

Базовый подход к идентификации критических технологий: определение важнейших инженерных характеристик изделия

А. А. Романов¹, Д. А. Шпотя²

¹д. т. н., проф., АО «Российские космические системы»

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

e-mail: denis.shpotya@yandex.ru

Аннотация. Обосновывается необходимость идентификации критических технологий. Определение важнейших инженерных характеристик изделия с помощью использования проектного подхода, жизненных циклов изделия (ЖЦИ) и инструментов системной инженерии рассматривается как первый важный шаг перед идентификацией критических технологий. В рамках базового инструмента предлагается использовать традиционный подход «Структурирование функции качества» (СФК), состоящий из четырех фаз (так называемых «Домов качества»). Исследование авторов показало, что идентификация критических технологий возможна в ходе второй фазы СФК. Чтобы выполнить вторую фазу, необходимо сначала выполнить первую, у которой в свою очередь есть существенные организационно-методические недостатки. Преодоление этих недостатков позволило авторам статьи предложить инженерную методику под названием «Усовершенствованное СФК» (далее УСФК). Демонстрация функций УСФК по разработке требований заказчика, численному фиксированию корреляций инженерных характеристик и использованию оценок корреляций в ходе финального ранжирования инженерных характеристик по правилам СФК производится на примере разработки первой стадии ЖЦИ «Замысел» малого космического аппарата (МКА) «Маяк». В итоге ранжирование по УСФК дало отличные от СФК результаты. Анализ результатов СФК и УСФК и их сравнение с реальным ходом разработки МКА «Маяк» подтвердили правильность результатов, полученных по УСФК, и неточность СФК.

Ключевые слова: системный инжиниринг, критические технологии, «Структурирование функции качества», СФК, метод анализа иерархий, МАИ, модель Кано

Basic Approach to Identification of Critical Technologies: Estimation of the Most Important Engineering Attributes of a Product

A. A. Romanov¹, D. A. Shpotya²

¹doctor of engineering science, professor, Joint Stock Company “Russian Space Systems”

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

e-mail: denis.shpotya@yandex.ru

Abstract. This article justifies the importance of identification of critical technologies. Estimation of the most important engineering attributes using the project management approach, product lifecycles (PLC) and system engineering tools is considered to be the first important step before identification of critical technologies. Conventional system engineering instrument Quality Function Deployment (QFD) is emphasized as a basic tool. QFD consists of four phases (so called “Houses of quality”). The authors’ research showed that identification of critical technologies is possible during the second phase of QFD. The second phase must be initiated once the first phase is completed. The first phase possesses organizational and methodological disadvantages. Overcoming these disadvantages allowed the authors to propose an engineering technique named “Improved QFD” (IQFD). The authors describe the development process of the first PLC stage “concept development” of “Mayak” nanosatellite as a demonstration of IQFD functions: development of customer requirements, numeric fixing of correlations among engineering attributes in the House of Quality, utilization of determined weights of correlations during the final QFD ranking of each technical attribute. The IQFD ranking results are different from the QFD results. The analysis of the QFD and IQFD results and their comparison with an actual workflow of “Mayak” nanosatellite engineering verified and validated the correctness of the IQFD results and the inaccuracy of the QFD results.

Keywords: systems engineering, critical technologies, “Quality Function Deployment”, QFD, Analytical Hierarchy Process, AHP, Kano model

Введение

Целью государственной политики Российской Федерации в области развития науки и технологий в настоящее время провозглашен переход к инновационному пути развития на основе избранных приоритетов, к которым отнесены «Космические системы», а в число критических технологий вошли «Технологии создания ракетно-космической техники нового поколения» [1].

Для удержания предприятиями ракетно-космической промышленности передовых позиций в экономике высокотехнологичных производств они должны подтверждать свою высокую эффективность инвестирования ресурсов, а результаты их деятельности соответствовать самым современным требованиям качества и ускорять появление инноваций [2]. Создание отечественных инноваций требует использования опыта прошлых достижений, разработки новых практик и технологий, которые сегодня у нас в стране попросту отсутствуют. Для этого очень важно обеспечить инвентаризацию и учет того, что уже создано, идентифицировать критические технологии и оценить, какому уровню технологической готовности они соответствуют [3].

В 2005 г. Российская Федерация ввела национальный стандарт Р ИСО 15288, идентичный международному стандарту ИСО/МЭК 15288:2002 «Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем». Указанный стандарт определяет 6 стадий жизненного цикла системы (изделия; далее ЖЦИ): а) замысла; б) разработки; в) производства; г) применения; д) поддержки применения; е) прекращения применения и утилизации [4].

Практика показывает, что стадия замысла (включающая разработку требований заказчика и концепции системы) в реальных затратах не превышает 20 % общих затрат на создание системы. В то же время значимость работ, выполненных на данной стадии, достигает 95 %.

В отечественном космическом приборостроении финансирование предпроектных исследований на стадии замысла осуществляется через выполнение научно-исследовательских, а на стадии разработки — путем выполнения опытно-конструкторских работ, которые иногда сосуществуют как два независимых вида деятельности. Очень часто они

даже выполняются различными коллективами, что приводит к снижению качества результатов.

Сегодня должны создаваться продукты с новыми потребительскими свойствами и абсолютно-го качества. Для всего вышеперечисленного необходимо применять проектный подход с учетом стадий ЖЦИ [5]. Указанный принцип декларируется в Федеральном законе РФ «О Государственной корпорации по космической деятельности “Роскосмос”» [6].

С 1967 по 1972 гг. в Японии усердно стремились: а) улучшить качество проектирования, б) обеспечить рабочих и менеджеров *еще до начала* производства общей диаграммой управления процессами по достижению требуемого качества, в) достичь абсолютного качества создаваемых изделий.

Свой успех в этих трех стремлениях они отразили в методике под названием «Структурирование функции качества» (далее СФК). СФК состоит из 4 фаз, так называемых «Домов качества» (далее ДК). Коротко СФК можно охарактеризовать следующим образом. ДК № 1 («Матрица планирования продукта») позволяет перевести предоставленные заказчиком требования («Голос заказчика», ГЗ; «Что») в инженерные характеристики изделия («Голос инженера», ГИ; «Как»). ДК № 2 («Детализация частей изделия») переводит полученные в ДК № 1 ГИ изделия в понятные характеристики частей изделия. ДК № 3 («Планирование процессов») переводит характеристики частей изделия в процессы производства частей с заданными характеристиками. ДК № 4 («Контроль за качеством производства») переводит процессы производства в действия по контролю за качеством процессов производства. В каждой фазе (ДК) выходным продуктом являются элементы «Как», проранжированные с помощью взвешивающих коэффициентов по правилам ДК. В зависимости от целей исследования и глубины его детализации количество фаз («Домов качества»), которые необходимо выполнить, может меняться. Подробнее про широчайшую область применения СФК можно узнать в работе [7] и в аэрокосмических приложениях, например, в работе [8].

Наше исследование (в рамках этой статьи мы говорим о его части) показало, что идентификация

элементов критических технологий может быть произведена на стадии ЖЦИ «Разработка». В СФК этой стадии соответствует ДК № 2. *Входным* продуктом ДК № 2 являются самые важные инженерные характеристики, которые необходимо получить на выходе ДК № 1, правильность которых очень сильно зависит от того, как точно инженеры поняли, «Что» хочет заказчик и «Как» они будут достигать «Что».

Чтобы максимизировать шансы *правильного выбора* самых важных инженерных характеристик, необходимо преодолеть два организационно-методических недостатка ДК № 1:

1. ДК № 1 использует, а не разрабатывает ГЗ: задача инженера понять, что хочет заказчик, лучше, «чем заказчик сам понимает себя». Требования заказчика должны быть как минимум численно проранжированы и в количестве менее 25 позиций. Сам по себе **ДК № 1 не позволяет выделить из множества пожеланий заказчика самые важные требования**. Именно поэтому очень часто в ходе разработки сложного проекта матрицы ДК переполняются ненужными данными, в тоже время упускаются важные [9, 10].

2. В ДК не учитываются корреляции инженерных характеристик в ходе их финального ранжирования по влиянию на достижение ГЗ.

Обзор методов и инструментов

Разработка ГЗ — это многоэтапный процесс качественного и количественного анализа. Единого и общепризнанного инструмента или метода его выполнения нет. Существует общее понимание, что нужно получить, а вот с помощью каких инструментов продвигаться к получению квинтэссенции требований — инженеры решают сами, исходя из своего багажа знаний и конкретной ситуации. Если организация владеет таким набором инструментов — это ее «ноу-хау» и секрет, так как это позволяет находить новые идеи и развивать свою конкурентоспособность.

В 1980 г. Томас Саати предложил Метод аналитической иерархии (далее МАИ) [11]. С появлением ПО для автоматического расчета собственного вектора Yoji Akae (создатель СФК) предло-

жил использовать в СФК подход МАИ. A Ustinovičius и Loniewski в своей работе показали, что МАИ среди прочих аксиоматических, эвристических и группы методов вербального анализа решений (ВАР) является оптимальным инструментом для попарного сравнения и численного ранжирования альтернатив [12]. В 1998 г. Фанг и другие дополнили СФК методом «неточной логики» для выбора в случае неточных измерений (какого-то диапазона значений) самых оптимальных показателей ГИ [13]. Это первые попытки превращения СФК в новую методику. В 2006 г. Цультнер и Мазур использовали в разработке ГЗ модель Кано для создания товаров с привлекательными свойствами и качеством. Эта модель позволяет выявить, достижение каких требований может произвести глубокое впечатление на заказчика [14]. В этих работах и множестве аналогичных [7] *проблемы ДК № 1 СФК решались по отдельности, а не в комплексе*. Существуют наборы инструментов по разработке голоса заказчика от учебных заведений [15] и консалтинговых фирм [16], *но их эффект по описанному в прошлом абзаце причинам оставляет желать лучшего*.

В 2009 г. Д. Маврис и его коллеги развили идею работы Р. Фанга по использованию СФК с другими инструментами и попытались создать сложную систему идентификации критических технологий в интересах США. Но в этой работе ДК СФК не рассматривался как основной инструмент, а идентификация критических технологий осуществлялась за счет применения дополнительных методик, анализа закрытых баз данных и моделирования изделия [17].

Ни в одной из рассмотренных работ в ходе финального ранжирования степени важности достижения той или иной инженерной характеристики *не учитываются корреляции элементов ГИ, так что эта проблема не решена*.

Цель исследования и постановка задачи

Данная статья описывает результаты **первого этапа** исследования по идентификации критических технологий в космическом приборостроении.



Цель первого этапа состоит в разработке базовой основы инженерной методики для правильного определения важнейших инженерных характеристик изделия. Свидетельством правильного определения должна быть успешная разработка космической техники согласно полученных результатов. При разработке методики решались следующие задачи:

- 1) объединение существующих инструментов системной инженерии с ДК № 1 СФК для создания базовой основы инженерной методики;
- 2) иллюстрация на практическом примере разработки космического изделия функций предлагаемой инженерной методики для *разработки ГЗ, численного учета корреляций ГИ* (это недостатки ДК № 1) и использования оценок корреляций в ходе определения самых важных инженерных характеристик изделия;
- 3) верификация и валидация определенных с помощью предлагаемой методики важнейших инженерных характеристик.

Объект исследования, на котором демонстрируются результаты статьи

Функции УСФК демонстрируются на наноспутнике «Маяк» формата CubeSat 3U. Данный МКА разрабатывается с 2014 г. российскими инженерами и готовится к запуску на орбиту в четвертом квартале 2016 г. Финансируется краудфандингом (принцип «с миру по нитке») [18].

Объединения существующих инструментов системной инженерии с ДК № 1 СФК в базовую основу инженерной методики

Далее предлагается базовая методика и иллюстрируется, как на основе ее алгоритма можно преодолеть недостатки ДК № 1.

На рис. 1 представлен предлагаемый нами алгоритм использования рассматриваемых в обзоре литературы инструментов системной инженерии (и некоторых других) для решения поставленных

задач этой статьи. Этот методический подход был нами назван «Усовершенствованное СФК» (УСФК).

Разработка ГЗ начинается с качественного анализа. Согласно предлагаемого алгоритма на рис. 1 было составлено описание проекта и проведено: очное знакомство с заказчиком (этнография [19]), необходимые опросы, интервью, мозговые штурмы и т.п. со всеми сторонами проекта для генерации всевозможных потребностей. Получилось 51 пожелание к МКА.

С помощью вербального анализа и сортировочной таблицы (ВАСТ) были объединены похожие и отсортированы пожелания заказчика по двум группам, «Что делать» и «Как делать» — смотрите на рис. 2 третью и четвертую колонки соответственно (в рамках демонстрации большая часть пожеланий скрыта).

Из «Что делать» (третья колонка) было выделено 6 общих требований заказчика. Остальные пожелания были отнесены к «Как делать» (четвертая колонка). Про них будет рассказано в следующем разделе про разработку ГИ.

Далее эти 6 требований заказчика были ранжированы с помощью модели Кано и МАИ. Демонстрация и сравнение полученных результатов ранжирования шести требований этими двумя инструментами даны в табл. 1.

Таблица показывает, что с помощью предложенных инструментов ранжирования можно одинаково выделять самые жизненно необходимые (согласно Кано это «требуемые») требования. При этом если необходимо численное обоснование, то нужно использовать МАИ, а если надо найти «изюминку», то надежнее Кано.

Разработка «Голоса инженера» и количественная оценка корреляций ГИ

Данный раздел посвящен формированию структуры инженерных характеристик МКА «Маяк» и численному учету корреляций характеристик.

В ходе разработки требований заказчика к МКА «Маяк», инженеры узнали не только что, но и как нужно сделать. Для структурирования ГИ,

п/п	Пожелание заказчика	Общие пожелания к спутнику (Что)	Пожелания относятся к техническому решению, Как реализовать, КА «Маяк»	Причина появления желания — выделения «корня» причины (конкретного требования)
1	Бюджет программы космического эксперимента менее 15 млн руб.			Летный образец должен стоить меньше 700 тыс. руб.
2	Отражатель спутника должен быть довольно большим, чтобы отражения Солнца на Земле тоже были большими			Должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли
3	Спутник должен сиять ярче Сириуса, Веги и Альтаира			Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе
4	Спутник должен быть виден во всех крупных городах Земли			
5	Должен сформироваться каркас тетраэдра правильной формы			Каркас должен держать форму в условиях невесомости, закрутки и вращения
6	Спутник должен быть соединен с солнечным отражателем, чтобы развернуть последний из сложенного в развернутое состояние			Чтобы развернуть и натянуть отражатель в космосе без каких-либо деформаций частей МКА
7	Спутник должен в случае критического воздействия гамма- и рентгеновских излучений, тяжело заряженных частиц (протоны, ионы больших энергий, альфа-частицы) выполнить свои функциональные задачи			Чтобы выполнять свои функции при любых внешних воздействиях
51	Элементы энергопитания не должны загореться или взорваться			Чтобы обеспечить стабильное и безопасное энергопитание

Рис. 2. Вербальный анализ и сортировочная таблица МКА «Маяк»

Таблица 1. Сравнение результатов ранжирования: модель Кано и МАИ

Способ ранжирования	Модель Кано		МАИ	
	Ранг*	Качеств. оценка	Ранг*	Количеств.**
Выполнен из отечественных компонентов	1	Впечатляющее	3	12,85
Спутник должен быть виден с Земли как самая яркая звезда на ночном небе	2	Требуемое	1	41,74
Изготовление летного экземпляра КА, 700 тыс. руб.	3	Требуемое	2	25,13
Формат CubeSat 3u	4	Базовое	6	3,47
Срок орбитального существования более 1 мес	5	Базовое	5	8,30
Обеспечить стабильное и безопасное энергопитание	6	Базовое	4	8,52

* чем меньше число, тем важнее требование относительно других.

** это уже нормализованные значения оценок.

помимо прочих инструментов ДК, были выполнены инструменты под названием «Схема деления работ» и «Схема деления продукта» (СДР и СДП) [20]. СДП и СДР помогли ответственным за подсистемы сгруппировать по подсистемам оставшиеся из ВАСТ пожелания «Как делать», после чего они сделали необходимые корректировки и обобщения. В итоге на 7 подсистем пришлось 22 инженерные характеристики (в следующем разделе на рис. 3 демонстрируются 2 подсистемы и 7 характеристик). Таким образом, в результате использования ВАСТ, СДР, а затем СДП можно составить полное, хоть и начальное представление о функциях и структуре МКА, а также свести все данные о ГИ, получить управляемое количество характеристик (меньше 25).

Далее по СФК приступают к качественной оценке корреляций элементов ГИ, но так как задача этой статьи состоит в количественной оценке корреляций, то для этого в УСФК предлагается применить подход МАИ. Сначала для фиксации корреляций подсистем с точки зрения важности первоочередности инвестирования ресурсов в достижение той или иной подсистемы, а затем для оценки того, как каждая характеристика подсистемы влияет на ее достижение.

Пример заполнения ДК №1 с разработанным с помощью МАИ ГЗ и ГИ представлен на рис. 3 частично из-за ограниченного размера статьи.

Центральная часть ДК

Далее коротко описывается центральная часть ДК СФК. До этой части были выполнены все остальные части ДК №1. Несмотря на то, что они важны, они принципиально не влияют на задачи этой статьи, а метод их использования представлен в работах на портале Института СФК [21].

Рассмотрим каждое требование и характеристику и зафиксируем мнение ответственных за подсистемы относительно того, как достижение каждого требования зависит от реализации каждой характеристики ГИ. Для фиксации степени зависимости используются четыре числовых или графических обозначения: никак = 0 (пусто), слабо = 1 (▲), средне = 3 (○), сильно = 9 (Θ). Демон-

страция результата работы над этой частью ниже на рис. 3.

Расшифруем полученные данные в центральной части ДК на примере зависимости требований заказчика к МКА «Маяк» от достижения первой характеристики подсистемы «Энергоносители». «Мощность». От этой характеристики ГИ зависит 5 из 6 требований (см. рис. 3), перечислим их:

Требование 1. Зависимость Θ — очень сильная — 9.
Требования 2, 3, 4, 5. Зависимость ○ — средняя — 3.

После выполнения центральной части переходят к финальному ранжированию инженерных характеристик в «Доме качества» №1.

Финальный подсчет весов важности инженерных характеристик в ДК

Это последний этап в ДК №1 перед переходом к ДК №2. На этом этапе выделяется, какие характеристики самые важные, а какие менее важные. В этом разделе статьи демонстрируется ранжирование характеристик ГИ по СФК и по УСФК (используя полученные с помощью МАИ количественные оценки корреляций инженерных характеристик). Затем с помощью нормализованных оценок ранжирования элементов ГИ по СФК и УСФК были построены два графика. Анализ графиков и данных, по которым они были построены, а также выводы исследования приводятся в последующих разделах статьи.

Применения количественных оценок корреляций ГИ в ДК (полученных с помощью МАИ) демонстрируются в ходе описания подсчета финальных весов важности элементов ГИ сначала по подходу СФК, а затем УСФК.

Стандартный подход СФК. По формуле (1) мы нашли вес каждой инженерной характеристики, а затем нормализовали результаты.

$$B_j = \sum_i (T_i \cdot a_{ij}), \quad (1)$$

где T_i — нормализованный вес важности ГЗ отдельно взятого требования (у нас они подсчитаны

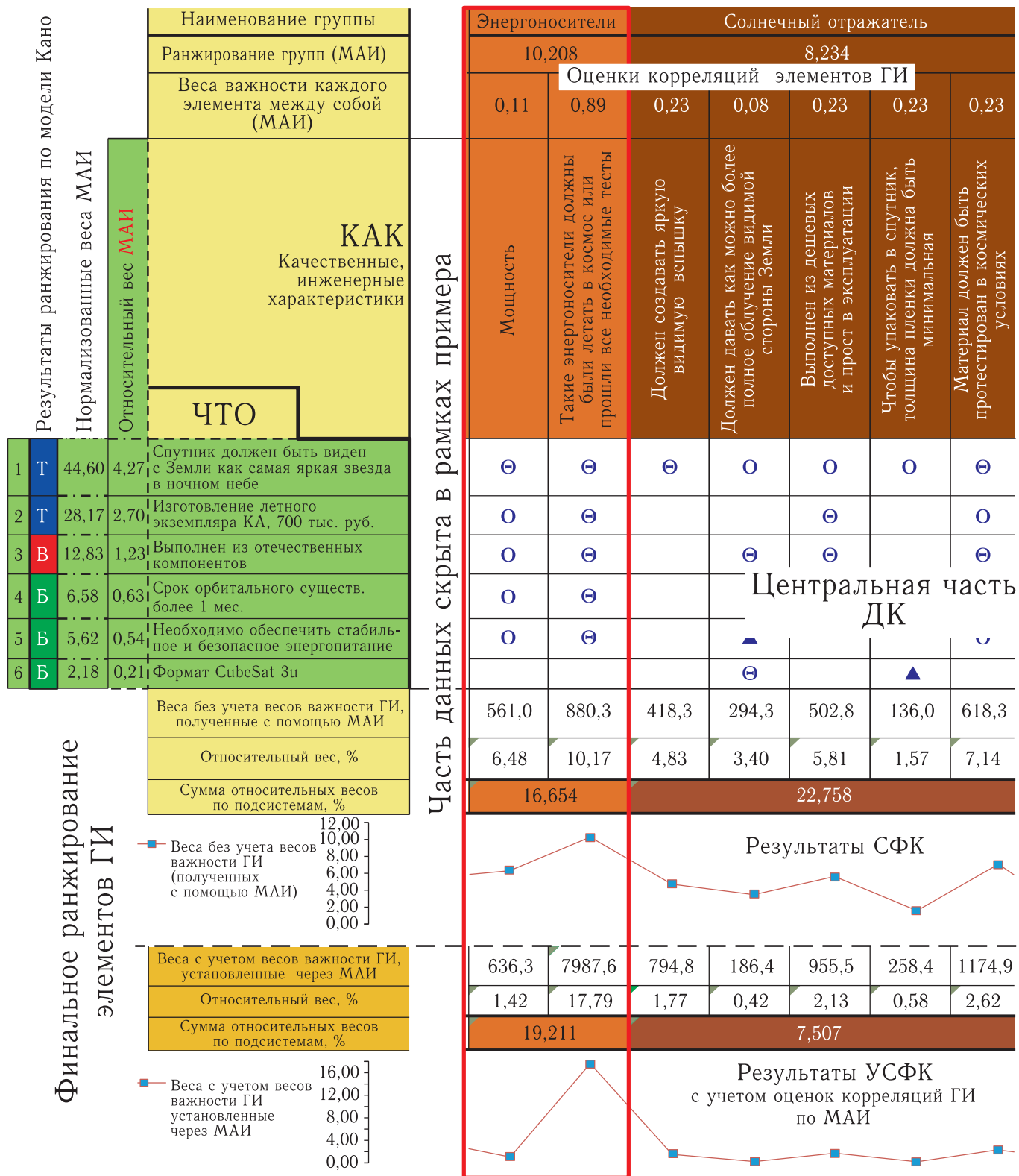


Рис. 3. Демонстрационный пример ДК для сравнения СФК и УСФК

с помощью МАИ); i — все отдельно взятые ГЗ; a_{ij} — коэффициент степени влияния j -й ГИ на i -е ГЗ; B_j — вес важности j -й ГИ.

Продемонстрируем подход СФК на первой характеристике подсистемы «Энергоносители» (см. рис. 3). От этой характеристики зависят требования с 1 по 5, со степенями 9, 3, 3, 3, 3 (рассмотрено ранее в описании «Центральная часть ДК»). Относительные веса важности этих требований: 44,60; 28,17; 12,83; 6,58; 5,62 (см. веса ГЗ в табл. 1 или на рис. 3 в колонке 3). Затем, подставив их в формулу (1): $B1 = 44,60 \cdot 9 + 28,17 \times 3 + 12,83 \cdot 3 + 6,58 \cdot 3 + 5,362 \cdot 3 = 561$.

Получив по этой формуле веса всех элементов ГИ и нормализовав результаты, построили график СФК (на рис. 3 — Результаты СФК).

Предлагаемый подход УСФК. Из формулы (1) видно, что в ДК № 1 СФК не учитываются корреляции ГИ. Дополнив формулу (1) двумя сомножителями, мы получили формулу (2) и смогли преодолеть проблему неиспользования корреляций в финальном подсчете весов важности элементов ГИ в ДК:

$$B_j = \left(\sum_i (T_i * a_{ij}) \right) * (S_{1...n} * e_j), \quad (2)$$

где $S_{1...n}$ — подсчитанная с помощью МАИ оценка корреляции выбранной подсистемы ГИ; e_j — подсчитанная с помощью МАИ оценка корреляции выбранного элемента в выбранной подсистеме.

Таким образом, по формуле (2): $B1 = 561 \cdot 0,1111 \cdot 10,21 = 636,3$ (рис. 3).

Анализ полученных и реальных результатов

Анализ на уровне инженерных характеристик. На рис. 3 видно, что график, построенный по данным УСФК, отличается от графика, построенного по данным СФК. Проанализируем в табл. 2 в рамках подсистем «Энергоносители» и «Солнечный отражатель» (приведенных на рис. 3) результаты ранжирования их характеристик по СФК и УСФК.

Таблица показывает, что по СФК важнее подсистема № 2. А соотношение подсистем № 1 к № 2:

$$(6,48 + 10,17)/(4,83 + 3,40 + 5,81 + 1,57 + 7,14) = 0,73.$$

Вычисление и сравнение соотношений выполняется для того, чтобы оценить равнозначность подсистем и их элементов. Чем ближе коэффициент соотношения между подсистемами к 1, тем сильнее между рассматриваемыми подсистемами взаимосвязь и тем выше их равнозначность с точки зрения первоочередности инвестирования в них ресурсов для развития. Чтобы не запутаться в анализе, рекомендуем в рамках рассматриваемых элементов ГИ делить меньший вес на больший.

По УСФК иной результат. Характеристика «Мощность» была в СФК на 3-м месте, а в УСФК заняла 5-е место, а то, что было на 4-м месте в СФК, в УСФК стало на 3-м. Изменилось соотношение подсистем: 0,34.

Веса инженерных характеристик, полученных по УСФК, свидетельствуют, что на самом деле подсистема «Солнечный отражатель» не так важна, как показывает это СФК, это также отражено на графике УСФК на рис. 3.

Анализ на уровне подсистем. Результаты проведенного выше сравнения говорят о том, что в ходе подсчета финальных весов важности элементов ГИ по правилам ДК опираться лишь на учет того, как зависит достижение ГЗ от реализации элементов ГИ, без числового учета корреляций элементов ГИ между собой (это подход СФК), — некорректно. Это может привести к неправильному планированию ресурсов всего проекта. Подтвердим это на нашем примере МКА «Маяк» в анализе табл. 3, где собраны результаты ранжирования всех подсистем по СФК и УСФК.

Из табл. 3 видно, что по СФК реализация ГЗ лежит через подсистему «Солнечный отражатель». В случае МКА «Маяк» так и инвестировались ресурсы. Предполагалось, что «Солнечный отражатель» надует, тем самым потребность в отдельной подсистеме «Развертывание» отпадала. В результате проводившейся более года работы над проектом инженеры пришли к выводу, что акцент усилий был сделан неверно (созданный солнечный отражатель по разным причинам не держал требуемую форму). Также выяснилось, что по требованиям техники безопасности к КА на ракетноносителе запланированные методы для надува запрещены.

Таблица 2. Сравнение результатов подсчета весов инженерных характеристик в ДК двумя способами: классическим СФК и предлагаемым УСФК

Подход	СФК		УСФК	
Характеристика подсистемы	Веса*	Позиция**	Веса*	Позиция**
Подсистема № 1 «Энергоносители»				
Мощность	6,48	3	1,36	5
Такие энергоносители должны были летать в космос или прошли все необходимые тесты	10,17	1	17,53	1
Подсистема № 2 «Солнечный отражатель»				
Должен создавать яркую видимую вспышку	4,83	5	1,77	4
Должен давать как можно более полное облучение видимой стороны Земли	3,40	6	0,42	7
Выполнен из дешевых и доступных материалов и простых в эксплуатации	5,81	4	2,13	3
Чтобы упаковать в спутник, толщина пленки должна быть минимальная	1,57	7	0,58	6
Материал должен быть уже протестированным в космических условиях	7,14	2	2,62	2

* веса нормализованы. Чем меньше вес выбранной характеристики, тем она менее значима.

** отражает важность характеристики в зависимости от ее веса: чем больше число, тем она менее значима.

Таблица 3. Сравнение порядка ранжирования подсистем МКА «Маяк» по СФК и УСФК

Подход	СФК		УСФК	
Подсистема	Позиция*	Относительные веса подсистемы	Позиция*	Относительные веса подсистемы
«Развертывание»	2	17,597	1	28,927
«Управление»	4	16,595	2	22,639
«Двигатель»	5	10,496	4	17,233
«Энергоносители»	3	16,654	3	19,211
«Солн. отражатель»	1	22,758	5	7,507
«Сил. конструкция»	7	7,742	7	2,250
«Общ. треб.»	6	8,157	6	2,233

* позиция отражает степень важности подсистемы в зависимости от ее веса: чем меньше, тем она значимее.

Потребовалось заново тщательно разработать замысел для четкой формулировки, что нужно сделать и как, а затем проранжировать шаги по реализации задуманного для максимально эффективного инвестирования оставшихся ресурсов.

Использование УСФК показало, что МКА «Маяк» принципиально зависит от подсистемы «Развертывание». Дальнейшая физическая разработка МКА «Маяк» подтвердила результаты УСФК [22], а проделанный системный инжиниринг в ходе

структурирования ДК №2 выявил критическую технологию.

Заключение

Работа посвящена описанию результатов **первого этапа** исследования по идентификации критических технологий в космическом приборостроении. Первый этап заключался в том, чтобы: а) создать базовую основу инженерной методики для определения важнейших инженерных характеристики изделия; б) подтвердить правильность выделения важнейших инженерных характеристик предлагаемой методики результатами разработки реального космического изделия.

Парадигмой предложенной инженерной методики является использование ЖЦИ и проектного подхода. Базой этой методики стал инструмент под названием СФК, дополненный (из-за своих организационно-методических недостатков) в рамках фазы ДК №1 существующими инструментами и практиками: *описание проекта, очное знакомство с заказчиком, интервью, опросы, вербальный анализ, сортировочная таблица, группирующие диаграммы, модель Кано, МАИ, схемы деления работ и продукта*. Эти действия позволили нам предложить название инженерной методики — «Усовершенствованное СФК».

Верификация и валидация функций УСФК по устранению недостатков ДК №1 и определению важнейших инженерных характеристик изделия проведена в ходе выполнения стадии ЖЦИ «Замысел» МКА «Маяк».

В рамках преодоления первого недостатка ДК №1 СФК по алгоритму УСФК (рис. 1) были успешно разработаны: ГЗ (получилось 6 требований из 51 изначально выдвинутого пожелания), структура ГИ (7 подсистем и 22 инженерные характеристики).

Второй недостаток — неиспользование корреляций инженерных характеристик в финальном ранжировании элементов ГИ в ДК №1 — был преодолен в два этапа. Сначала с помощью применения к подсистемам и их характеристикам парных сравнений и ранжирования по методу МАИ были получены количественные оценки корреляций элементов ГИ. Затем полученные оценки по фор-

муле (2) $B_j = (\sum_i (T_i \cdot a_{ij})) \cdot (S_{1...n} \cdot e_j)$ были интегрированы в финальный подсчет весов важности элементов ГИ в ДК №1 по подходу УСФК.

Сравнение результатов ранжирования инженерных характеристик по СФК и УСФК с реальным ходом физической разработки МКА «Маяк» подтвердило, что важнейшие элементы ГИ СФК выделило неправильно, а УСФК — правильно. А именно СФК показало, что МКА «Маяк» надо реализовать через главную подсистему «Солнечный отражатель», разработка которой после года усилий обернулась угрозой ликвидации проекта. А методика УСФК показала, что МКА надо создавать через самостоятельную подсистему «Развертывание», что и было успешно реализовано. Этот факт доказал, что предложенная нами инженерная методика УСФК отличается от СФК, т.е. обладает новизной и содержит в себе научно-техническую и экономическую целесообразность использования в космическом приборостроении.

Одна из задач следующего этапа нашего исследования — идентифицировать элементы критических технологий. Для этого будут использоваться: полученное ранжирование элементов ГИ в ДК №1, ДК №2 (матрица «Детализация частей изделия»), матрица выбора концепции, морфологический анализ, бенчмаркинг, уровни технологической готовности...

Выводы

Фундаментальный принцип СИ утверждает, что сначала необходимо разработать требования, затем зафиксировать функции изделия и тогда можно рассматривать физическую структуру изделия [5].

Процесс разработки ГЗ очень долгий, так как требует участия многих сторон. Использование инженерной методики УСФК, которая учитывает стадии ЖЦИ и проектный подход, позволяет в соответствии с теорией СИ и своего алгоритма выделять не только *пожелания*, но и важнейшие *требования* заказчика к космическому изделию. А использование инструментов УСФК (ВАСТ, СДР и СДП) позволяет составить полное, хотя и начальное представление о функциях и получить ответы

на вопросы: как их реализовать, построить структуру изделия и свести воедино все элементы «Голоса инженера» (подсистемы и их инженерные характеристики).

Интересный результат показало ранжирование требований заказчика с помощью модели Кано и МАИ. В табл. 1 было зафиксировано, что обе модели позволяют одинаково выделять самые жизненно необходимые требования. При этом если требуется численное обоснование выбора той или иной альтернативы, то необходимо использовать модель МАИ, а если задача найти «изюминку», то надежнее использовать модель Кано.

Предложенный в УСФК новый подход применения МАИ к подсистемам и их инженерным характеристикам позволяет численно зафиксировать корреляции элементов ГИ.

Финальный подсчет весов важности элементов ГИ с учетом количественных оценок корреляций (т. е. по методике УСФК) по правилам ДК позволяет получить не только более точные, но и кардинально отличные результаты ранжирования элементов ГИ, чем если проводить ранжирование по подходу СФК, который не учитывает корреляции инженерных характеристик.

Опыт этого проекта и результаты использования предложенной инженерной методики УСФК свидетельствуют: чтобы максимизировать шансы успешной реализации проекта, очень важно тщательно проводить системный инжиниринг и определять важнейшие инженерные характеристики на стадии ЖЦИ «Замысел».

Результаты данной работы были доложены на научной конференции МФТИ, где доклад был удостоен диплома.

Благодарим инженеров МКА «Маяк» за сотрудничество и предоставленную информацию.

Список литературы

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий РФ. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899. [Сайт администрации президента РФ]: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/41d38565372e1dc1d506.pdf>
2. Product brief dev. tools. QFD. University of the Aegean. Dep. of Financial and Management Engineering: http://www.fme.aegean.gr/sites/default/files/cn/quality_function_deployment.pdf
3. Definition Of Technology Readiness Levels. Официальный сайт NASA: http://esto.nasa.gov/files/TRL_definitions.pdf
4. Гос. портал: <http://www.gost.ru>
5. Романов А. А. Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 556 с.
6. О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». Федеральный закон РФ от 13.07.2015 № 215-ФЗ
7. Lai-Kow Chan, Ming-Lu Wu. Quality function deployment: A literature review // European Journal of Operational Research, 2002, 143, 463–497. <http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas/Desenvolvimento%20do%20Produto/Artigos%20PDF/prodlate%20pg%20-%20-%2017.pdf>
8. Abstracts 1989–2014. Symposium on QFD. Официальный сайт Quality Function Deployment Institute: http://qfdi.org/books/abstracts_1989-today_QFD_transactions.pdf
9. Tsai Y.C., Chin K.S., Yang J.B. A Hybrid QFD Framework for New Product Development. Department of Manufacturing Engineering and Engineering Management, City University of Hong Kong: https://phps.portals.mbs.ac.uk/Portals/49/docs/jyang/JoyceChinYang_QFD_in_AJQ.pdf
10. Richard Y.K.Fung, Popplewell K., Xie J. An intelligent hybrid system for customer requirements analysis and product attribute targets determination // Int. j. prod. res., 1998, vol. 36, no. 1, 13 ± 34. Источник проверен 24.01.2016. <http://faculty.math.tsinghua.edu.cn/~jxie/papers/IJPR1998.pdf>
11. Saati T. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993.
12. Ustinovičius L., Loniewski K. Вербальный анализ решений. Журнал *Ekonomia i Zarzadzanie*: электронный журнал, 2013 № 2. http://www.zneiz.pb.edu.pl/data/magazine/article/280/3.4_ustinovicius_loniewski.pdf
13. Richard Fung Y.K., Popplewell K., Xie J. An intelligent hybrid system for customer requirements analysis and product attribute targets determination // Int. J. prod. res., 1998, vol. 36, no. 1, 13 ± 34.

- Сайт Tsinghua University, Department of Mathematical Sciences:
<http://faculty.math.tsinghua.edu.cn/~jxie/papers/IJPR1998.pdf>
14. *Zultner Richard E., Mazur Glenn H.* Quality function deployment optimization with kano's model. Transactions from the eighteenth symposium on quality function deployment. December 2, 2006. Официальный сайт QFD Institute:
http://www.mazur.net/works/Zultner_Mazur_2006_Kano_Recent_Developments.pdf
 15. *Gaskin S.P., Griffin A., Hauser J.R. et al.* Voice of the customer. Официальный сайт Massachusetts Institute of Technology: http://web.mit.edu/hauser/www/Papers/Gaskin_Griffin_Hauser_et_al%20VOC%20Encyclopedia%202011.pdf
 16. Customer-Inspired Design: Applying Voice of the Customer to Improve New Product Success Rates. Официальный сайт Silicon Valley Product Management Association http://svpma.org/eventarchives/SVPMA-07-2003-Voice_Of_Customer-Stanley_Baginskis.pdf
 17. *Ender T.R., McDermott T., Mavris D.* Development and Application of Systems Engineering Methods for Identification of Critical Technology Elements During System Acquisition. Электронная библиотека: http://www.academia.edu/16965330/Development_and_Application_of_Systems_Engineering_Methods_for_Identification_of_Critical_Technology_Elements_During_System_Acquisition
 18. Космический спутник «Маяк». Официальная страница проекта МКА «Маяк» на портале Boomstarter: https://boomstarter.ru/projects/shaenko/kosmicheskij_sputnik_mayak
 19. *Case M.J., Light G.* Emerging Methodologies in Engineering Education Research, Journal of Engineering Education January 2011, vol. 100, no. 1. P. 186–210, <http://www.jee.org>
 20. Systems Engineering Handbook. NASA/SP-2007-6105 Rev1. NASA.
 21. House of Quality (QFD) Tutorial. Официальный сайт QFD Institute: <http://www.qfdonline.com/qfd-tutorials/house-of-quality-tutorial>
 22. Официальный сайт разработки МКА «Маяк»: <http://cosmomayak.ru/technology>