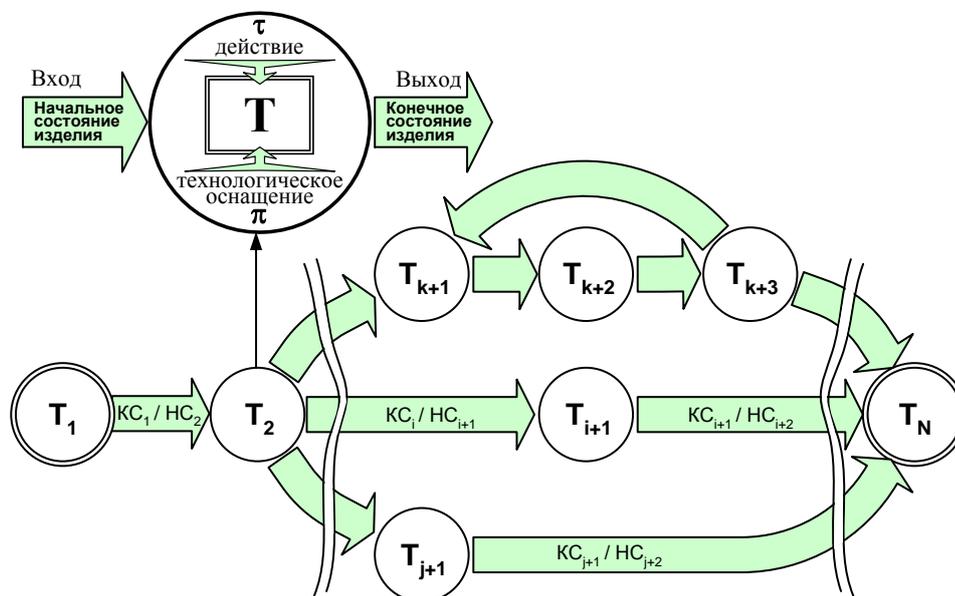


Рисунок 1- Механизм формирования конструктивно-технологических решений

В базе данных конструктивно-технологические решения представлены типовыми модулями – векторами, состоящими из трех основных частей: начального состояния детали, конечного состояния детали и технологического оператора, описывающего переход из начального состояния детали в конечное. Каждое состояние изделия или технологической системы имеет типовую структуру и набор конструктивно-технологических свойств.

Каждый вектор конструктивно-технологического решения – это единица хранения информации, позволяющая последовательно описать весь технологический процесс от начала до конца (от математической модели до детали). Формирование модели нового конструктивно-технологического решения для модифицируемой детали сводится к поиску

конструктивно-технологического решения-прототипа, анализу этого прототипа и внесению необходимых изменений с учетом свойств и параметров детали. Поиск прототипа проводится в два этапа: поиск близких состояний технологической структуры изделия по расстоянию Хэмминга; поиск схожих состояний по структуре технологических операторов, описывающих состояния производственной системы. Поиск прототипа начинается с преобразования модели детали в вектор конструктивно-технологического решения (в конечное состояние). Сравнение векторов-прототипов проводится по любой их части или по всему вектору сразу, при этом возможно сравнение конечного состояния одного вектора с начальным состоянием другого. Скорректированное решение-прототип становится основой для запроса базе данных, при помощи которого на основе процедур имитационного моделирования формируются уточненные варианты конструктивно-технологических решений.

При этом наибольшее значение приобретает поиск прототипов на основе классификации конструктивно-технологических решений методами распознавания образов, основанный на объективной классификации.

После того, как найдено наиболее близкое решение, это решение становится эталонным, и по его начальному состоянию в базе данных проводится поиск следующего наиболее близкого решения. Формирование и проработка конструктивно-технологических решений по методике проводится до той стадии, когда деталь начинает соответствовать требованиям чертежа, либо становится элементом сборочной единицы или узла;

Таким образом, в результате вычисления меры близости имеющихся в базе данных решений к эталонному получаем группу решений, которые, располагаясь в порядке, определяющем последовательность состояний детали, формируют комплексное конструктивно-технологическое решение.

При создании такой сложной системы как газотурбинный двигатель решаемые задачи реализуются совокупностью проектных процедур и операций, которые разделяются на три большие группы: поиск новых технических решений, оценка качества и технико-экономических характеристик вариантов решений и выбор сбалансированных решений. Важность и сложность этих задач различна и зависит от типов и сложности создаваемых изделий. Для простых изделий оценка качества и экономической эффективности не вызывает значительных сложностей и может быть проведена, например, методом экспертных оценок. При функционально-стоимостном анализе сложных изделий наибольшие трудности вызывают именно задачи оценки качества. Для построения моделей предметной области и

установления адекватности математических моделей необходима коллективная работа экспертов.

Сравнение полученных вариантов конструктивно-технологических решений проводится в два этапа: определение приоритета решений на основе экспертных оценок реализуемости и технико-экономическая оценка их сбалансированности.

Для первого этапа сравнения полученных вариантов конструктивно-технологических решений формируется матрица  $A$  «требований – решений – эффектов» (табл. 1), составленная по результатам опроса группы экспертов. В матрице хранятся экспертные оценки уровня реализуемости технических и экономических требований к элементам конструктивно-технологических решений (способности КТР удовлетворять предъявляемым требованиям). Сравнительная вероятность выполнения каждого из предъявленных требований при принятии определенного решения оценивается по 4-бальной системе. Матрица  $A$  формируется каждый раз при получении группы конкурирующих конструктивно-технологических решений; экспертные оценки в матрицу переносят из базы данных экспертных оценок реализуемости решений. Размеры матрицы зависят от количества отобранных КТР (высота) и количества предъявляемых требований (ширина).

Таблица 1

**Матрица  $A$  «требований – решений – эффектов»**

Решения \ Требования	Тр <sub>1</sub>	Тр <sub>2</sub>	Тр <sub>3</sub>	...	Тр <sub>n</sub>
	КТР <sub>1</sub>	3	3	4	
КТР <sub>2</sub>	5	2	3		5
...				...	
КТР <sub>n</sub>	4	4	5		2

Также решается ряд вспомогательных задач структурного синтеза, отличающихся приоритетностью предъявленных требований. Степень приоритетности требований отражается значениями весовых коэффициентов  $W_1...W_n$ , соответствующих требованиям  $T_1...T_n$ , к которым можно отнести требования к функциональным, конструктивным, технологическим и технико-экономическим свойствам деталей турбины.

Важность требований оценивается по 4-бальной системе, например, если требование  $Tр_j$  очень важно, то  $W_j=3$ ; если требованием  $Tр_j$  можно пренебречь, то  $W_j = 0$ . При решении конкретной задачи структурного синтеза умножением матрицы  $A$  на вектор-столбец весовых коэффициентов  $W$  вычисляется вектор показателей качества  $K$ , каждый элемент которого

$$K_i = \sum a_{ij} W_j \quad (1)$$

соответствует условному скалярному показателю качества  $i$ -го проектного решения. Проектные решения ранжируются по убыванию значений  $K_i$ . Первый ранг соответствует максимальному значению  $K_i$ , а соответствующее конструктивно-технологическое решение является наиболее предпочтительным. Каждое требование  $Tr_j$  относится к ограниченному набору свойств и параметров КТР, но при этом возможно создание групп требований к вариантам решений в различных комбинациях. Пример условий (задач) и результатов решения вспомогательных задач структурного синтеза приведены в таблице 2.

На состав и последовательность элементов КТР и проектных процедур могут оказывать определяющее влияние связи с другими элементами производственной системы или дополнительные требования.

Требуется связать описанные подпространства проектирования путем формализации относящихся к ним показателей качества и перевода их в единую математическую модель, способную оперировать формализованными данными об объекте проектирования на всех стадиях ЖЦ.

Таблица 2

#### Ранжирование вариантов конструктивно-технологических решений

	Приоритетность требований (задачи предприятия)	Вектор весовых коэффициентов					Приоритет решений (ранг)			
		W1	W2	W3	W4	W5	КТР1	КТР2	КТР3	КТР4
1	Равная	1	1	1	1	1	1	1	3	2
2	Минимальная себестоимость	2	1	1	1	1	2	1	3	2
3	Мин. квалификация кадров	1	3	1	1	1	2	2	3	1
4	Минимум времени	1	1	2	1	1	1	2	3	1
5	Минимум времени; высокая технологичность конструкции	1	1	2	2	1	1	2	4	3
6	Лучшее качество изделия	1	1	1	1	3	2	1	4	3
7	Средняя квалификация кадров; хорошее качество изделия	1	2	1	1	2	1	1	3	2
...	...	...					...			
N	Минимум риска (хорошее качество изделия; высокая технологичность конструкции)	1	1	1	2	2	1	1	3	2

Общими переменными технологических процессов выступают показатели качества изготовленных объектов производства – газотурбинных двигателей. Качество газотурбинного двигателя характеризуется системой показателей и регламентируется нормативно-техническими документами и другими стандартами. Для того, чтобы иметь возможность оценивать качество получаемых решений в информационном слое требуется создать группу показателей качества конструктивно-технологических решений. На основе

соответствующих стандартов «Система показателей качества продукции» для конструктивно-технологических решений определены следующие комплексные показатели качества:

- показатель функционального совершенства (назначения)  $F$ , характеризуемый мерой близости функций детали, заданных в техническом задании, тем функциям, которые реально выполняет объект производства;

- показатель надежности  $R$  (ресурс), характеризующий способность детали выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

- показатель технологичности конструкции  $TK$ , определяемый технико-экономическими показателями трудоемкости, материалоемкости, энергоемкости, технологической себестоимости, точности обработки и шероховатости обработки;

- показатель стандартизации и унификации  $U$ , характеризуемый коэффициентом применимости стандартизованного оснащения;

- показатель совершенства конструкции  $C$  определяет экономичность детали при выполнении заданных функций (например, коэффициент лобового сопротивления для лопаток, коэффициент полезного действия турбины);

- показатель точности и взаимозаменяемости  $PK$ .

Математическая модель для оценки комплексных показателей качества конструктивно-технологического решения выражается следующей структурой:

$$S(KT) = \{F, R, TK, U, C, PK\}. \quad (2)$$

Включенные в математическую модель показатели качества и их взаимосвязи (рис. 2) представляются в виде следующих функциональных зависимостей:

Включенные в математическую модель показатели качества и их взаимосвязи представляются в виде следующих функциональных зависимостей:

- показатель функционального совершенства;  $F = f_1(II) \quad (3)$

- показатель надежности (ресурс);  $R = f_2(F, C, PK, IT, R_a) \quad (4)$

- показатель технологичности конструкции;  $TK = f_3(t, m, e, s, IT, R_a) \quad (5)$

- трудоемкость изготовления;  $t = f_4(R, C, PK) \quad (6)$

- материалоемкость;  $m = f_5(C) \quad (7)$

- энергоемкость;  $e = f_6(t) \quad (8)$

- технологическая себестоимость;  $s = f_7(R, U, t, m, e, IT, R_a) \quad (9)$

- точность обработки;  $IT = f_8(R, C, PK) \quad (10)$

- шероховатость обработки;  $R_a = f_9(R, C, PK)$  (11)
- показатель стандартизации и унификации;  $U = f_{10}(F, C, PK)$  (12)
- показатель совершенства конструкции;  $C = f_{11}(F)$  (13)
- показатель точности и взаимозаменяемости;  $PK = f_{12}(C, n, f, y)$  (14)
- точность размеров;  $n = f_{13}(F, C)$  (15)
- точность формы;  $f = f_{14}(F, C)$  (16)
- точность взаимного положения.  $y = f_{15}(F, C)$  (17)

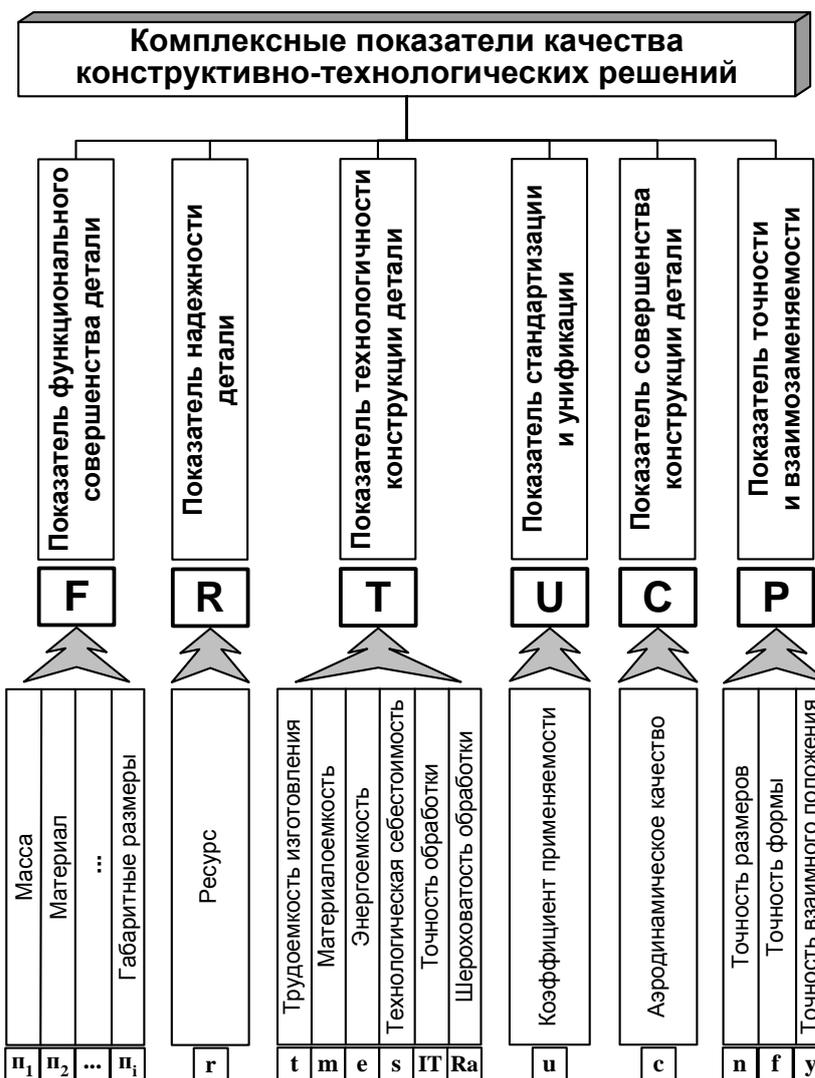


Рисунок 2 - Комплексные показатели качества конструктивно-технологических решений при технической подготовке производства лопаток турбины ГТД

Не все формы представления показателей качества пригодны для автоматизированной обработки. Использование размерных абсолютных величин (таких как тяга, расход воздуха,

себестоимость) в подобных математических моделях затруднено. Поэтому была разработана иная форма представления показателей качества: выделены группы показателей качества и каждой из групп был присвоен свой комплексный показатель, являющийся безразмерным и относительным, содержащий информацию обо всех составляющих его величинах [3].

Этот подход позволяет проводить автоматизированный анализ конструктивно-технологических решений без потери адекватности модели. Например, комплексный показатель функционального совершенства (F) содержит в себе информацию о наборе функций объекта и полноте реализации этих функций конструкцией, на эту информацию накладывается информация о количестве составных элементов конструкции, их массе, форме и габаритах. Например, предложены следующие удельные показатели функционального совершенства деталей ТВД:

– средняя масса детали ТВД

$$п_1 = m_{\text{ТВД}} / k_{\text{дет}} , \quad (18)$$

– весовая эффективность ТВД по расходу газа

$$п_2 = m_{\text{ТВД}} / G_{\text{г}} , \quad (19)$$

где  $G_{\text{г}}$  – расход газа;

$k_{\text{дет}}$  – количество деталей в узле;

$m_{\text{ТВД}}$  – масса узла.

Предложенный подход к формированию и оценке конструктивно-технологических решений визуализируется при помощи лепестковой диаграммы (рис. 3). По каждой из осей в относительной форме откладываются соответствующие комплексные (интегральные) показатели качества решения. Количество осей соответствует числу групп выбранных показателей качества. Для каждой оси определяется относительное значение показателя, образующее контур сбалансированных решений  $W$ , ограничивающий область сбалансированных решений  $S_W$ . Контур принимаемого конструктивно-технологического решения  $Y$  формирует область  $S_Y$ .

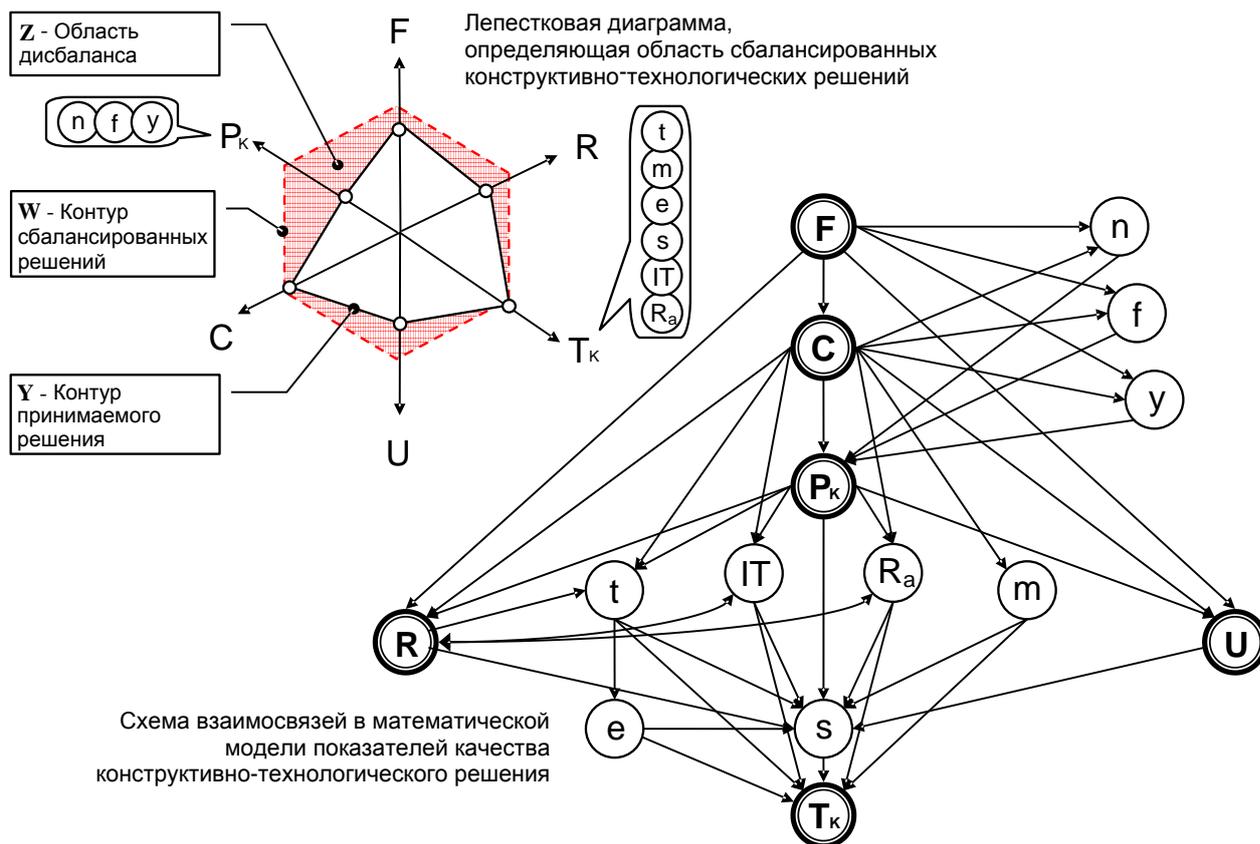


Рисунок 3 - Оценка сбалансированности принимаемых конструктивно-технологических решений по показателям качества

Сформулировано условие приемлемости решения: контур конструктивно-технологического решения должен располагаться внутри контура W (в области сбалансированных решений). При этом область «дисбаланса» Z, принятая как разность площадей областей, ограниченных контурами W и Y ( $Z = S_W - S_Y$ ), должна интерпретироваться как минимальная площадь. Величина области Z иллюстрирует объем резервов показателей качества, заложенный в принимаемое конструктивно-технологическое решение.

Возможен вариант, когда контур Y будет выходить за пределы области, ограниченной контуром W. В этом случае принимаемое конструктивно-технологическое решение нерационально. Для оценки совершенства решения введен коэффициент сбалансированности решения:

$$b = S_Y / S_W \quad (20)$$

Чем ближе коэффициент b к единице, тем решение сбалансированнее.

Предложенная модель и результаты моделирования, представляемые в виде диаграммы, являются динамическими. В течение всего периода проектирования конструкции и технологии в соответствии со сложившимися условиями меняется очертание контура

сбалансированных решений  $W$ . Также в зависимости от изменения различных внешних и внутренних факторов корректируются и контуры вариантов принимаемых решений  $Y$ .

Методика функционально-стоимостного анализа узлов и агрегатов, основанная на имитационном моделировании конструктивно-технологических решений, позволяет повысить эффективность конструкторского и технологического проектирования за счет принятия сбалансированных решений на ранних этапах технической подготовки производства.

### **Библиографический список**

1. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 540 с.: ил.

2. Елисеев Ю.С., Силуянова М.В., Скибин В.А., Соколов В.П. Функционально-стоимостной анализ авиационных двигателей на производственных стадиях жизненного цикла // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». - 2002. - №3. - С. 44-50.

3. Завалишин И.В., Потапов А.Ю., Силуянова М.В. Анализ конструктивно-технологических решений в процессе создания газотурбинных двигателей // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». - 2008. - №5. - С. 51-57.

### **Сведения об авторах**

Артёмов Артём Викторович, аспирант Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, e-mail:rassiec@mail.ru

Завалишин Игорь Владимирович, доцент Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, к.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru

Чернецов Владимир Иванович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н., e-mail:info@itbu.ru