

# Разработка методики проектирования под заданную стоимость

Владимир Зобнин

Тел.: +7 903 113 2835

Email: [vladimirzobnin@gmail.com](mailto:vladimirzobnin@gmail.com)

Московский авиационный институт (МАИ), Москва

## Введение

В работе [2], были рассмотрены основные положения и принципы методологии проектирования под заданную стоимость (ПЗС), а также исторический аспект применения методологии ПЗС за рубежом. Было показано, что многолетний опыт зарубежных компаний подтверждает возможность успешного решения задачи разработки изделий при исходном ограничении их себестоимости.

Главными движущими факторами разработки и внедрения методологии ПЗС является наличие конкурентного окружения. Изделие, разрабатываемое в этих условиях, должно иметь соотношение показателей качества и стоимости, определяемое ситуацией, сложившейся на рынке. При этом «область существования» изделия определяется минимальным уровнем качества и максимальным уровнем стоимости (рис. 1)

Именно здесь возникает необходимость наложения ограничения на величину себестоимости при разработке новых изделий и принятия конструктивно-технологических решений (КТР), соответствующих этому ограничению.

Анализ методов управления и учета стоимостных параметров изделий при разработке показал, что их применение ограничивается поздними этапами разработки, на которых КТО изделия становится определенным. К ним относятся две группы методов, ориентированных на усовершенствование или отбор вариантов КТО по стоимостному критерию, и прогнозирование и расчет себестоимости изделия.

К первой группе относятся методы, в которых принятые КТР, оцениваются по стоимостной эффективности и, в случае отклонения их от некоторого оптимума, осуществляется корректировка обнаруженных «неоптимальностей». В эту группу входят, работы по глубоко проработанным методам функционально-стоимостного анализа (ФСА) и оптимизации КТР по стоимостному критерию.

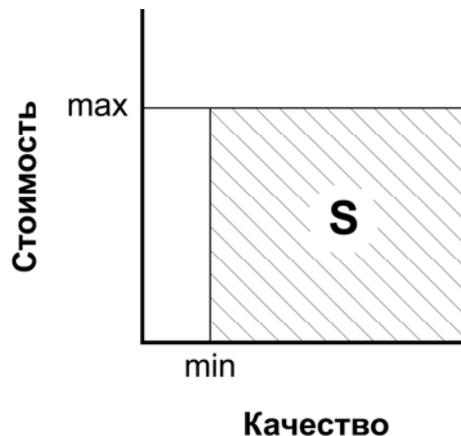


Рис. 1. Область существования изделия

ФСА является методом проведения системной технико-экономической работы, направленной на максимально рациональное обеспечение функций изделия, в том числе с точки зрения их стоимостной эффективности [9]. В основе ФСА лежит представление о стоимости, как сумме минимума издержек, необходимых для изготовления изделия, выполняющего определенные функции, и издержек, не имеющих прямого отношения к функциональности изделия, и связанных с несовершенством его КТО. Эти «излишние» затраты рассматриваются в качестве резерва снижения себестоимости продукции – в результате проведения ФСА величина себестоимости сводится к некоторому «функциональному» минимуму [8, 9].

Вопросы оптимизации КТР по стоимостному критерию рассматриваются в работе [3]. Суть оптимизационных задач состоит в выборе варианта КТО изделия, обеспечивающего минимальную величину себестоимости.

В обоих случаях анализу подвергается изделие, КТО которого определено, что позволяет учесть особенности принятых КТР. При этом недостатки методов заключаются в том, что величина стоимости изделия не может быть определена до завершения анализа, а сложности в оценке совершенства исходных КТР не позволяют спрогнозировать потенциал снижения стоимости.

Ко второй группе относятся методы прогнозирования [11, 12] и расчета себестоимости [6]. Низкая достоверность прогнозов, полученных по методикам, в основе которых лежит предположение о зависимости себестоимости от массы конструкции, и необходимость полной определенности КТО изделия являются препятствиями, не позволяющими использовать эти методы для решения задач ПЗС.

Внедрение методологии ПЗС в практику разработки новых образцов АТ в данный момент является одним из критических направлений реформирования отечественной авиационной промышленности.

С целью определения особенностей проектирования изделий при наличии ограниченной величины себестоимости, было проведено исследование. На основе результатов этого исследования была разработана методика ПЗС, которая рассматривается далее.

### **Постановка задачи**

Основной задачей, для решения которой предназначена разработанная методика, является разработка изделия, себестоимость производства которого, не превышает наперед заданной величины, при условии, что показатели качества изделия сохраняются не ниже некоторого заданного минимального значения.

### **Методические подходы**

#### Фактор неопределенности

Одной из особенностей ОКР является постепенное изменение степени определенности и состава категорий, характеризующих облик изделия. Если на этапе эскизного проекта представление об изделии является общим, складывающимся на основе схем и резуль-

татов приближенных расчетов, то к моменту серийного производства представление о его облике абсолютно детализируется. Соответственно, для того, что обеспечить возможность управления стоимостью на каждом этапе ОКР, необходимо иметь в наличии методику, ориентированную на использование в условиях различной степени определенности.

С этой целью в разработанной методике использовались такие параметры, влияющие на себестоимость, которые являются проявлением одного аспекта изделия и, одновременно, предметом исследования при разработке изделия, а именно, параметры конструктивно-технологического облика.

### Модель себестоимости

В качестве модели себестоимости при разработке методики ПЗС использовалась упрощенная модель, построенная на основе модели, предложенной в [11], и учитывающей пять компонентов себестоимости изделия, в том числе: суммарную зарплату всех категорий рабочих и служащих, расходы на покупку готовых узлов, расходы на все виды энергии и транспортные расходы, стоимость материалов специальной оснастки, стоимость материалов и полуфабрикатов.

Поскольку доля расходов на материалы для специальной оснастки, энергию, транспорт и т.п. в общей величине расходов является небольшой, они могут быть учтены введением постоянного коэффициента  $k_{np.p}$ , что дает возможность привести модель себестоимости к виду

$$C = (C_T + C_M) k_{np.p} k_N, \quad (1)$$

где  $C_T$  – компонент себестоимости, зависящий от трудоемкости;  $C_M$  – компонент себестоимости, зависящий от материалоемкости;  $k_{np.p}$  – коэффициент, учитывающий прочие расходы;  $k_N$  – коэффициент, учитывающий серийность изделия.

В формуле (1)

$$C_T = k_{\Phi OT} \sum_i (T_i Z_i), \quad (2)$$

где  $k_{\Phi OT}$  – коэффициент, учитывающий суммарную величину обязательных платежей, начисляемых на базе фонда оплаты труда (ФОТ);  $T_i$  – трудоемкость  $i$ -й операции при изготовлении изделия;  $Z_i$  – стоимость единицы трудоемкости при выполнении  $i$ -й операции; и

$$C_M = \sum_i G_{заг_i} M_i, \quad (3)$$

где  $G_{заг_i}$  – масса заготовок  $i$ -го материала;  $M_i$  – цена  $i$ -го материала в заготовках.

Сумма  $\sum (T_i Z_i)$  отражает трудоемкость изделия в широком смысле, т.е. не только потребное количество труда, но, через величину заработной платы  $Z_i$ , и сложность работ и

необходимую квалификацию персонала, а также общий уровень оплаты труда. Сумма  $\sum (G_{заг_i} M_i)$  может служить мерой эффективности применяемого материала, одновременно косвенно отражая совершенство применяемых технологий.

Следует отметить, что в процессе принятия решений оба аспекта ресурсоемкости должны рассматриваться комплексно. Как будет показано далее, четкой связи между двумя аспектами ресурсоемкости, например, в форме зависимости между расходами на оплату труда и материал, по всей видимости, не существует. Однако, наличие взаимного влияния не требует доказательств.

### Фактор сложности

Методика ПЗС должна быть наглядной для инженеров, а при ее использовании проектировщики должны иметь возможность оперировать понятными им техническими категориями, оказывающими влияние на величину себестоимости разрабатываемого изделия (системы). Характеристикой системы, удовлетворяющей такому условию, является *сложность*.

Под сложностью системы здесь понимается такое ее свойство, которое отражает многочисленность и разнообразие составляющих ее подсистем. Применительно к КТО изделия, под сложностью, понимается многочисленность и разнообразие входящих элементов конструкции и технологических процессов, необходимых для их изготовления.

Втулки, изображенные на рис. 2, изготавливаются за один переход на одном типе оборудования – токарном станке. Детали существенно различаются по сложности формы и соответственно различаются трудоемкость их изготовления, а вместе с тем, затраты на заработную плату, уплату налогов, накладные расходы и себестоимость изготовления в целом.

В качестве характеристики сложности в рассматриваемом примере использован показатель интегральности формы  $P_\phi$ , рассчитанный по формуле

$$P_\phi = \frac{1}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество графических примитивов и связей, составляющих полностью определенные эскизы САД-моделей деталей, образованных методом вращения профиля.

Расчеты показывают, что втулка *В*, интегральность формы которой выше на 70% по сравнению со втулкой *А*, имеет меньшие трудоемкость и себестоимость (на 68% и 60% соответственно).

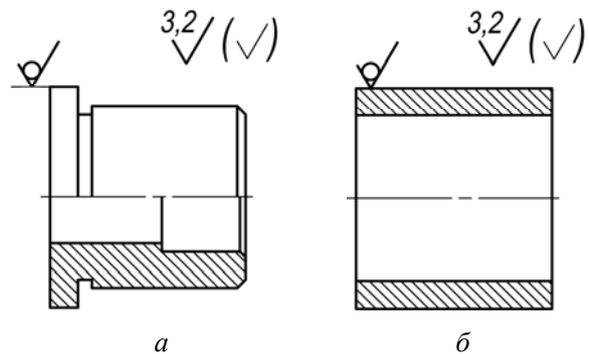


Рис. 2. Втулки

В приведенном примере в качестве параметра, характеризующего сложность КТО изделия, был использован показатель интегральности формы. В зависимости от типа изделия сложность будет характеризоваться показателями интегральности, учитывающими иные аспекты КТО изделия. Исследования показали, что связь интегральности и трудоемкости изготовления при этом будет оставаться однообразной – трудоемкость изготовления изделия снижается по мере повышения его интегральности его КТО.

#### Интегральность – характеристика стоимостных показателей КТО изделия

Под интегральностью в настоящей работе понимается обобщенная характеристика объектов, обладающих сложной структурой. Применительно к КТО изделия, интегральность выражает целостность его конструкции и технологии изготовления.

Высшая степень целостности КТО изделия соответствует такому его состоянию, при котором ни один из факторов, существенных с точки зрения конструкции или технологии невозможно четко выделить без точного предварительного определения членения структуры конструкции и технологии [4]. Соответственно, КТО альтернативного варианта какого-либо изделия имеет высший уровень интегральности в случае, если совокупность составляющих его компонентов и их свойств, обеспечивающих достижение заданного уровня характеристик, имеет меньшее число конструктивных элементов, материалов и необходимых технологий по сравнению с исходным вариантом изделия.

Интегральность КТО изделия характеризуется системой показателей вида

$$P = \frac{1}{n}, \quad (5)$$

где  $P$  – показатель интегральности;  $n$  – количественная характеристика аспекта КТО.

Принимая за основу математическую модель уровня интегральности агрегата, приведенную в [4], выражение для определения уровня интегральности КТО  $P_{КТО}$  изделия можно представить в виде

$$P_{КТО} = \sum (\alpha P)_i, \quad (6)$$

где  $P$  – показатель интегральности определенного аспекта КТО изделия.

Если выделить две группы аспектов КТО – относящихся к технологии и относящихся к конструкции, и сфокусироваться на них, формулу (6) можно представить в виде

$$P_{КТО} = \sum (\alpha P)_i^T + \sum (\alpha P)_j^C. \quad (7)$$

Для оценки сложности изделия в методике используется система показателей интегральности, структура которой имеет вид графа типа «дерево» (рис. 3), каждый ярус которого соответствует определенному этапу разработки.

Узловой точкой первого яруса графа (*техническое задание*) является показатель интегральности изделия  $P_{И}$ , обобщающий сложность всех аспектов и проявлений изделия.

На втором ярусе (*техническое предложение*) в узловых точках расположены показатели интегральности, характеризующие сложность отдельных аспектов изделия, в т.ч. показатель интегральности КТО изделия.

При перемещении вниз по структуре показатели разделяются на составные элементы до тех пор, пока на пятом ярусе (*разработка РКД*) не будет сформирован комплекс показателей, характеризующих сложность проектируемого изделия на этапе рабочего проектирования.

В зависимости от исследуемого аспекта КТО и этапа ОКР, на котором требуется оценить интегральность, состав показателей изменяется в соответствии с доступными параметрами. Так, на этапе эскизного проектирования, когда требуется определить тип используемых заготовок и материалов, перечень технологий, и технологическое членение и т.д., для оценки интегральности КТО могут использоваться показатели интегральности типов технологий, технологических процессов, типов входящих деталей и сборки.

Показатель *интегральности типов технологий*  $P_1^T$  определяется разнообразием технологий, используемых при производстве изделия, и рассчитывается по формуле

$$P_1^T = \frac{1}{n_{TT}}, \quad (8)$$

где  $n_{TT}$  – количество типов технологий, используемых при изготовлении изделия.

Деление технологий на типы происходит по признаку реализованного в технологии метода преобразования материала в деталь. Соответственно, к различным типам технологий относятся технологии, в которых материал преобразуется в деталь методом снятия материала, пластической деформации, высаживанием и т.д.

Поскольку для реализации каждого типа технологии требуется отдельное подразделение предприятия (цех), каждый дополнительный тип применяемой технологии обуславливает дополнительные расходы, связанные с поддержкой производства.

Показатель *интегральности технологических процессов*  $P_2^T$  определяется общим количеством технологических процессов, необходимых для производства изделия, и рассчитывается по формуле

$$P_2^T = \frac{1}{n_{ТП}}, \quad (9)$$

где  $n_{ТП}$  – количество технологических процессов, используемых при изготовлении.

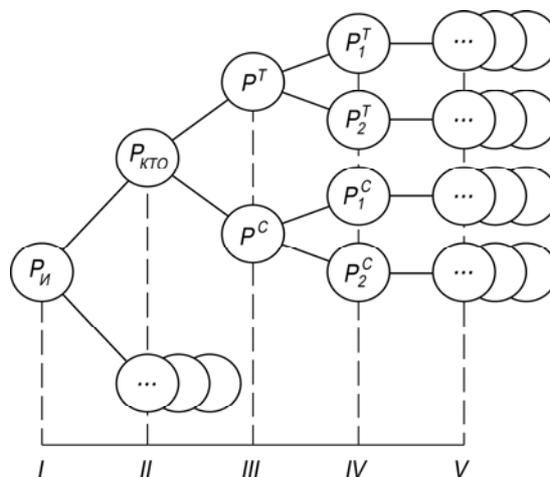


Рис. 3. Структура системы показателей интегральности изделия

Реализация каждого дополнительного технологического процесса требует использования дополнительного оборудования или переналадки имеющегося, поэтому величина показателя интегральности технологических процессов связана с расходами на поддержку производства.

Показатель *интегральности типов и типоразмеров входящих деталей*  $P_1^C$  определяется общим количеством типов и типоразмеров деталей, входящих в конструкцию изделия, и рассчитывается по формуле

$$P_1^C = \frac{1}{n_{ТД}}, \quad (10)$$

где  $n_{ТД}$  – общее количество типов и типоразмеров деталей, входящих в изделие.

Поскольку для изготовления каждого типа или типоразмера деталей, входящих в состав конструкции изделия, требуется использование дополнительной оснастки, оборудования, или переналадка имеющегося, величина этого показателя интегральности связана с расходами на поддержку производства.

Показатель *интегральности сборки*  $P_2^C$ , определяется общим количеством пар соединяемых деталей изделия, характеризует трудоемкость операций сборки и рассчитывается по формуле

$$P_2^C = \frac{1}{n_{ПД}}, \quad (11)$$

где  $n_{ПД}$  – общее количество пар соединяемых деталей в изделии.

Каждая пара соединяемых деталей требует выполнения операций по установке в требуемое положение и соединению, поэтому данный показатель характеризует затраты на сборку изделия.

Показатели интегральности играют роль ориентиров, по которым проектировщики оценивают принимаемые решения и могут прогнозировать вероятность достижения поставленных стоимостных целей. Для их использования следует определить весовые коэффициенты  $\alpha$  в формуле (7), выделяя связь каждого показателя со статьями себестоимости.

Эта задача была решена методом экспертных оценок. При этом себестоимость изделия рассматривалась в виде суммы

$$C = M + З + Э + И + А + Пр, \quad (12)$$

где  $M$  – расходы на материалы и полуфабрикаты;  $З$  – затраты на оплату труда производственных рабочих;  $Э$  – затраты на силовую электроэнергию;  $И$  – затраты на инструменты и приспособления;  $А$  – амортизационные отчисления;  $Пр$  – прочие расходы.

Перечисленные выше показатели интегральности в той или иной степени связаны с себестоимостью изделия в целом и с расходами по каждой из рассматриваемых статей.

Для выявления их связи с себестоимостью выполнена экспертная оценка, основанная на анализе себестоимости изготовления несложных изделий [1, 4, 5].

Связь каждого показателя с себестоимостью характеризуется степенью влияния на отдельные статьи себестоимости, которая оценивалась по двухбалльной системе. При наличии очевидной сильной связи какого-либо показателя с определенной статьей себестоимости ему присваивалась оценка «+»; в противном случае – оценка «пусто».

Степень связи показателей и себестоимости определялась по количеству статей себестоимости, имеющих сильную связь с определенным показателем. Весовые коэффициенты  $\alpha$  определены как отношение количества статей себестоимости, имеющих сильное влияние определенного показателя, к общему количеству статей (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Оценка взаимосвязи интегральности и себестоимости изделия

Статья расходов	Показатель интегральности			
	$P_1^T$	$P_2^T$	$P_1^C$	$P_2^C$
Заработная плата		+		+
Электроэнергия	+	+		
Инструменты и приспособления	+		+	
Амортизационные отчисления		+		
Обслуживание оборудования	+			
Прочие расходы	+			+
Весовой коэффициент	4/6	3/6	1/6	2/6

При подстановке полученных весовых коэффициентов, (7) принимает вид

$$P_{KTO} = \frac{2}{3} P_1^T + \frac{1}{2} P_2^T + \frac{1}{6} P_1^C + \frac{1}{3} P_2^C \quad (13)$$

Показатели, входящие в (7), вследствие различия весовых коэффициентов имеют различную степень влияния на общую величину интегральности КТО. Соответственно, и вклад каждого из показателей в себестоимость не одинаков. При необходимости управления интегральностью КТО изделия приоритетность изменения входящих показателей определяется по возрастанию весовых коэффициентов, т.е., в первую очередь –  $P_1^T$ , далее –  $P_2^T$  и  $P_2^C$  и, наконец,  $P_1^C$ .

Показатель интегральности КТО изделия в методике используется в качестве характеристики расходов, определяемых трудоемкостью изделия. На рис. 4 приведена статистическая зависимость трудоемкости  $T$  от показателя интегральности  $P_{KTO}$  для нескольких однотипных изделий каркасной конструкции типа люков, дверей, капотов и съемных панелей фюзеляжа вертолета *Ka-32*.

### Учет стоимости материалов

Учет стоимости материалов в разработанной методике выделен в отдельную процедуру. Очевидно, что расходы на материалы являются «вторичной» расчетной величиной, определяемой после того, как сформирован конструктивный облик изделия. Вместе с тем, обнаружить четкой зависимости расходов на материалы от исследуемых параметров КТО изделия не удалось.

Исследование себестоимости консоли стабилизатора (подробнее см. далее) показало, что расходы на материалы определяются, прежде всего, их стоимостью. Так применение в конструкции пластика, армированного *базальтовым* волокном, позволило снизить расходы на материалы более чем на 90% по сравнению с аналогичной конструкцией, в которой использовался стеклопластик, при сохранении показателей качества и интегральности [7]. Себестоимость изделия при этом снизилась более чем в 2 раза.

По всей видимости, учет расходов на материалы следует выполнять непосредственно и параллельно с принятием решений, касающихся конструктивных и технологических аспектов КТО изделия. Процедура учета расходов на материалы при этом должна предусматривать одновременную оценку затрат, определяемых трудоемкостью, и расходов на материалы, а критерием выбора того или иного КТР будет служить суммарная величина себестоимости изделия.

Для учета стоимости материалов  $C_M$  может использоваться выражение

$$C_M = \sum_i \left( \frac{C_M M}{КИМ} \right)_i, \quad (14)$$

где  $C_M$  – цена материала в конструкции изделия;  $M$  – масса материала в конструкции изделия;  $КИМ$  – коэффициент использования материала.

Формулой (14) учитывается стоимость всех материалов, используемых в конструкции изделия. Для расчетов предполагается использовать статистические значения массы материала и  $КИМ$  в конструкции изделия для каждого типа технологии, применяемой для его изготовления.

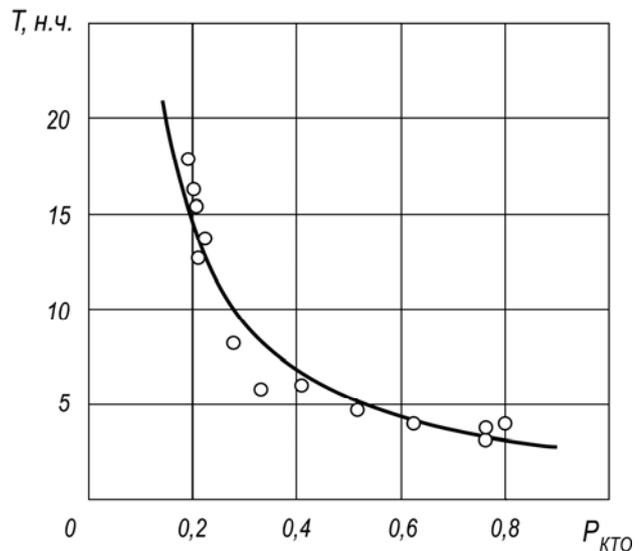


Рис. 4. Зависимость трудоемкости изготовления от интегральности КТО изделия

## Методика проектирования под заданную стоимость

Суть разработанной методики заключается в определении показателей интегральности изделия, соответствующего поставленной стоимостной цели, и использования этих показателей в качестве ограничений при выборе КТО изделия.

### Развернутый алгоритм расчетов (этап эскизного проектирования)

#### 1. Исходные данные:

- цели, которые предполагается достичь в результате проектирования, в т.ч. ограничение по величине себестоимости  $C_{MAX}$  изделия при определенной программе выпуска  $N$ , а также критерии достижения целей;
- перечни допущенных материалов и технологий;
- модель себестоимости изделия;
- структура показателей интегральности изделия и модель интегральности КТО;
- значения констант, в т.ч. стоимость единицы трудоемкости  $Z$ ; коэффициенты, учитывающие непроизводственные расходы, начисляемые на базе ФОТ и прочие коэффициенты, содержащиеся в используемых математических моделях.

#### 2. Анализ КТО аналога

При наличии достаточной информации об аналогах рекомендуется их исследование с целью выявления потенциала их модификации, в т.ч. анализ особенностей КТО аналога, показателей интегральности КТО и его стоимостных параметров.

Предполагая, что технология изготовления аналога останется прежней или изменится, но не существенно, а соответственно, останутся прежними или незначительно изменятся и показатели интегральности типов технологии, технологических процессов и расходы на материалы, оценивается необходимый уровень повышения интегральности типов и типоразмеров входящих деталей и сборки. Для этого:

2.1) по принятой модели себестоимости определяется величина компонента себестоимости  $C_T$ , зависящего от трудоемкости изделия по формуле

$$C_T = \frac{C}{k_{np.p} k_N} - C_M,$$

где  $C$  – заданная величина себестоимости изделия;  $k_{np.p}$  – коэффициент, учитывающий прочие расходы;  $k_N$  – коэффициент, учитывающий серийность изделия;  $C_M$  – компонент себестоимости, зависящий от материалоемкости изделия.

2.2) определяются расходы на оплату труда  $Zn$  по формуле

$$Zn = \frac{C_T}{(k_{np} + k_{нал})},$$

где  $k_{np}$ ,  $k_{нал}$  – коэффициенты, учитывающие накладные расходы и налоги.

2.3) определяется трудоемкость изделия, соответствующая установленному ограничению по себестоимости по формуле

$$T = \frac{3n}{3},$$

где  $3$  – стоимость единицы трудоемкости.

2.4) определяется минимальный уровень интегральности КТО изделия  $P_{KTO_{MIN}}$ , которому должна соответствовать модифицированная конструкция (см. рис. 4).

2.5) анализа определяется показатель интегральности типов технологий по (8); и

2.6) показатель интегральности технологических процессов по (9).

2.7) значение показателя интегральности КТО, полученное в п. 2.4, и показателей интегральности технологии, полученные в пп. 2.5 и 2.6, подставляются в модель интегральности изделия. Полученное при этом неравенство используется для оценки предполагаемых модификаций аналога.

2.8) на основе результатов анализа параметров аналога исследуются возможные пути повышения интегральности КТО, и оценивается изменение стоимостных показателей, достигаемое при внесении модификаций.

В случае если предполагаемые модификации обеспечивают достижение минимального уровня КТО, эти модификации могут быть внесены в конструкцию, а полученный КТО рассматриваться в качестве одной из альтернатив. В противном случае, может быть принято решение о нецелесообразности модификации аналога.

### 3. Разработка и анализ концепций альтернативных вариантов

3.1) определяются доли себестоимости, приходящиеся на расходы, зависящие от трудоемкости  $C_T$  и материалоемкости  $C_M$  изделия.

Если соотношение долей известно или задается, компоненты себестоимости определяются напрямую, если нет – для первого приближения можно принять отношение 50:50.

3.2) определяются величины компонентов себестоимости, зависящих от трудоемкости  $C_T$  и материалоемкости  $C_M$  изделия по принятой модели себестоимости. С учетом соотношения компонентов 50:50, в первом приближении

$$C_T = C_M = \frac{C}{2k_N},$$

где  $C$  – заданная величина себестоимости изделия;  $k_N$  – коэффициент серийности изделия.

3.3 – 3.5) выполняются процедуры пп. 2.2 – 2.4 соответственно;

3.6) модель интегральности КТО преобразуется в неравенство при подстановке минимального уровня интегральности КТО изделия, определенного в п. 3.5.

3.7) выбираются направления развития КТО изделия и формируются концепции КТО, потенциально позволяющие достичь полученного значения  $P_{KTO_{MIN}}$ .

3.8) сформулированные концепции КТО изделия прорабатываются до степени, позволяющей рассчитать показатели интегральности по (8, 9, 10, 11).

3.9) определяется величина показателя интегральности КТО альтернативных вариантов изделия по принятой модели интегральности.

3.10) определяется трудоемкость альтернативных вариантов изделия по зависимости трудоемкости от величины показателя интегральности КТО (рис. 4).

3.11) определяется величина расходов на оплату труда  $Zn$  по формуле

$$Zn = T \cdot Z,$$

где  $T$  – трудоемкость;  $Z$  – стоимость единицы трудоемкости на предприятии.

3.12) определяется компонент себестоимости, зависящий от трудоемкости  $C_T$  как

$$C_T = Zn (k_{np} + k_{нал}),$$

где  $k_{np}$ ,  $k_{нал}$  – коэффициенты, учитывающие накладные расходы и налоги.

3.13) определяется компонент себестоимости, зависящий от материалоемкости  $C_M$

$$C_M = \frac{C}{k_N} - C_T,$$

где  $C$  – заданная величина себестоимости изделия;  $k_N$  – коэффициент, учитывающий серийность изделия;  $C_T$  – компонент себестоимости, зависящий от трудоемкости.

3.14) разрабатываются альтернативные варианты изделия с учетом требований.

3.15) определяются расходы на материалы  $C_M^*$  по (14).

3.16) для каждой альтернативы выбирается материал из условия

$$C_M \geq C_M^*,$$

где  $C_M$  – компонент себестоимости, зависящий от материалоемкости изделия;  $C_M^*$  – требуемые расходы на материалы для альтернативной конструкции изделия.

#### 4. Корректирование КТО альтернативных вариантов

В случае если расчетное значение расходов на материалы  $C_M^*$  превышает значение компонента себестоимости, зависящего от материалоемкости изделия  $C_M$ , необходимо скорректировать альтернативную конструкцию. Для этого следует выполнить пересчет компонента себестоимости  $C_T$ , зависящего от трудоемкости, для чего:

4.1) определяется его величину по формуле

$$C_T = \frac{C}{k_N} - C_M^*,$$

где  $C_M^*$  – расчетная величина расходов на материалы для альтернативной конструкции.

4.2 – 4.4) выполняются процедуры пп. 2.2 – 2.4 соответственно.

4.5) модель интегральности КТО преобразуется в неравенство при подстановке минимального уровня интегральности КТО изделия, определенного в п. 4.4.

4.6) выполняется доработка альтернативных вариантов с учетом изменений  $P_{KTO_{MIN}}$ .

#### 5. Оценка альтернативных вариантов

5.1) выполняется оценка альтернативных вариантов по условию

$$m \in S,$$

где  $m$  – оценка,  $S$  – область, определяемая системой предъявленных требований.

#### 6. Отбор альтернативы

6.1) по результатам оценки выполняется отбор альтернативного варианта.

### **Проектирование стабилизатора**

Исследование применения разработанной методики было выполнено на примере проектирования стабилизатора многоцелевого вертолета.

#### Предварительные замечания

1. В проведенном исследовании агрегат рассматривался как самостоятельное изделие, КТО которого не связан с КТО вертолета. Это очень существенное допущение с точки зрения интегральности изделия в целом, поскольку КТО всех компонентов изделия должны согласовываться с целью сохранения контроля над стоимостью.

2. Разработка вариантов конструкции стабилизатора выполнялось в рамках конфигурации исходного варианта стабилизатора. Внесенные изменения затрагивали исключительно конструкцию пера стабилизатора, и затрагивали конструкцию узла крепления и параметры аэродинамической компоновки.

3. Конструкция пера стабилизатора была существенно упрощена – из нее исключены некоторые элементы, присутствующие на реальной конструкции, например, элементы узла крепления, узлы установки антенн и обтекатель концевой части стабилизатора.

#### 1. Исходные данные

Общие сведения об изделии. Стабилизатор (рис. 5) предназначен для повышения продольной устойчивости вертолета на переходных режимах и в горизонтальном полете; установлен на хвостовой балке вертолета и состоит из двух консолей, объединенных узлом установки.

#### Система требований к изделию

Альтернативная конструкция должна заместить существующую без существенных



Рис. 5. Стабилизатор вертолета

изменений конструкции вертолета, а ее внедрение не должно привести к ухудшению параметров динамики и центровки вертолета. Разрабатываемый вариант стабилизатора удовлетворяет следующим требованиям:

1. Величина аэродинамического качества разрабатываемого варианта стабилизатора  $K_i$  не должна отличаться от величины аэродинамического качества исходного варианта  $K_0$  более чем на  $\pm 5,0\%$ ;  $K_0 = 19,92$ .

2. Масса консоли разрабатываемого варианта стабилизатора  $m_i$  не должна превышать массы консоли исходного варианта стабилизатора  $m_0$  более чем на  $5,0\%$ ;  $m_0 = 12,3$  кг.

3. Площадь стабилизатора  $S_i$  при установке разработанной консоли не должна быть меньше площади исходного варианта стабилизатора  $S_0$ , а также не должна превышать ее более чем на  $10,0\%$ ;  $S_0 = 2,51$  м<sup>2</sup>.

4. Разрабатываемый вариант конструкции стабилизатора должен обеспечивать запас прочности не менее  $f = 1,5$  на режиме выхода из пикирования с величиной эксплуатационной перегрузки  $n^{\text{э}} = 3,5$ .

5. Себестоимость альтернативного варианта консоли стабилизатора  $C_i$  не должна превышать  $8890$  у.е. (снижение на  $35\%$ ) по сравнению с себестоимостью исходного варианта консоли  $C_0$  при серийности производства  $50$  ед./год;  $C_0 = 13677,2$  у.е.

Система критериев соответствия требованиям:

$$0,95 \leq \frac{K_i}{K_0} \leq 1,05; \quad \frac{m_i}{m_0} \leq 1,05; \quad 1,0 \leq \frac{S_i}{S_0} \leq 1,10; \quad \frac{C_i}{C_0} \leq 0,65 \quad (15)$$

#### Ограничитель материалов

К использованию в конструкции консоли стабилизатора допускаются следующие материалы: алюминиевый сплав; углепластик; стеклопластик; базальтопластик.

#### Ограничитель технологий

К использованию при производстве консоли допускаются следующие технологии:

1. Технологии обработки металлов: раскрой заготовок (гидроабразивная резка, резка на ножницах, фрезерование); механообработка (фрезерование); пластическое деформирование листовых заготовок (холодная штамповка, гибка); гальваническая обработка; сборка (клепка ручная, клепка автоматическая, склеивание, сварка).

2. Технологии обработки ПКМ: раскрой заготовок (ручная резка); приготовление препрега; механообработка (фрезерование готового пластика, фрезерование сотового наполнителя); механизированная намотка лент; выкладка препрега на оснастке; термическая обработка (полимеризация в пресс-формах, полимеризация в автоклаве); сборка (склеивание).

#### Модель себестоимости изделия

Используется модель себестоимости (1). В целях упрощения расчетов, коэффициент прочих расходов  $k_{нр.р}$  из модели исключен.

### Структура показателей и модель интегральности изделия

Используемая в примере структура показателей интегральности приведена на рис. 3. Используется модель интегральности КТО (13).

### Зависимость себестоимости изделия от величины партии

В примере учет влияния величины партии на себестоимость одного изделия выполнен формально. Коэффициент влияния для рассматриваемого типа конструкций и заданных условий производства  $k_N = 1,0$ .

### Константы

Стоимость единицы трудоемкости  $З = 100$  у.е./н.ч.

Коэффициенты расходов, исчисляемых на базе ФОТ:  $k_{нал} = 0,4$ ;  $k_{нр} = 5,0$ .

### **Анализ исходного варианта изделия**

Исходный вариант консоли стабилизатора представляет собой однолонжеронное крыло трапецевидной формы в плане. Аэродинамический профиль стабилизатора НАСА 0012. Размах стабилизатора – 1900 мм, длина пера – 1420 мм, хорда корневая – 860 мм, хорда концевая – 580 мм.

### Особенности КТО

Лонжерон балочной конструкции состоит из стенки 1 и поясов 2 (рис. 6). Бортовая 3 и концевая 4 нервюры выполнены неразъемными. Нормальные нервюры состоят из носовой 6 и хвостовой 5 частей. Обшивка стабилизатора состоит из носовой 7 и хвостовой 8 частей. Обшивка выполнена из листа толщиной 0,8 мм. Хвостовой стрингер 9 выполнен из профиля типа «кромка задняя».

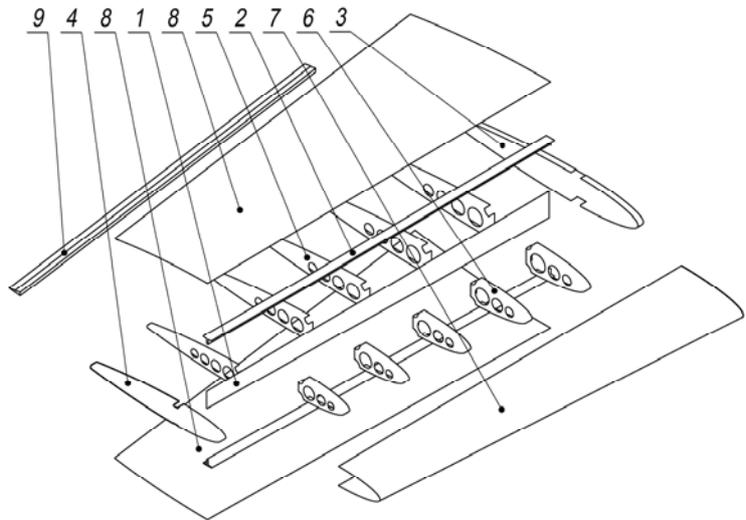


Рис. 6. Технологическое членение исходного варианта консоли стабилизатора

Материал конструкции – лист Д16Т. Сборка консоли выполняется методом клепки. Диаметр заклепок – 4,0 мм. Общая длина швов клепки – 21,1 м, шаг заклепок – 20 мм, общее количество заклепок – 1060.

Анализ показал, что для достижения стоимостной цели интегральность исходного КТО конструкции должна быть повышена с исходной величины 0,191 до 0,228.

В качестве мер повышения интегральности КТО исследовалось: а) изменение формы консоли в плане на прямоугольную, что ведет к снижению типоразмеров входящих деталей и, соответственно повышению интегральности типов и типоразмеров входящих дета-

лей; б) замена лонжерона сборкой конструкции цельным фрезерованным лонжероном, что ведет к снижению количества деталей и повышению интегральности сборки; и в) изготовление всех деталей (кроме лонжерона) из листа увеличенной толщины, что ведет к сокращению количества нормальных нервюр и также повышению интегральности сборки.

Внесение этих модификаций позволило повысить интегральность КТО изделия до величины 0,223. Достигнутая при этом величина себестоимости составила 10787,3 у.е., что не удовлетворяет требованию 5.

### Разработка альтернативных вариантов

В качестве направления развития проекта было выбрано внедрение ПКМ в конструкцию стабилизатора, что позволяет существенно снизить себестоимость изделия [1, 4].

К рассмотрению были приняты четыре концепции КТО:

1. Трехслойная конструкция «обшивка – наполнитель - вкладыш» (рис. 7).

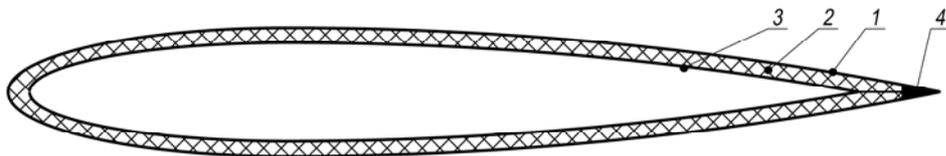


Рис. 7. Сечение стабилизатора (1): 1 – обшивка, 2 – наполнитель, 3 – вкладыш, 4 – хвостовой стрингер

Обшивка, вкладыш, бортовая и концевая нервюры изготавливаются из стеклоткани методом выкладки; наполнитель выполнен из стеклянного войлока.

Особенность технологии заключается в совмещении операций пропитки стеклоткани, склеивания и формования, благодаря чему существенно сокращается производственный цикл изделия. Кроме того, в качестве клея и связующего используется один материал – клей-пленка. Раскроенные стеклоткань, наполнитель, хвостовой стрингер и клей-пленка укладываются в соответствующей последовательности в оснастку, после чего выполняется формование в пресс-форме. В процессе нагрева под давлением, создаваемом в пресс-форме, клей разжижается и происходит одновременная пропитка стеклоткани клеем и его проникновение в места соединения деталей.

2. Цельная двухлонжеронная конструкция, выполненная методом намотки (рис. 8).

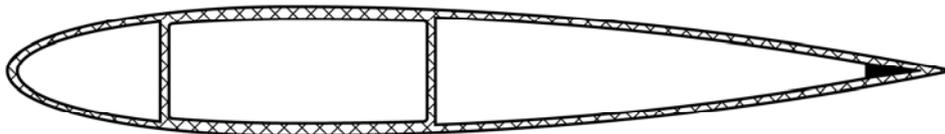


Рис. 8. Сечение стабилизатора (2)

Перо стабилизатора представляет собой монолитную конструкцию, выполненную методом намотки с последующим формованием в пресс-форме. Намотка выполняется за три этапа: (1) намотка коробчатого лонжерона; (2) намотка части обшивки; (3) намотка внешней поверхности с замоткой стрингера. Материал конструкции – углепластик.

3. Однолонжеронная конструкция с пустотелым лонжероном (рис. 9).

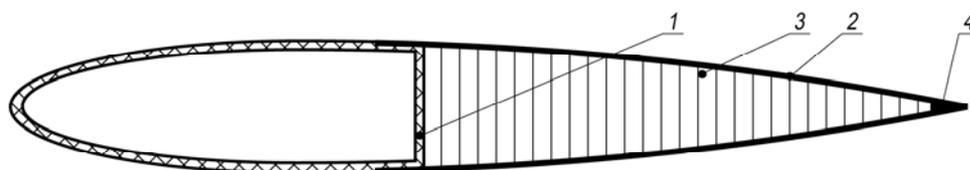


Рис. 9. Сечение стабилизатора (3): 1 – лонжерон, 2 – обшивка хвостового отсека, 3 – наполнитель хвостового отсека, 4 – хвостовой стрингер

Силовой элемент – лонжерон D-образного сечения, выполненный из стеклопластика методом намотки с последующим формованием в пресс-форме; обшивка хвостового отсека изготавливается из листового пластика, сотовый наполнитель – из материала ПСП.

4. Стабилизатор, прессованный из терморезистивной пластмассы (рис. 10)

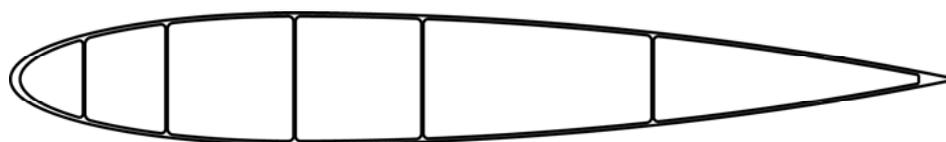


Рис. 10. Сечение стабилизатора (4)

Стабилизатор многоконтурного сечения выполнен методом прессования из массы АГ-4. Использование технологии прессования позволяет резко повысить интегральность изделия. Консоль состоит из двух деталей – пера и корневой нервюры-крышки, закрывающей технологической разъем. Обе детали прессуются за один переход.

Всеми рассмотренными концепциями предполагается прямоугольная форма стабилизатора в плане. Были выбраны геометрические параметры альтернативной консоли, позволяющие удовлетворить требованиям по величине аэродинамического качества (1) и площади стабилизатора (3); геометрические параметры консоли приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Геометрические параметры вариантов консоли		
Форма в плане	Трапец.	Прямоуг.
Размах, м	3,49	3,57
Хорда корневая, м	0,86	0,74
Хорда концевая, м	0,58	0,74
Площадь стабилизатора, м <sup>2</sup>	2,51	2,64
Аэродинамическое качество	19,92	19,93

### Оценка альтернатив

В соответствии с принятыми концепциями по разработанной методике были разработаны проекты альтернативных вариантов консоли стабилизатора и выполнена оценка их себестоимости.

Анализ полученных результатов (см. табл. 3) показал, что среди разработанных альтернатив только одна удовлетворяет всем предъявленным к конструкции консоли требованиям – вариант, разработанный на основе концепции 4. Остальные варианты превышают установленное ограничение по себестоимости более чем на 40%.

Т а б л и ц а 3

Показатели интегральности альтернатив

Показатель	Вариант концепции			
	1	2	3	4
$P_1^T$	0,250	0,250	0,250	0,333
$P_2^T$	0,111	0,20	0,125	0,250
$P_1^C$	0,20	0,50	0,20	0,50
$P_2^C$	0,167	0,50	0,050	1,0
$P_{KTO}$	0,311	0,517	0,279	0,764

Результат, полученный в отношении альтернативы 4, вполне ожидаем – высокая интегральность КТО и дешевизна материала обусловили запас до установленного стоимостного предела более 60%.

Себестоимость альтернатив 1 и 3 превышает установленное ограничение на 34% и 42% соответственно. Из табл. 4 видно, что доля стоимости материалов в себестоимости этих альтернатив достигает 57%.

Себестоимость альтернативного варианта 2 превышает установленное ограничение более чем в 2 раза. Обращает внимание высокая стоимость материала (углепластик), которая составляет более 80% себестоимости и превышает все остальные расходы в сумме более чем на 70%.

Т а б л и ц а 4

Стоимостные показатели альтернатив

Статья расходов, у.е.	Вариант концепции			
	1	2	3	4
Оплата труда	882	507	993	377
Налоги	353	203	397	151
Накладные	4410	2535	4965	1885
Материалы	7686	13980	8716	455
Итого	13331	17225	15071	2868

Анализ, выполненный для определения потенциала снижения себестоимости альтернатив, раскрыл возможность снижения себестоимости вариантов 1 и 3 ниже установленного ограничения себестоимости при использовании в конструкции ПКМ, армированного базальтовым волокном. В результате этой модификации себестоимость вариантов снижается до величин 5432 и 6760 у.е. соответственно, при сохранении показателей качества. Таким образом, альтернативы 1 и 3 попадают в

область удовлетворительных решений.

Потенциал альтернативы 2 в направлении использования более дешевого материала обнаружен не был – при внедрении в конструкцию стекло- или базальтопластика масса консоли, спроектированной с учетом требований прочности, значительно превышала соответствующее ограничение.

В соответствии с выполненной оценкой, альтернативными вариантами, при отборе могут рассматриваться варианты 1, 3 и 4.

#### Верификация полученных результатов

С целью подтверждения корректности результатов, полученных в результате применения разработанной методики, была выполнена проработка вариантов, допущенных к отбору, до степени, позволяющей рассчитать их себестоимость напрямую по статьям калькуляции.

Для этого были построены САД-модели альтернативных вариантов, по которым были точно определены массы деталей и параметры, определяющие показатели технологии их изготовления. На основе этих данных, по методикам, изложенным в [22, 40] были определены размеры заготовок и величины трудоемкости изготовления и далее – их себестоимость. Результаты поверочного расчета (табл. 5) показывают хорошее совпадение результатов.

Т а б л и ц а 5

Верификация результатов

Параметр	Вариант концепции		
	1	3	4
Расчет по методике, у.е.	5432	6760	2868
Прямой расчет, у.е.	5216	6671	2852
Отклонение, %	3,97	1,32	0,56

#### **Выводы**

1. Разработана методика проектирования под заданную стоимость, позволяющая выбирать параметры конструктивно-технологического совершенства изделия в соответствии с заданным ограничением по величине себестоимости на всем протяжении ОКР.

2. Результаты исследования применения методики на примере проектирования стабилизатора многоцелевого вертолета подтверждают правильность выбранного направления поиска и примененных подходов и, предварительно, работоспособность методики.

#### **Благодарности**

Автор выражает свою искреннюю признательность С.В. Лушину за ценные замечания по вопросам, связанным с разработкой методики проектирования под заданную стоимость, обмен опытом.

### Список литературы

1. *Вопросы проектирования изделий из полимерных композиционных материалов*. Отчет №01-87-ОТ, Ухтомский вертолетный завод им. Н.И. Камова, 1987.
2. Зобнин В.А. *Проектирование авиационных конструкций под заданную стоимость: идеология и принципы*//Труды VII Форума Российского вертолетного общества, М., 2006.
3. Комаров Ю.Ю. *Технико-экономический анализ и оптимизация вариантов технологических решений с использованием ЭВМ*, М., МАИ, 1988.
4. Лушин С.В. *Формирование и оценка концепций, структур и конструктивно-технологических решений*, М., НИАТ, 2002.
5. *Методика оценки эффективности обработки самолетных деталей на станках с ЧПУ*, М., МАИ, 1984.
6. *Методические разработки для технико-экономического обоснования дипломных проектов по вертолетостроению по специальности «вертолетостроение»*, МАИ, 1987.
7. *Свойства базальтопластиков и перспективы их применения* // оригинал статьи: [www.basaltfibre.com/library/articles/svoystva2.htm](http://www.basaltfibre.com/library/articles/svoystva2.htm).
8. Соболев Ю.М. *Конструктор и экономика: ФСА для конструктора*, Пермь, Кн. Изд., 1987.
9. *Справочник по функционально-стоимостному анализу*, М., Финансы и статистика, 1988.
10. *Справочник технолога-машиностроителя*, М., Машиностроение, 1972.
11. Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С. *Вертолеты. Выбор параметров при проектировании*, М., Машиностроение, 1976.
12. Dean E., Unal R. *Design For Cost*, Conference of the American Association of Cost Engineers, 1991.
13. Williamson B. *Design to Cost Lessons Learned*, SAVE Annual Proceedings, SAVE, 1994.