

## **Оценка эффективности и качества ракетно-космической техники**

А.К. Недайвода, А.В. Рождественский

### **Аннотация:**

В статье рассмотрены основные подходы к оценке эффективности и качества сложных технических систем на примере объектов ракетно-космической техники. Предложены математические модели описания эффективности систем ракетно-космической техники. Подробно рассмотрены экспертные методы оценки эффективности сложных технических систем и особенности их применения.

### **Ключевые слова:**

ракетно-космическая техника; модель эффективности системы; качество системы; показатели эффективности; экспертные методы оценки.

Эффективность технических систем определяется множеством различных по своей природе факторов, которые, как правило, можно объединить в три группы: качество технической системы, условия функционирования и способы использования технической системы.

Любая техническая система создается для достижения определенных целей, причем всегда приходится искать компромиссные решения. Рассмотрим операцию, в которой анализируемая система является активным средством достижения этих целей. Операция формируется в рамках  $S_0$  - системы, основными компонентами которой являются объект операции (объект воздействия), активные средства и ресурсы управления. Определяют потенциальную эффективность операции при идеальном способе использования технической системы.

Эту потенциальную эффективность и принимают за характеристику качества технической системы. Другими словами, показатель эффективности введенной операции является показателем качества технической системы.

В [1] разработана удобная геометрическая модель, наглядно объясняющая понятие качества технической системы  $S$ . На рисунке 1 изображена схема направленности свойств  $S$ -системы, на которой показана совокупность векторов в  $n$ -мерном пространстве свойств. Эта совокупность свойств характеризует качество системы в общем смысле.

Предположим, что техническая система является системой многоцелевого назначения. В этом случае необходимо последовательно рассмотреть все цели, для достижения которых предназначена техническая система. По каждой из них ввести собственную операцию, в которой исследуемая система  $S$  используется как активное средство, а затем по каждой операции определить ее потенциальную эффективность. Вектор показателей потенциальных эффективностей введенных операций является векторным показателем качества технической системы.

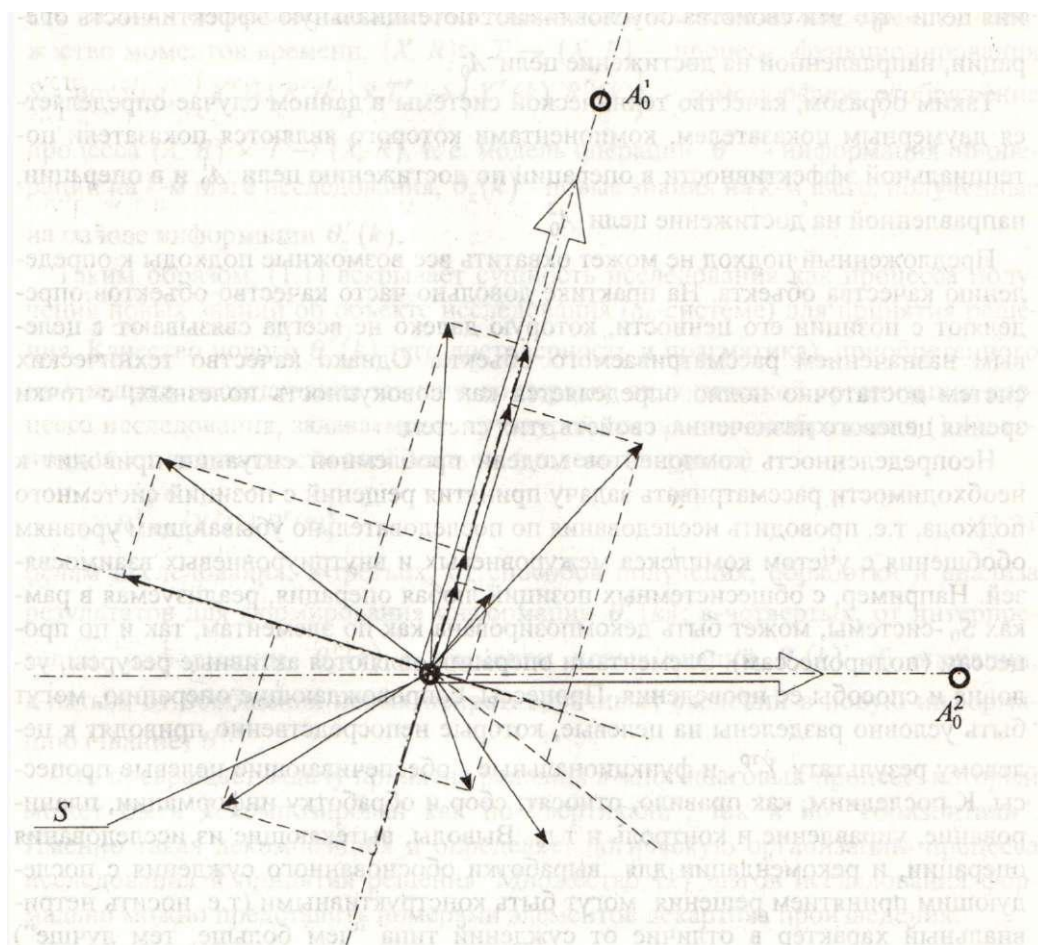


Рисунок 1 - Схема направленности свойств системы

На рисунке 1 вторая цель  $A_0^2$ , для достижения которой также предназначена техническая система  $S$ , формирует в пространстве свойств другое направление (линия цели  $S - A_0^2$ ). Совокупность свойств технической системы, отображаемых векторами, проекции которых на линию цели  $S - A_0^2$  направлены на цель  $A_0^2$ , является множеством полезных свойств системы  $S$  в смысле достижения цели  $A_0^2$ . Эти свойства обуславливают потенциальную эффективность операции, направленной на достижение цели  $A_0^2$ .

Таким образом, качество технической системы в данном случае определяется двумерным показателем, компонентами которого являются показатели потенциальной эффективности в операции по достижению цели  $A_0^1$  и в операции, направленной на достижение цели  $A_0^2$ .

Предложенный подход не может охватить все возможные подходы к определению качества объекта. На практике довольно часто качество объектов определяют с позиции его ценности, которую далеко не всегда связывают с целевым назначением рассматриваемого объекта. Однако качество технических систем достаточно полно определяется как совокупность полезных, с точки зрения целевого назначения, свойств этих систем.

Неопределенность компонентов модели проблемной ситуации приводит к необходимости рассматривать задачу принятия решений с позиций системного подхода, то есть проводить исследования по последовательно убывающим уровням обобщения с учетом комплекса межуровневых и внутриуровневых взаимосвязей. Например, с общесистемных позиций любая операция, реализуемая в рамках  $S_0$ -системы, может быть декомпозирована как по элементам, так и по процессам (подпроцессам). Элементами операции являются активные ресурсы, условия и способы ее проведения. Процессы, сопровождающие операцию, могут быть условно разделены на целевые, которые непосредственно приводят к целевому результату  $Y^p$ , и функциональные - обеспечивающие целевые процессы. К последним, как правило, относят: сбор и обработку информации, планирование, управление и контроль и т.д. Выводы, вытекающие из исследования операции, и рекомендации для выработки обоснованного суждения с последующим принятием решения могут быть конструктивными лишь в том случае, если они базируются на количественных оценках. Последнее обстоятельство требует привлечения метода математического моделирования в качестве основного средства исследования эффективности операции. Выявленные при экспериментировании с построенной моделью свойства и закономерности затем обобщают и переносят на реальный объект исследования. Формально процесс исследования может быть представлен следующей совокупностью отображений:

$$\left. \begin{aligned} & \{X, R\} \times T \rightarrow \{X, R\}^{\Theta^{(k)}} \Rightarrow \{X^r(k), R^r(k)\} \times T^r \rightarrow \\ & \rightarrow \{X^r(k), R^r(k)\} \Rightarrow \Theta_z^r(k) \Rightarrow \Theta_z^r(k) \Rightarrow \Theta^{k+1} = \\ & \Theta^{(k)} \cup \Theta_z(k), k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где:  $\{X, R\}$ - множество элементов  $X$   $S_0$ -системы и связей между ними,  $T$  - множество моментов времени,  $\{X, R\} \times T \rightarrow \{X, R\}$  - процесс функционирования  $S_0$ -системы,  $\{X^r(k), R^r(k)\} \times T^r \rightarrow \{X^r(k), R^r(k)\}$ - гомоморфное отображение процесса  $\{X, R\} \times T \rightarrow \{X, R\}$ , т. е. модель операции,  $\Theta^{(k)}$  - информация об операции на  $k$ -м шаге исследования,  $\Theta_z(k)$  - новые знания на  $k$ -м шаге, полученные на основе информации  $\Theta_z^r(k)$ .

Таким образом, (1) вскрывает сущность исследования как процесса получения новых знаний об объекте исследования ( $S_0$ -системе) для принятия решения. Качество нового  $\Theta_z^r(k)$  (его достоверность и прагматика), приобретенного на  $k$ -м шаге исследования зависит, во-первых, от логической организации процесса исследования, задаваемого структурой составного отображения (1); во-вторых, от адекватности отображения (модели операции)

$$\{X, R\}^{\Theta^{(k)}} \Rightarrow \{X^r(k), R^r(k)\} \times T^r \quad (2)$$

целям исследования; в-третьих, от способов получения, обработки и анализа результатов для формирования информации  $\Theta_z^r(k)$ ; в-четвертых, от интерпретации информации  $\Theta_z^r(k)$  в элементы новых знаний  $\Theta_z(k)$  об операции; в-пятых, от обобщения новых непротиворечивых сведений в новую информацию (знание)  $\Theta^{k+1}$ .

Это превращает задачу принятия решения в многошаговый процесс, который может быть декомпозирован как по "вертикали", так и по "горизонтали". Именно такая декомпозиция и определяет логическую организацию процесса исследования и принятия решения. Множество  $\{k\}$  шагов исследования формально можно представить номерами элементов декартова произведения:

$$H^B \times H_k^r \Rightarrow \{k\}, \quad (3)$$

где:  $H^B = [k^B]$  - множество уровней принятия решений "вертикальной" декомпозиции:  $H^r = \{k^r\}$  - множество шагов исследования "горизонтальной" развертки уровня  $k^B \in H^B$ .

Хотя формально в (1) множество  $k$  является бесконечным, тем не менее при решении всех практических задач оно имеет верхнюю грань, которая определяется обобщенным

ресурсом на проведение исследования (отпущенное время, вычислительные ресурсы, уровень прикладных и общенаучных знаний). Способ представления модели (2) зависит от цели исследования. Если целью исследования является лишь установление наиболее общих закономерностей для принятия решений относительно выработки долговременных концепций развития большой технической системы, то модель (2) должна строиться в наиболее общей форме, предполагающей высокую степень агрегирования исходной информации для выявления тренда. Построение чрезмерно детальной модели не только весьма затруднительно, но и просто вредно, так как излишний учет факторов затрудняет выявление "целевой" тенденции среди возникающих побочно. Кроме того, в этом случае неоправдано растут затраты на построение модели и экспериментирование с ней, обработку и обобщение получаемой информации, что снижает мощность множества  $\{k\}$  и, следовательно, снижает полноту нового знания  $\Theta^{k+1}$ . В основе декомпозиции процесса принятия решения при исследовании эффективности и качества технических систем лежит важнейший общесистемный принцип внешнего дополнения. Согласно этому принципу проверка истинности получаемых результатов (информации  $\Theta_z(k)$ ) возможна только в рамках метасистемы относительно исследуемой технической системы.

В любом из этих случаев необходимо прежде всего сформировать комплекс условий функционирования рассматриваемой системы. Комплекс условий понимается как некоторый необходимый минимум дополнительной информации, позволяющей замкнуть рассматриваемую техническую систему, сформировать модель цели операции для нее, установить условия проведения операции и свести рассматриваемую проблему исследования к одной из типовых задач принятия решения.

Таким образом, процесс исследования и принятия решения носит иерархический характер ("вертикальная" декомпозиция), то есть осуществляется последовательное привлечение информации от выше- и нижележащих системных уровней исследования с детализацией ее на рассматриваемом уровне ("горизонтальная" декомпозиция).

В соответствии с этим "вертикальная" декомпозиция задает своеобразную иерархию уровней исследования, состоящую как минимум из двух соподчиненных этапов принятия решения - концептуального и операционного. Соподчиненность не означает строгую зависимость, а отражает диалектическое единство уровней принятия решений. Хотя концептуальный уровень и является ведущим, в то же время результаты операционных

исследований обуславливают соответствующую корректировку задачи принятия решения на концептуальном уровне.

При исследованиях эффективности и качества больших технических систем возникает необходимость во введении и третьего уровня принятия решений, подчиненного операционному уровню, на котором проводится детальный анализ качества элементов технической системы и вырабатываются комплексные решения по его удовлетворению.

Таким образом, выделяют следующие уровни принятия решения:  $k^B = I$  - концептуальный;  $k^B = II$  - операционный;  $k^B = III$  - детальный.

На рисунке 2 приведена иерархия уровней принятия решений, показаны особенности каждого уровня и их взаимосвязь [1].

Такая трехуровневая декомпозиция общей задачи принятия решений позволяет установить жизнеспособность выдвинутой концепции эффективности системы, порождает системный подход к процессу принятия решений как с точки зрения цели, так и с учетом возможных других подсистем и средств.

Уровень принятия решений	Объект исследования	Цель исследования	Модель	Показатели и критерии эффективности
	Система	Анализ концепций проведения операции. Определение перечня подцелей и задач, подсистем, условий их функционирования. Формирование облика системы	Аналитическая	Степень достижения цели операции. Критерий пригодности. Критерий адаптивности
	Подсистема	Анализ способов выполнения задач подсистемами. Определение обобщенного облика подсистем и средств, общие требования к качеству их элементов	Имитационная	Степень выполнения задач подсистемами. Критерий пригодности. Критерий оптимальности
	Элемент	Детальный анализ качества элементов	Статистическая	Показатели качества элементов (технические характеристики). Критерий оптимальности

Рисунок 2 - Иерархия уровней принятия решений

Концептуальный уровень - это уровень принятия решений относительно целей функционирования  $S_0$ -системы и внешних условий, т.е. относительно комплекса условий функционирования исследуемой технической системы. Он обеспечивает выявление рациональной логики процесса функционирования и его информационную достаточность, является тем связующим звеном, которое придает целенаправленный, логически связанный характер всему процессу принятия решений. Принимаемые на этом уровне решения должны базироваться на наиболее надежной информации, носящей, как правило, качественный характер. Эта информация вскрывает общую структуру предпочтений ЛПР (лица, принимающего решения), обеспечивающую содержательность и непротиворечивость принимаемых решений на операционном и детальном уровнях.

На операционном уровне проверяют степень выполнения частных задач (подцелей) операции и синтезируют функциональную структуру технической системы, участвующей в операции, если решается задача разработки (проектирования) системы. На этом же уровне принимают решения по формированию требований к подсистемам (агрегатам, узлам) системы.

Детальный уровень предполагает анализ качества элементов подсистем и при необходимости решение задачи инженерного синтеза.

В случае выявления противоречий и "узких" мест в ходе принятия решений по уровням в направлении "сверху вниз" происходит возврат на вышележащий уровень с целью коррекции ранее принятых решений.

Такая процедура предусматривает уточнение принимаемых частных решений и модели предпочтений  $P$  на основе выявления тех элементов модели проблемной ситуации, которые были определены не до конца. Подобная корректировка с движением "снизу вверх" представляет собой обратные связи в "вертикальной" декомпозиции. Именно они обеспечивают непротиворечивость получаемой новой информации для принятия решения. Полнота этой информации обеспечивается в результате пошагового расширения моделей принятия решения при "горизонтальной" декомпозиции процесса, описываемого (1).

Этот процесс обеспечивает "вложенность" модели предпочтений и "вложенность" эффективного множества альтернатив:

$$P \subseteq P^1 \subseteq P^2 \subseteq \dots \subseteq P^*, \quad U \supseteq U_1 \supseteq U_2 \supseteq \dots \supseteq U^*. \quad (4)$$

При этом "вложенность" достигается не просто некоторым расширением априорной информации  $\Theta^{k+1}$  в результате различного рода непротиворечивых и содержательных

сообщений с выше- и нижележащих уровней, но и получением качественно новой информации путем эвристического (интеллектуального) анализа имеющейся информации. Именно ЛИР обеспечивает концептуальную согласованность всей информации при выработке решения.

Приведенная информационно-логическая схема принятия решения ("вертикальная" декомпозиция) носит универсальный характер в том смысле, что она может быть применена для анализа системы любой степени детализации (до тех пор, пока она остается системой в понимании исследователя). В этом случае сама исследуемая техническая система (подсистема, агрегат, узел) фиксируется на операционном уровне; концептуальный уровень формируется для вскрытия целей ее функционирования на основе установления общих тенденций развития метасистемы (установления комплекса условий функционирования) и привлекается информация об элементах технической системы и их возможностях с нижележащего детального уровня.

Цели и задачи каждого уровня "вертикальной" декомпозиции могут быть решены лишь в том случае, если указано некоторое общее свойство, по которому объекты рассматриваемого уровня принятия решения (концепция проведения операции, стратегия применения технической системы, элемент системы) различаются по предпочтительности с точки зрения оперирующей стороны. Таким обобщенным динамическим свойством для концептуального уровня принятия решения является потенциальная эффективность.

Термин "потенциальная эффективность" отражает то обстоятельство, что при принятии решений, направленных на оценку принципиальной приемлемости той или иной концепции проведения операции, на установление возможных стратегий ЛПР и других субъектов So-системы или оценку влияния отдельных факторов, используется лишь наиболее общая агрегированная информация качественного характера.

Рассмотрим задачу анализа эффективности и качества изделий ракетно-космической техники на детальном уровне принятия решений (рисунок 2) с учетом введенного понятия эффективности технической системы, интерпретируемой далее как изделие РКТ.

Фундаментальным положением зарубежного опыта создания высококачественной продукции является положение о том, что качество закладывается в изделие, начиная с самых ранних этапов его разработки. Умение прогнозировать основные тенденции развития соответствующих отраслей техники, проводить "опережающее" проектирование, непрерывную модернизацию устаревших моделей, находить рациональный компромисс между рядом противоречивых требований - все это определяет качество на этапе разработки. Рабочим инструментом разработчика здесь является математическое моделирование.



Математические модели этого этапа наиболее обобщенные, отражающие самые общие свойства разрабатываемого изделия. На этом этапе в условиях малого объема исходной информации широкое применение находит экспертиза.

Наиболее универсальной характеристикой изделий ракетно-космической техники принято считать эффективность, понимая под этим степень приспособленности системы к выполнению заданных ей функций. Эффективность изделий машиностроения зависит от ряда показателей или параметров. Основные из них: стоимость разработки, изготовления и эксплуатации изделия, качество функционирования, мощность потребляемой энергии, масса, габариты, условия нормального функционирования и пр.

Кроме того, эффективность изделия зависит от его структуры, характера связей между элементами, вида управляющих алгоритмов и ряда других закономерностей функционирования, не поддающихся описанию при помощи указанных параметров.

Так, например, в настоящее время резко возрос уровень сложности задач, решаемых системой управления летательным аппаратом (ЛА), в частности рулевым приводом - силовым исполнительным устройством, осуществляющим перемещение управляемого элемента.

Основными требованиями к конструктивным и функциональным качествам приводов являются требования минимизации массы и энергопотребления, высокое быстродействие, точность слежения, жесткие ограничения динамических характеристик, что, в свою очередь, заставляет искать новые подходы по используемым материалам, компоновочным решениям, обеспечению больших коэффициентов усиления.

Последнее обстоятельство заслуживает особого внимания, поскольку с увеличением быстродействия за счет увеличения коэффициента усиления неизбежно возникают вопросы обеспечения устойчивости системы.

Кроме того, при стремлении к минимизации массы и повышению быстродействия системы необходимо исследовать режимы работы привода при наличии инерционной нагрузки, жестко связанной с приводом кинематическим звеном (шток, вал и т.п.), упругими свойствами которых в ряде случаев нельзя пренебрегать. Сказанное приводит к увеличению колебательности системы "привод - нагрузка".

Указанная совокупность показателей привода и позволяет сформировать не имеющее четкого определения понятие эффективности.

Эффективность автоматизированной производственной системы характеризуется: стоимостью всех видов оборудования, надежностью технических средств, быстродействием технических средств, количеством обслуживающего персонала, числом управляющих

программ, производительностью, коэффициентом загрузки технологического оборудования, гибкостью, рентабельностью, живучестью, длительностью производственного цикла.

Эффективность средств вычислительной техники характеризуется: объемом памяти, оперативной и запоминающего устройства, качеством визуального отображения, количеством каналов связи, стоимостью. Выражения для показателей эффективности, учитывающие широкий круг действующих на изделие внутренних и внешних факторов, как правило, весьма сложны. Расчет таких показателей требует переработки большого количества информации и поэтому проводится при выборе облика будущего изделия, а также при окончательной оценке технического уровня созданного изделия РКТ.

В процессе разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники используют обычно частные показатели эффективности. Так, например, главным показателем эффективности функционирования системы управления является точность.

В процессе эксплуатации изделия возможны различного вида отказы, приводящие к снижению эффективности. Обусловленное этими отказами снижение эффективности характеризуется надежностью. Таким образом, надежность является более частной характеристикой, чем эффективность.

Наиболее универсальным показателем надежности является вероятность безотказной работы изделия при определенных условиях. Для получения численных значений показателя надежности необходимо определить понятие отказа. Понятие отказа допускает большое разнообразие интерпретаций. Для конкретизации этого понятия вводят понятие условной эффективности, то есть эффективности, полученной при отказе того или иного компонента изделия.

По мере накопления отказов компонентов эффективность изделия снижается. Снижение эффективности может происходить либо постепенно, либо скачком. Примером постепенного снижения эффективности может служить увеличение погрешности позиционирования рулевого привода или системы ЧПУ станка при некритических отказах в системе управления.

В качестве примера скачкообразного снижения эффективности можно привести изменение характеристики резервированной системы при отказе резервных компонентов.

Изделия, эффективность которых при отказе равна нулю, носят название простых. Постепенное снижение эффективности является характерным для сложных изделий. Для определения отказа сложного изделия необходимо задать допустимую границу снижения эффективности. Тогда состояние выхода ее значений за эту границу можно считать отказом. Так, например, может быть задано предельное значение погрешности позиционирования.

Подобные изделия, в которых может быть задана допустимая граница эффективности, называют квазипростыми. Их надежность определяется вероятностью безотказной работы. Однако существует большое число изделий, для которых строго указать границу допустимой области нельзя.

В подобных случаях, когда понятие отказа не определено, используется другая интерпретация показателя надежности. Понятие надежности при этом связывается со свойством изделия сохранять при изменении технического состояния эффективность в течение определенного отрезка времени в определенных условиях. В этом случае в качестве показателя надежности принимается отношение эффективности реального изделия к эффективности идеального изделия. Данный показатель носит также название коэффициента снижения эффективности, а также относительной эффективности сложного изделия.

Таким образом, понятия надежности и эффективности тесно связаны между собой. Что же касается математических методов, то отделить теорию надежности от теории эффективности не представляется ни возможным, ни целесообразным.

**Определение условных эффективностей.** Для таких сложных изделий, какими являются узлы, агрегаты, доминантные системы ракетно-космической техники, получить аналитические зависимости, связывающие снижение эффективности с отказами компонентов, в большинстве случаев затруднительно, что обусловлено большим числом комплектующих компонентов, сложной взаимосвязью между ними, многообразием выполняемых функций и рядом других факторов. Поэтому при практических расчетах надежности и эффективности широкое применение нашли экспертные методы. Эти методы позволяют проводить качественный анализ надежности и эффективности сложных изделий и применяются в основном на стадии проектирования, когда закладывается облик будущей системы.

Под экспертными методами понимают комплекс логических и математико-статистических процедур, предназначенных для получения от специалистов информации, ее последующего анализа и обобщения.

Эксперт при сравнении и оценке возможных вариантов использует определенную систему предпочтения, приписывая каждому из вариантов определенное число.

*Метод ранжирования.* Это простейший экспертный метод. Для сравнения исследуемых объектов необходимо расположить их в порядке возрастания или убывания какого-либо присущего им свойства, или, другими словами, произвести ранжирование.

Ранжирование применяется в случаях, когда:

- необходимо упорядочить какие-либо объекты во времени или пространстве, причем интерес вызывает не сравнение степени выраженности какого-либо их качества, а лишь их взаимное расположение;

- необходимо упорядочить объекты в соответствии с каким-либо качеством, которое не может быть точно измерено по причинам практического или теоретического характера.

При ранжировании эксперт должен расположить объекты в порядке, который представляется ему рациональным, и приписать каждому из них числа натурального ряда - ранги. При этом ранг 1 получает наиболее предпочтительная альтернатива, а ранг  $N$  - наименее предпочтительная. Следовательно, порядковая шкала, получаемая в результате ранжирования, должна удовлетворять условиям равенства числа рангов  $N$  числу ранжируемых объектов.

Однако эксперт не всегда в состоянии указать порядок следования для двух или нескольких объектов, и он присваивает разным объектам один и тот же ранг, в результате число рангов  $N$  оказывается не равным числу ранжируемых объектов  $n$ . В таких случаях объектам приписывают так называемые стандартизированные ранги. С этой целью общее число стандартизированных рангов полагают равным  $n$ , а объектам, имеющим одинаковые ранги, присваивают стандартизированный ранг, значение которого представляет собой среднее арифметическое суммы мест, поделенных между собой объектами с одинаковыми рангами. Так, например, объектам, поделившим между собой второе и третье места, приписывают стандартизированный ранг 2,5 и т.д.

Точность и надежность процедуры ранжирования в значительной степени зависит от количества объектов: чем объектов меньше, тем выше их различимость с точки зрения эксперта.

Метод ранжирования редко используется в чистом виде, чаще всего он сочетается с другими методами, обеспечивающими более четкое различие между объектами. Одним из этих методов является метод непосредственной оценки с некоторыми его модификациями.

*Метод непосредственной оценки.* Этот метод состоит в том, что диапазон изменения какой-либо переменной разбивается на несколько интервалов, каждому из которых присваивается определенная оценка (балл). Задача эксперта заключается в помещении каждого из рассматриваемых объектов или факторов в определенный оценочный интервал в соответствии со степенью обладания тем или иным свойством. Число интервалов, на которое разбивается весь диапазон изменения качества, не обязательно одинаково для каждого эксперта. Кроме того, каждому эксперту разрешается давать одну и ту же оценку двум (или нескольким) качественно различным факторам.

Полученное каждым объектом число баллов используется для ранжирования объектов.

Когда в экспертизе участвует несколько экспертов, для каждого объекта получают усредненную оценку. Для этого нормированные оценки каждого объекта суммируются, а затем полученная сумма делится на число экспертов  $m$ .

*Метод последовательных предпочтений.* Общим недостатком показателей, получаемых на основе суммирования баллов, является то, что недостаток качества по одному из факторов можно компенсировать за счет другого, получая один и тот же результат при различной значимости факторов. Поэтому для повышения эффективности подобных оценок важное значение имеет выявление связи и установление зависимостей между значимыми факторами.

Суммирование баллов, расчет результирующих рангов и оценок должны быть основаны не только на их упорядочении, но и еще на некоторых логических допущениях о зависимостях, используя которые можно обосновано приписывать качественно различным факторам вес в одинаковых единицах по общей шкале.

Процедура последовательных сравнений состоит в следующем. Эксперту представляется перечень факторов, которые необходимо сравнить по их относительной важности, и он производит ранжирование. Наиболее важному фактору придается оценка (вес)  $a_j$ , равная единице, а остальным факторам - оценки между 1 и 0 в порядке их относительной важности. Затем эксперт устанавливает, является ли фактор с оценкой 1 более важным, чем комбинация остальных факторов. Описанная процедура последовательных сравнений продолжается вплоть до  $(n-1)$ -го фактора. Корректировку следует проводить таким образом, чтобы вес факторов, входящих в сумму, остался без изменения.

Определение предпочтений в сложных проблемах при наличии большого числа альтернатив с помощью метода последовательных предпочтений становится затруднительным. В этом случае обычно пытаются разделить исследуемую проблему на ряд более простых проблем, следуя схеме рассуждений, предложенной на рисунке 2, для которых сравнительно просто выявить предпочтения или использовать метод парных сравнений.

*Метод парных сравнений.* Трудности использования ранжирования, непосредственной оценки и метода последовательных предпочтений для сравнения большого числа факторов можно в определенной степени уменьшить, если предложить экспертам произвести сравнение этих объектов попарно, с тем чтобы установить в каждой паре наиболее значимый фактор.

Суть этого метода состоит в том, что общая задача экспертизы разбивается на ряд  $J$  элементарных задач. В каждой элементарной  $j$ -й задаче  $i$ -й эксперт ( $i = 1, n$ ) попарно сравнивает между собой по нескольким показателям важности только два варианта. Результаты сравнения заносятся в матрицу

$A_{ije} = \{a_{ijl}\}$  размерности  $j \times j$ .

Коллегиальность мнений экспертов по каждому показателю  $l$  определяется финальной матрицей  $A_{jl}$ . Используя усреднение матрицы  $A_{jl}$  по всем показателям, вычисляют результирующую матрицу  $A_j$ .

Недостатком рассмотренного метода является его критичность к размерностям. Объясняется это быстрым возрастанием числа парных сравнений при увеличении числа оцениваемых задач, что влечет за собой трудности вычислительного и психологического характера. В связи с этим в случае большой размерности ( $j > 10$ ) представляется целесообразным разбиение оцениваемых задач по группам. При этом экспертиза проводится в два этапа: между группами и затем внутри групп. Тогда приоритет каждой задачи определяется финальным вектором, полученным при проведении сравнения внутри каждой группы.

*Метод, основанный на теории полезности.* Естественным обобщением вышеизложенной методологии построения обобщенного показателя эффективности сложного изделия является переход от дискретного к непрерывному распределению вероятностей условий эффективности, осуществляемый при увеличении числа возможных состояний изделия.

В том случае, когда вероятность каждого конкретного значения условной эффективности определяется экспертными методами, то есть является субъективной вероятностью, приходим к математическому аппарату теории полезности [2]. В соответствии с терминологией этой теории, плотность распределения субъективной вероятности того или иного частного показателя эффективности носит название функции полезности данного показателя. Используется математический аппарат классической теории вероятности. В результате полезность  $p$  независимых частных показателей определяется сверткой вида

$$P(W_1, \dots, W_n) = \prod_{i=1}^n P(W_i)$$

В ряде случаев построение функций полезности оказывается более простым, чем экспертные оценки критичности того или иного отказа. Так, обычно не вызывают затруднений следующие вопросы:

- является предпочтительным большое или маленькое значение частного показателя эффективности;
- является ли функция полезности монотонной или имеет экстремум;
- существенно ли меняется полезность при отклонении показателя от наиболее предпочтительного значения (выпукла или вогнута функция полезности).

Использование субъективной вероятности позволяет решать задачи выбора компромиссных значений частных показателей эффективности. Так, если полезность части показателей монотонно убывает, а части - монотонно возрастает, то обобщенная полезность имеет максимум. Область вокруг максимума определяет компромиссные значения частных показателей эффективности, например, компромисс между надежностью и стоимостью изделия.

Таким образом, экспертные методы нашли широкое применение и являются эффективным средством обеспечения качества и надежности продукции на этапах ее разработки и изготовления.

Рассмотренный комплекс логических и математических процедур позволяет оценить свойства изделия РКТ по сложным и неопределенным факторам, определяющим его эффективность и качество, что, в свою очередь, предоставляет возможность установить основные направления его обеспечения.

### **Библиографический список**

1. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. М.: Машиностроение, 1988. Т.3: Эффективность технических систем/ Под ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. 328 с.
2. Надежность и эффективность в технике: Справочник. Т.6: Экспериментальная отработка и испытания/ Под ред. Р.С. Судакова и О.И. Тескина. М.: Машиностроение, 1989. 375 с.
3. Недайвода А.К. Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. – М.: Машиностроение, 1998. – 240 с.: ил.

### **Сведения об авторах**

Недайвода Анатолий Константинович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н.,  
e-mail:[rassiec@mail.ru](mailto:rassiec@mail.ru)

Рождественский Александр Викторович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.э.н., e-mail:info@itbu.ru