

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОГНИТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 629.7.01

Научная статья

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495



Особенности формализованной технологии концептуального проектирования в авиастроении

© 2023, Е.Б. Скворцов, А.В. Бондарев, В.М. Коноплева, О.В. Сонин,
М.Н. Чанов, А.С. Шелехова ✉

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского («ЦАГИ»),
Жуковский, Россия

Аннотация

Статья посвящена общим вопросам формализации проектирования и практическим методам разработки концептуального проекта в гражданском авиастроении. Рассмотрены замысел проекта и последовательное выполнение этапов разработки концепции проекта. Особое внимание уделено маркетингу и обоснованию стратегии проекта. Показана важность метода анализа идей для концепции разрабатываемого проекта. В задаче синтеза технической системы представлен подход к согласованию её элементов и риск-анализ критических характеристик проектируемого гражданского самолёта. Описан процесс валидации разрабатываемой концепции проекта самолёта посредством экспериментальных аналогий. Представленная методология впервые разработана в качестве завершённой технологии полного цикла концептуального проектирования гражданских самолётов, научные результаты которой позволят исключить риски ошибочного выбора технической концепции и её несоответствия техническому заданию.

Ключевые слова: проект, самолёт, концепция, маркетинг, стратегия, анализ идей, синтез системы, аналогии концепции.

Цитирование: Скворцов Е.Б., Бондарев А.В., Коноплева В.М., Сонин О.В., Чанов М.Н., Шелехова А.С. Особенности формализованной технологии концептуального проектирования в авиастроении // Онтология проектирования. 2023. Т.13, №4(50). С.479-495. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495.

Благодарности: авторы выражают благодарность ведущему инженеру ЦАГИ С.В. Шелеховой за помощь в оформлении рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В работе [1] представлены теоретические основы управления разработкой технических концепций в области авиастроения. На основе теории множеств, векторного анализа и теории систем разработаны формально-логические модели последовательных этапов, составляющих процесс концептуального проектирования согласно техническому заданию (ТЗ) с повышением уровня готовности технологий (УГТ, см. рисунок 1). Показано, что управление проектом неотделимо от управления техническими рисками.

Настоящая работа посвящена практическим приёмам технологии проектирования с их научным обоснованием. Представлено описание основных задач этого технологического процесса, принятых методов работы и применяемых средств. Изложение связано с названными этапами выполнения концептуального проекта и может рассматриваться как дополнение к их теоретическим основам.



Рисунок 1 – Этапы разработки концептуального проекта [1]

1 Замысел проекта

Цель этапа – оценить потребность в новом проекте и обосновать ТЗ на его осуществление. Источником знаний на этапе являются результаты различных исследований, которые выполняются специальными методами, объединёнными в согласованную систему или единый план получения знаний, необходимых для обоснования и инициации проекта самолёта (см. рисунок 2). При создании нового летательного аппарата (ЛА) требуется кооперация множества предприятий и продолжительное время разработки до момента освоения его в эксплуатации (см. рисунок 3).

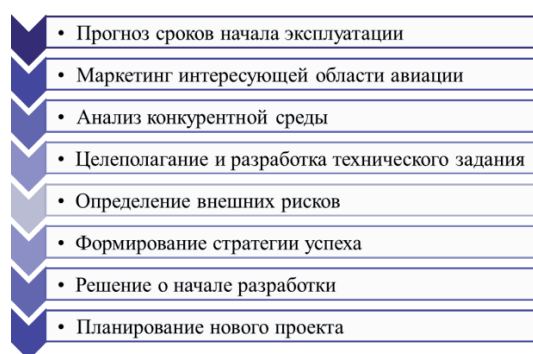


Рисунок 2 – Этапы и методы формирования замысла проекта

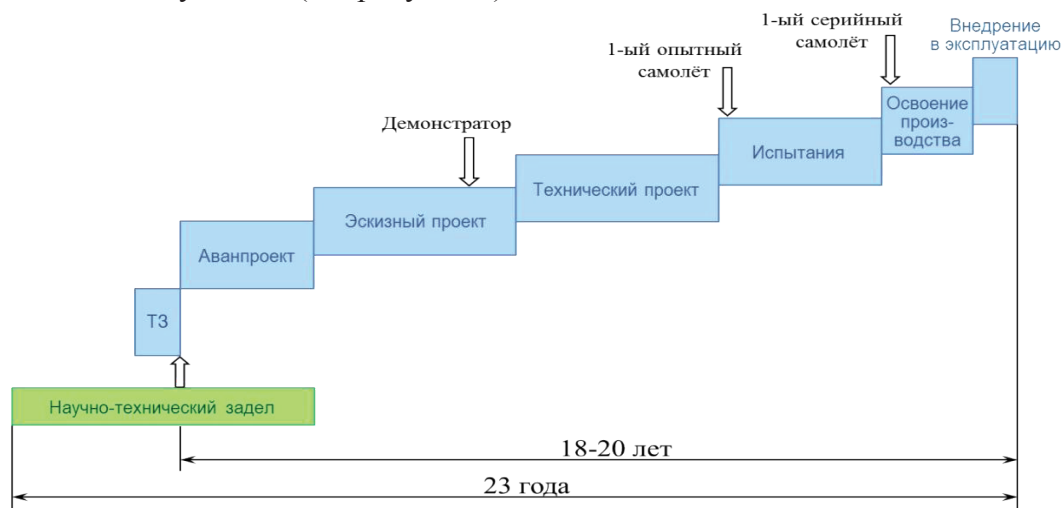


Рисунок 3 – Полномасштабный проект создания нового самолёта

Прогнозируя отдалённое будущее, сложно оценить конкретные условия применения нового самолёта, поэтому проект должен опираться на достоверные сведения, полученные с учётом неопределённостей и рисков его жизненного цикла (ЖЦ).

Объективный маркетинг. В гражданской авиации первоочередным является исследование будущего рынка воздушных перевозок и возможного состояния парка воздушных судов (ВС). Интересы данной работы сосредоточены на выполнении задачи, смысл которой заклю-

чён в одном из лозунгов Ф. Котлера: «Производите то, что можете продать, вместо того, чтобы пытаться продать то, что можете произвести» [2].

Как правило, авиационная техника (АТ) создаётся за счёт или с участием бюджетных средств. Стремясь получить внешнее финансирование, предприятия-разработчики предлагают проекты создания новых изделий, а в обоснование их целесообразности приводят данные консалтинговых фирм и иных организаций, специализирующихся на прогнозных исследованиях. Такой подход не гарантирует достоверной оценки. Объективный прогноз возможен только на основе достоверных статистических данных и знания законов развития рынка [3].

Стратегия успеха. Показанные на рисунке 2 методы формирования возможной стратегии проекта в литературе имеют различные описания. Так, в теории игр [4] стратегией называют правило поведения стороны, участвующей в игровой ситуации. Известна типовая процедура долгосрочного стратегического планирования [5], когда определена отдалённая цель, достижение которой соответствует интересам лица или группы лиц, принимающих решения (ЛПР), и возникает необходимость в продолжительном плане её осуществления. Аналогичный смысл заключён и в стратегии маркетинга [2]. Понятие стратегии в военном деле означает принятие особых мер, уменьшающих риски поражения и увеличивающих шансы победы над противником. Такой подход наиболее близок к задачам проектирования изделий. Это позволяет предложить следующее определение.

Стратегия – это условие успеха проекта, предусмотренное концепцией создания нового продукта и принятое в качестве идейной основы его будущих преимуществ, включая готовность к противодействию антагонистическим проектам. Выбор стратегии – важная задача в технологии концептуального проектирования, где технология – это система знаний о способе создания нужного продукта.

Способ – это сочетание преобразовательных действий (приёмов, операций), режимов их осуществления и необходимых для этого средств, обеспечивающих полезный эффект. В концептуальном проектировании преобразовательными действиями являются этапы анализа, синтеза и аналогии (рисунок 1). По своему значению в проектной деятельности стратегия сопоставима с выбором благоприятного режима – нужной температуры обжига, скорости резания, катализатора реакции или давления инструмента в производственных технологиях для улучшения производительности труда и качества продукта.

Главными в стратегии являются решения, направленные на обретение преимуществ нового проекта на этапах ЖЦ, следующих за разработкой. При этом задача обоснования стратегии не может быть формализована. Изобретательность и кругозор авторов стратегии, способность предвидеть условия применения разрабатываемого продукта определяют привлекательность проекта.

При управлении проектом принимаются стратегические решения с целью сделать «как лучше». Так, известен ряд стратегий, основанных на прошлых проектах. Например, важным условием расширения производства и уменьшения цены на продукцию является унификация агрегатов транспортных и пассажирских самолётов. Примером эффективной стратегии являются самолёты Ан-24/Ан-26. Унификация пассажирского и грузового самолётов в условиях совместного производства позволяет по расчётам вдвое увеличить серийность производства и снизить стоимость изделия на 25%, что существенно улучшает его продажи. Другим примером может служить унификация узлов и агрегатов самолётов Ту-204/Ту-334, Ил-18/Ил-38 и др. Стратегия унификации в задачах проектирования модификаций самолёта проявляется в наложенных на конструкцию требованиях к агрегатам и узлам для вариантов их применения, а также к соблюдению нормативных актов различного назначения. Действие стратегии не заканчивается эксплуатационными испытаниями изделия, а продолжается в серийном производстве и длительной эксплуатации самолёта.

Таким образом, стратегия – это забота о будущей пользе разрабатываемого изделия, расширяющей области его применения, продлевающей его ЖЦ и уменьшающей стоимость ЖЦ. Хотя сегодня эта деятельность не нормируется никакими требованиями или регламентами, управление проектом должно уделять ей первостепенное внимание, а принятые решения фиксировать наравне с ТЗ при разработке Замысла проекта.

2 Теоретические основы концептуального проектирования

Концептуальное проектирование - это начальная фаза проекта, итогом которой является определение полезных для объекта идей и соответствующих технологий, подлежащих дальнейшей разработке на конструкторской и производственной стадиях (таблица 1).

Таблица 1 – Технологический цикл проекта – от идеи до внедрения в эксплуатацию

Программа создания продукта	Шкала УГТ	Контрольные события
А. Стадия разработки концепции и технологий продукта	1	Выбор фундаментальных принципов, составляющих концепцию продукта
	2	Определение технологий, ключевых в концепции продукта
	3	Аналитическое и экспериментальное подтверждение характеристик, критических для концепции продукта
В. Стадия конструкторской разработки и демонстрации продукта	4	Проверка элементов системы в лабораторных условиях
	5	Проверка элементов системы в натуральных условиях
	6	Демонстрация модели системы/подсистемы в натуральных условиях
С. Стадия производства и ввода продукта в эксплуатацию	7	Демонстрация прототипа системы в натуральных условиях
	8	Проверка реальной системы в условиях испытаний и демонстрации
	9	Проверка реальной системы в условиях эксплуатации

В работе [1] формализованы понятия концепции, принципа, идеи и системы, которые позволяют построить логико-математическую модель проектирования на языке теории множеств и векторного анализа. Деятельность проектанта отвечает ТЗ, которое включает множество требований к объекту в виде связей и ограничений, где определённые значения, составляющие цель Z , включают:

$$Z \subset N_p \times N_r \times N_e, \quad (1)$$

N_p – множество ожидаемых воздействий от среды обитания;

N_r – допустимое множество используемых ресурсов;

N_e – множество потребных полезных эффектов объекта.

Под *концепцией* \vec{K} понимается сочетание актуальных для цели проекта принципов действия ($\vec{Q} = \vec{\lambda}_u \cdot Q$), устройства ($\vec{V} = \vec{\lambda}_x \cdot V$) и формы ($\vec{F} = \vec{\lambda}_g \cdot F$)

$$\vec{K} \subset \vec{V} \times \vec{F} \times \vec{Q}. \quad (2)$$

Принципы – это свёртки логически связанной информации, направленной на достижение цели. Направления векторных принципов определяются идеями $(\vec{\lambda}_x, \vec{\lambda}_g, \vec{\lambda}_u)$, а их скалярное содержание (V, F, Q) описывают системы, моделирующие объект.

Идея – это мыслеобраз, логическую суть которого субъект осознаёт и представляет как перспективу для изучения и применения. Идеи образуют сумму единичных векторов и формируют векторное *имя* концепции (здесь «имя» - сочетание идей)

$$\vec{\sigma} = \{(\vec{\lambda}_x, \vec{\lambda}_g, \vec{\lambda}_u) | \vec{\lambda}_x \in \vec{V} \wedge \vec{\lambda}_g \in \vec{F} \wedge \vec{\lambda}_u \in \vec{Q}\}. \quad (3)$$

Здесь принцип действия \vec{Q} содержит информацию об организации объекта: множестве динамических элементов $u \in Q$, которыми являются взаимодействующие в общем технологическом процессе способы функционирования $Q \subset M_u$, отличающиеся такими признаками, как приёмы, режимы, последовательность и условия выполнения операций, реализующих отдельные программы управления.

Принцип устройства \vec{V} содержит информацию о внутренней структуре объекта: множестве статических элементов систем $x \in V$, которые представляют собой детали, узлы, агрегаты, изделия и др. $V \subset M_x$, предназначенные для выполнения технологических процессов. Устройства как структурные единицы могут отличаться материалом, размерами, архитектурой и другими параметрами состояния.

Принцип формы \vec{F} содержит информацию о границах объекта и его элементов. Универсальной информацией (геометрической) обладают схемы и чертежи, которые характеризуют плотность распределения материала в пространстве и пограничную область взаимодействия с внешней средой $g \in V \subset M_g$.

Эндосистема, или объектовая модель S_0 , представляет объект обособленно от среды обитания и описывает его внутреннее содержание:

$$S_0 \subset V \times F \times Q. \tag{4}$$

При этом скалярные компоненты эндосистемы входят в состав концепции независимо друг от друга как факторы решения частных задач достижения цели. Их роль состоит в представлении идей на скалярном поле фазовых параметров. Декартово произведение скалярных компонентов эндосистемы образует упорядоченные тройки фазовых параметров (x, g, u) , связанные векторным именем концепции:

$$S_0 = \{(x, g, u) | x \in V \wedge g \in F \wedge u \in Q\}. \tag{5}$$

Связи объекта со средой обитания характеризуются экзосистемой:

$$S_z \subset R \times P \times E, \tag{6}$$

где R, P, E – соответственно множества, составляющие модели ресурсов, внешних нагрузок и полезных эффектов.

Связь субъекта проектирования D с информацией об объекте S_0 и экзосистемой S_z определяется функциональной системой, моделирующей управление творческим процессом со стороны ЛПП (рисунок 4):

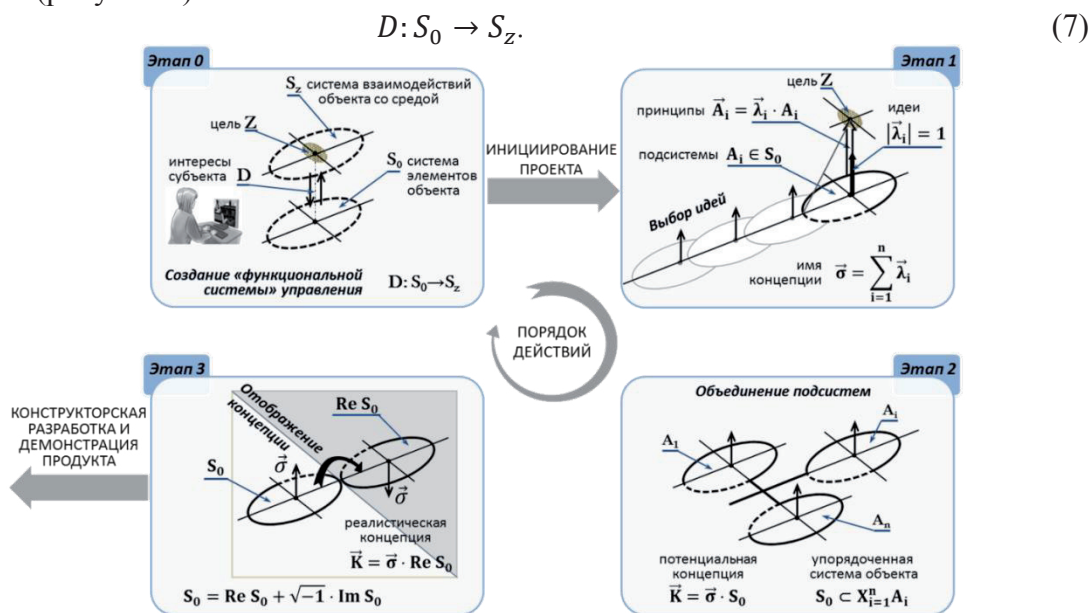


Рисунок 4 – Модели управления концептуальным проектом

Здесь экзосистема S_z служит для измерения целевых показателей (6) и получения информации для принятия решений. Объектовая эндосистема S_0 содержит результаты целенаправленных усилий ЛППР при том, что конечная цель процесса проектирования заключена в более содержательной векторной модели концепции с направляющими идеями. Поэтому выражение (7) предполагает $D = D(\vec{\sigma})$. Таким образом, в соответствии с интересами (1) и полезными идеями (3) ЛППР решает задачу разработки технической концепции.

3 Анализ идей

Начало концептуального проектирования (рисунок 1) следует за подготовкой ТЗ, в котором сформулированы цель и задачи проекта, и разработкой стратегических идей, включённых в замысел проекта.

Первый этап проекта с достижением УГТ1 [6] посвящён выбору векторного имени концепции (3) - рационального сочетания идей технической концепции из числа возможных для достижения поставленной цели (см. рисунок 5). Анализ идей невозможен без их образного представления. В проектной деятельности необходимо иметь наглядные представления о предмете, которым интересуется ЛППР [7]. Известны два способа творческого мышления:

Интуитивный, как способность к озарению, т.е. к одномоментному осознанию сути искомого решения. Интуиция проявляется в *образном мышлении* на основе воображения, эмпатии и опыта. Возникшие мыслеобразы представляются без деталей, как одно целое, как ожидаемое знание из неопределённого источника, полученное в результате интеллектуального напряжения.

Логический, как способность создавать понятия, суждения и умозаключения, оперировать методами анализа, синтеза, аналогии, индукции и т.д.

Решение творческой задачи приводит сначала к появлению мыслеобраза (из памяти или благодаря воображению), а затем к его интерпретации и логической трансформации. Для решения проектных задач ЛППР должно обладать хорошей интуицией и развитым образным мышлением. Для управления проектом ценным качеством является способность ЛППР организовать коллективное мышление. Ожидаемым результатом общения сотрудников могут стать полезные идеи для решения поставленной задачи и коллективный выбор лучшей из них, что снижает риск субъективной ошибки.

Технический облик (ТО). От мыслеобраза к ТО самолёта необходим логический переход, использующий опыт ЛППР и других специалистов. Выражением полезных идей ЛППР являются проектные признаки, которые должны быть выбраны при формировании ТО. При этом проектанту необходимо составить непротиворечивое объединение проектных признаков, отражающих нужное сочетание идей и образующих первичную объектовую систему с учётом известных правил проектирования самолётов [8, 9] и типовых проектных решений.

Слово «облик» в НИИ и ОКБ отрасли означает нечто большее, чем просто внешний вид. В данной статье *облик* – это простая модель технической системы, содержащая внешне отлич-

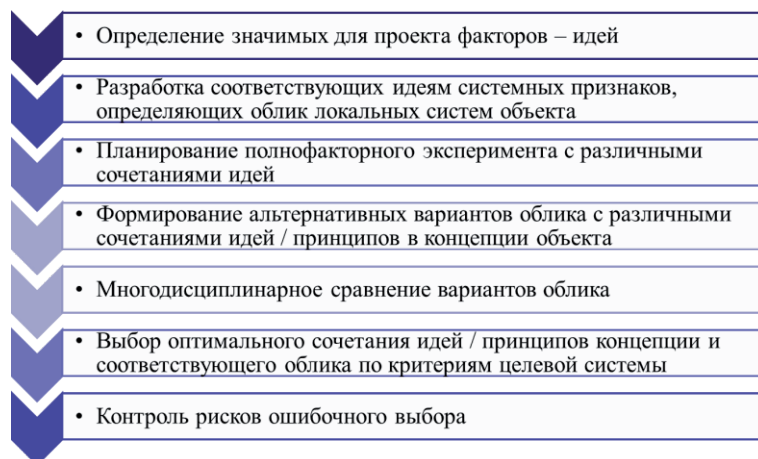


Рисунок 5 – Этапы и методы анализа идей

чимые проектные признаки объекта, дающие представление о его конфигурации и особенностях основных элементов. По смыслу ТО совпадает с понятием *схема* – это упрощённое изображение, строение чего-либо в общем виде, знаковое описание логической модели и иные формы лаконичного представления сути дела. Это позволяет определять информационное содержание ТО как протосистему в качестве первичной системы S_0 (1).

Протосистема S_0 и последующие, более содержательные в своём развитии эндосистемы объекта, образуют скалярную величину векторной концепции объекта. Направление её определяется векторным именем концепции \vec{c} , рациональный состав которого заранее неизвестен и подлежит разработке. Для решения этой задачи ЛПР привлекает новые идеи, предположительно более эффективные, чем известные. Рассматриваются различные комбинации тех и других идей, каждая из которых находит своё выражение в соответствующем ТО объекта.

Разработка множества альтернативных вариантов возможного облика самолёта, отвечающих одному ТЗ, служит решению задачи прямого поиска идей рациональной концепции. Возможные варианты подвергаются многодисциплинарным исследованиям с целью их сравнения и выбора лучшего. Для этого анализа служат полуэмпирические инженерные методики, руководства для конструкторов и САПР с программами многодисциплинарного расчёта характеристик, адаптированными для ЛА определённого назначения, например [10].

Для наглядного представления результатов многодисциплинарных расчётов определяются потребные размеры самолёта и формируется его ТО (рисунок 6). Содержание такой протосистемы достаточно, чтобы определить основные свойства объекта исследования, образующие его экзосистему S_z .

Сравнение вариантов. Этап «Анализ идей» не предполагает непосредственного сравнения единичных векторов $\vec{\lambda}_i$, т.к. они безразмерны. Сравнение происходит опосредованно – на основе мыслеобразов с логическим построением ТО, каждый из которых отражает несколько идей, составляющих имя концепции. На рисунке 4 такое сравнение показано в векторной форме, а на рисунке 7 - в предметной. Например, варианты самолёта могут быть построены на идеях применения силовых установок различного типа и компоновки. В представленных вариантах чередуются две пары принципов, предусматривающих двигатели ТВВД или ТРДД (варианты 1 и 2), планер интегрального или федеративного типа (3 и 4).

При использовании n идей количество вариантов в сравнении должно составлять не менее числа 2^n [12]. Тогда построенная с участием новых n идей из 2^n ТО траектория поиска гарантированно содержит рациональную концепцию с наилучшими характеристиками.

Трудоёмкий процесс разработки и изучения множества технических обликов создаёт «сопротивление» случайному, необоснованному выбору. Проведение полнофакторного эксперимента с полезными идеями и всеми возможными техническими обликами исключает неполноту рассмотрения и риск ошибки, гарантирует 100%-ый успех поиска рационального

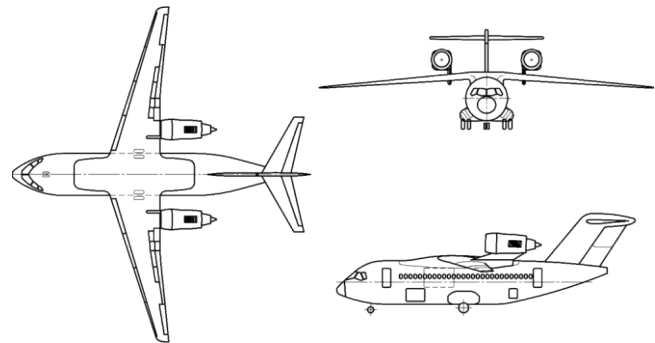


Рисунок 6 – Технический облик самолёта (пример)

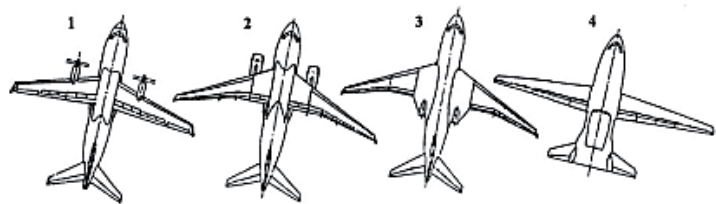


Рисунок 7 – Возможные варианты транспортного самолёта [11]

решения проектной задачи с апробацией n – конкретных новых принципов в концепции самолёта (на рисунке 8 пример для $n=3$). Рассмотрение 1-2 вариантов из числа возможных может удовлетворить их автора, но делает успех проекта маловероятным. Отметим, что большая трудоёмкость «Анализа идей» ограничивает практическую сложность этой задачи.

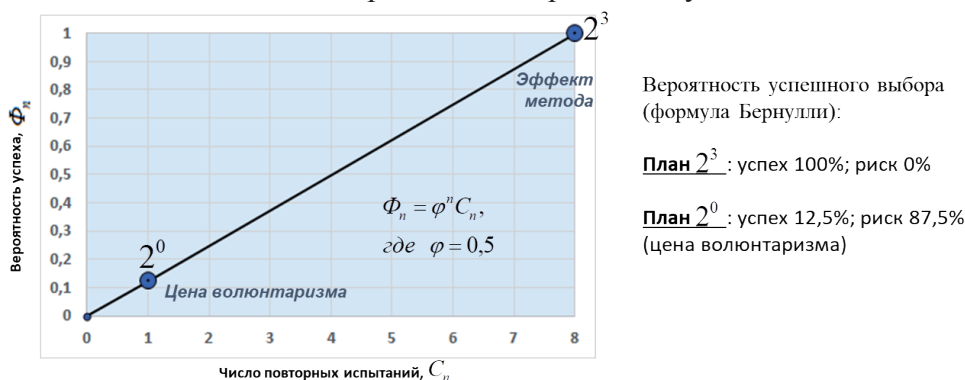


Рисунок 8 – Планирование проектного эксперимента [12]

Принятое на Этапе 1 решение по выбору объекта с наилучшим сочетанием идей сохранится неизменным до Этапа 3 концептуального проекта:

$$\vec{\sigma}(1) = \vec{\sigma}(2) = \vec{\sigma}(3) = const. \quad (8)$$

При этом концепция объекта на Этапе 1 не является ни полноценной, ни завершённой. Причина в том, что модель объектовой протосистемы $S_0(1)$, представленная в ТО самолёта, далека по своему содержанию от многоуровневого и многодисциплинарного описания объекта S_0 , которое позволит довести концепцию до уровня технического предложения: $S_0(1) < S_0(2) < S_0(3)$. По окончании Этапа 1 устраняется риск применения ошибочных идей, хотя и сохраняется неопределённость состава и свойств элементов системы в выбранной концепции самолёта (рисунок 9).



Рисунок 9 – Управление рисками на этапах концептуального проектирования

4 Синтез системы

Цель Этапа 2 состоит в построении внутренне упорядоченной объектовой системы и оценке её осуществимости. Исходными данными для проектирования объекта с достижением УГТ2 являются требования к самолёту, его ТО и др. данные, полученные ранее. Ввиду сложности объектовой системы требуется её углублённое изучение с учётом влияния, которое оказывают свойства элементов на выполнение ТЗ. В этой деятельности компоновочные исследования играют центральную роль для разработки общей геометрической модели. Что-

бы сформировать математическую модель (ММ) самолёта, необходимо получить рекомендации профильных специалистов. Объединяя предложения экспертов, участвующих в проекте, создаётся интегрированная база данных. Проектант даёт геометрическую интерпретацию поступивших предложений, формируя трёхмерную ММ поверхности объекта вместе с внутренней компоновкой (пример см. рисунок 10). Составленная трёхмерная геометрическая модель самолёта используется в различных исследованиях, на её основе генерируются сетки для аэродинамических и прочностных расчётов.

Для синтеза технической системы в соответствии с выбранным сочетанием идей применяются метод согласования проектных параметров эндосистемы S_0 и метод риск-анализа характеристик экзосистемы S_z .

Метод согласования. На Этапе 2 предусмотрена детализация объектовой системы, выбор условий согласования локальных систем, их оптимизация по выбранным критериям эффективности, а также формирование компоновки агрегатов объекта и выбор их рациональных параметров (см. рисунок 11).

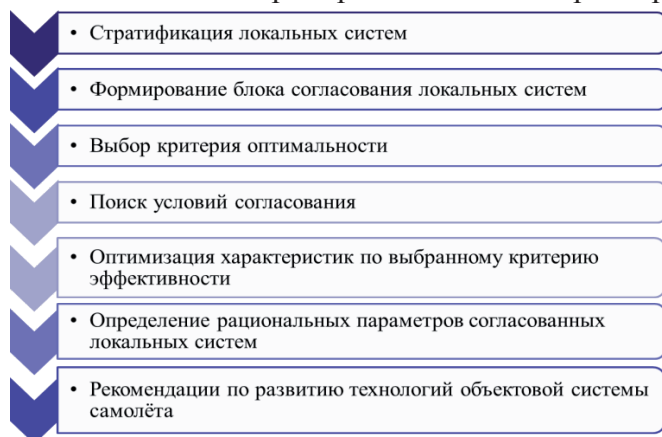


Рисунок 11 – Методы согласования элементов объектовой системы

условие и есть согласующий фактор, выбор которого должен обеспечить максимальную дальность $\bar{L}_{кр}$. В результате решения задачи определяется оптимальная степень двухконтурности ($m_0 = 4.5$) и вариант профилировки крыла с аэродинамической круткой (рисунок 13). Согласование подсистем объекта выполняет объединяющую функцию при формировании его геометрической модели и упорядочении объектовой системы данных.

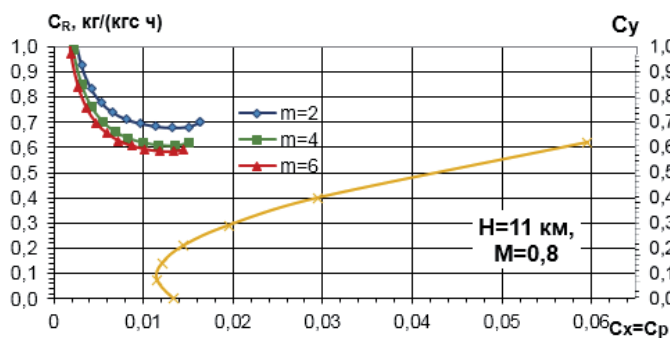


Рисунок 12 – План согласования аэродинамики планера с параметрами двигателя

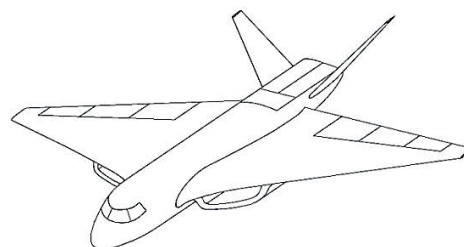


Рисунок 10 – 3D модель регионального самолёта [13]

В примере на рисунке 12 рассматривается взаимодействие двух основных агрегатов в системе самолёта – планера и двигателей. Их технические модели параметризуются в диапазоне, который может содержать глобально оптимальные значения важнейших параметров. В данном случае это степень двухконтурности (m) ТРДД и особенности аэродинамической компоновки крыла. Составляется план согласования разнородных параметров по условиям крейсерского полёта, когда тяга двигателей (C_p) должна уравнивать силу аэродинамического сопротивления ($C_x = C_p$). Это

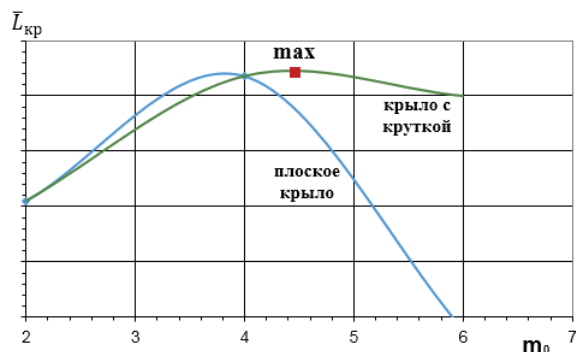


Рисунок 13 – Результат согласования степени двухконтурности двигателя и профиля крыла

Метод риск-анализа на Этапе 2 позволяет измерить степень неопределённости расчётных характеристик системы и оценить риски применения отдельных технических решений. Путём верификации при сравнении с ТЗ выделяются критические характеристики, требующие уточнения технологий создания новой АТ, чтобы гарантировать выполнение ТЗ.

Согласно методологии (рисунок 14) в первую очередь формируются модели неопределённости основных характеристик объекта, от которых непосредственно зависит его целевая функция. Например, расход топлива, аэродинамические и массовые характеристики самолёта в связи с дальностью его полёта. Их значения на начальных этапах проекта не могут быть определены точно. Поэтому по статистике или экспертно необходимо оценить распределение их вероятных величин в возможном диапазоне значений. На этой основе выполняется имитационное моделирование с объединением случайных величин в составе интегрального показателя, например, методом Монте-Карло. Полученную гистограмму распределения вероятных значений интегрального показателя сравнивают с требованиями к самолёту (рисунок 15). Результатом верификации проектных данных становится вероятность выполнения требуемых значений, (например, интеграл от плотности вероятности дальности полёта, превышающей ТЗ), которую необходимо исследовать на чувствительность к локальным неопределённостям, определив критические характеристики, вносящие наибольший вклад в риски невыполнения требований.

Например, анализируется вероятность выполнения требований в зависимости от трёх характеристик, определяющих дальность полёта, включая: аэродинамическое качество, удельный расход топлива и массу пустого самолёта. Выполняется поочерёдное фиксирование этих характеристик в пределах диапазонов их неопределённости, в т.ч. на уровне благоприятных, средних и неблагоприятных значений. Это необходимо, чтобы сделать частные прогнозы для принятых технологий. Если одно из фиксированных значений окажется неизбежным, необходимо знать, как изменится вероятность выполнения ТЗ самолёта.

Итак, на Этапе 2 путём согласования основных элементов производится синтез функциональных агрегатов системы (рисунок 4) с рациональными параметрами, которые обеспечивают объектовой системе наилучшие эксплуатационные характеристики. Так устраняются неопределённости состава системы и происходит упорядочение её элементов (рисунок 9).

5 Аналогии концепции

Сам факт проведения риск-анализа на Этапе 2 говорит о мнимом характере расчётных данных в составленном описании объектовой системы:

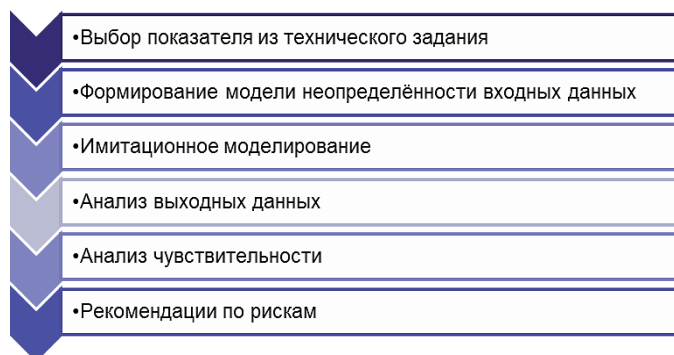


Рисунок 14 – Методология оценки технических рисков

На этой основе выполняется имитационное моделирование с объединением случайных величин в составе интегрального показателя, например, методом Монте-Карло. Полученную гистограмму распределения вероятных значений интегрального показателя сравнивают с требованиями к самолёту (рисунок 15).

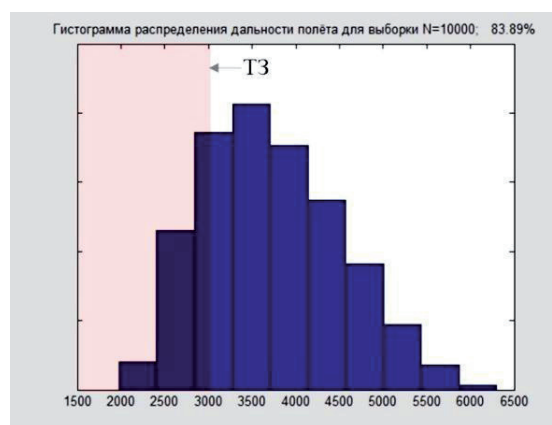


Рисунок 15 – Распределение плотности вероятности расчётной дальности полёта

$$S_0(2) = Re S_0(2) + \sqrt{-1} \cdot Im S_0(2), \quad (9)$$

где $Re S_0(2) \ll Im S_0(2)$.

Независимо от методологии исследования к реалистической информации, описывающей объектовую систему, можно отнести статистические данные и опыт специалистов. Для доказательства осуществимости новых результатов разработки необходима их экспериментальная проверка на следующем Этапе 3. Содержание этапа показано на рисунке 16.

Информационное обеспечение. Основу технологии проектирования комплекса экспериментальных моделей самолёта на этом этапе составляют средства информационной поддержки процесса проектирования - CAD/CAM/CAE-системы [14, 15]. Создаётся универсальное геометрическое объёмно-цифровое изображение самолёта в CAD-системах и многодисциплинарное электронное описание этой модели с помощью CAE-программ. Формируется база расчётных и экспериментальных данных с возможностью управления ими. Такая база данных позволяет осуществлять создание, доступ, распределение и контроль за обновляемыми хранилищами информации в рамках PDM-технологий (см. рисунок 17).

Созданные на Этапе 3 электронные чертежи и твёрдотельные модели сборки используются в конструировании и производстве моделей [15, 16]. Комплекс моделей, созданный на основе принципов подобия [17], служит для проведения экспериментов в соответствии с методиками и программами испытаний. Результаты экспериментальных и расчётных исследований используются для подтверждения проектных данных.

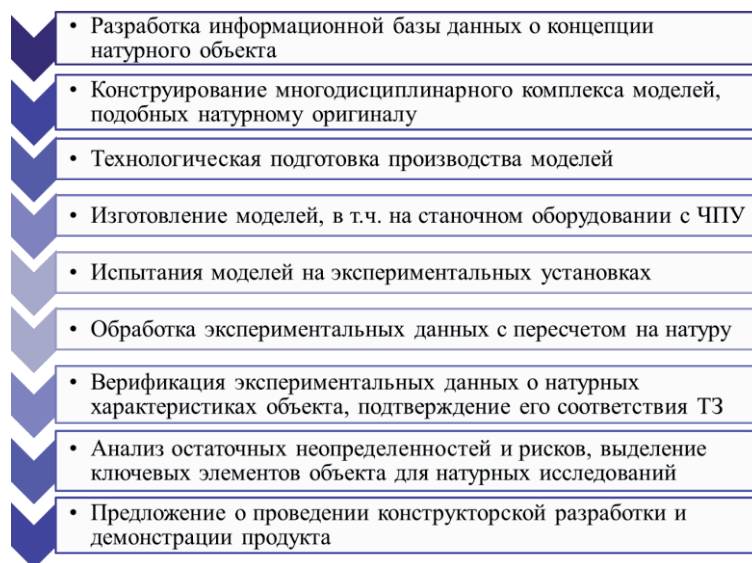


Рисунок 16 – Валидация критических характеристик объекта

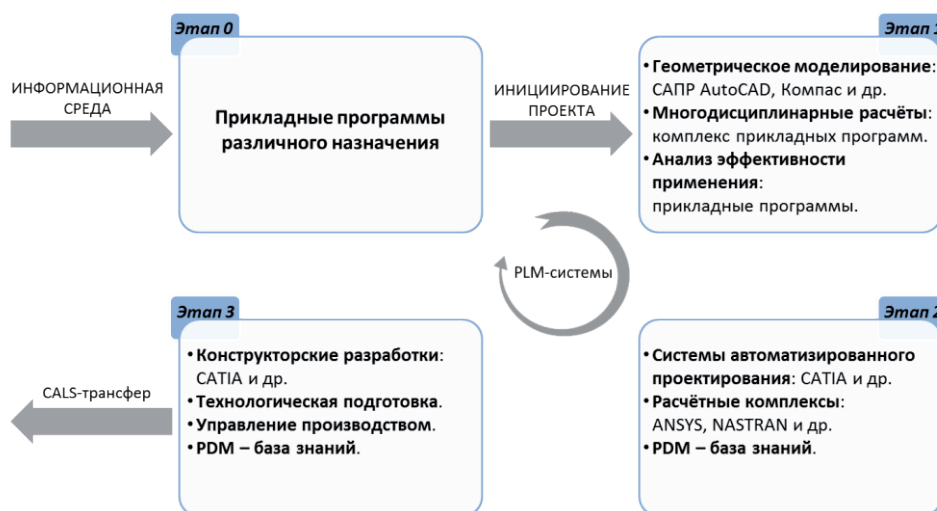


Рисунок 17 – Информационное обеспечение проекта

На Этапе 3 происходит трансформация части мнимых в реалистические характеристики разработанной технической концепции. При этом множество действительных данных (9) объектовой системы определённо увеличивается так, что:

$$S_0(3) = Re S_0(3) + \sqrt{-1} \cdot Im S_0(3),$$

где $ReS_0(3) \gg ReS_0(2)$

Трансфер технологий. Подобие моделей есть простейшее преобразование во взаимно однозначных (конформных) отображениях трёхмерного оригинала и его образа. На концептуальной стадии проекта оригиналом является сочетание идей – векторное имя концепции $\vec{\sigma}$ как прообраз её скалярного содержания, заключённого в объектовой системе S_0 . При этом суммарный вектор идей направлен в сторону их источника, неизменного на всех этапах развития концепции (рисунок 4). Являясь информационным проводником оригинала, концепция объекта ($\vec{K} = \vec{\sigma} \cdot S_0$) отображается в своих образах-аналогиях - в физических и иных моделях, проявленных на Этапе 3 в квазиреальных условиях применения будущего объекта. Вслед за этим управление проектом и направление вектора $\vec{\sigma}$ изменяются. Экспериментальные модели останутся образами, но оригинал в новом отображении будет другим. Им станет будущий натуральный объект. Дальнейшие разработки проводятся на материальной основе и в реальных условиях.

Начиная с Этапа 4, предстоит выполнить стадию «В» проекта (таблица 1). Её управление решит задачи конструирования и испытания опытных образцов будущего изделия. Однако эта деятельность не может быть инициирована раньше, чем у её руководителей возникнет интерес к работе над предложенным проектом.

Следовательно, для рассматриваемого Этапа 3 характерно двойное назначение – он служит не только для производства доказательных фактов в пользу разработанной концепции, но и для активной пропаганды полученных знаний среди ЛПП, квалифицированных в материализации идей. Иначе говоря, научная организация Этапа 3 должна играть роль «индуктора», возбуждающего внешний интерес к потребительскому потенциалу и технической эффективности новой концепции изделия.

6 Особенности концептуального проекта

Многодисциплинарная организация. На стадии «А» активными участниками проекта являются эксперты в областях аэродинамики и силовой установки, конструкции и системы управления, испытаний и эксплуатации АТ. В многодисциплинарном коллективе с объединяющим участием специалистов по проектному управлению и проектно-компоновочным разработкам профильные специалисты выполняют все этапы работы. Деятельность профильных специалистов обеспечивает квалифицированное решение основных задач концептуального проектирования – от выбора альтернативных идей и создания единой ММ объекта до получения достоверных данных о прогнозируемых характеристиках объекта.

Новая технология в сравнении. Особенности технологии проектирования, представленной в статье, начинаются с непосредственного обращения к теории познания с фундаментальными законами творческой деятельности. При этом для методов анализа, синтеза и аналогии разработаны логико-математические модели исследования, которые оперируют строгими понятиями концепции, принципа, идеи, системы на языке теории множеств и векторного анализа [1]. Именно они определены в качестве предметов проектного управления при разработке технической концепции будущего изделия.

На этапах «Анализа идей» и «Синтеза системы» научные методы позволяют численно определить вероятность успеха и риски в решении соответствующих задач. На этапе

«Аналогии концепции» устраняются неопределённости критических характеристик для ключевых проектных решений.

Концептуальный проект рассматривается как часть многоэтапного процесса разработки нового изделия. Аналогичным образом эта деятельность представлена и в «Системной инженерии» [18], которая является сводом знаний для выполнения полномасштабных проектов. Это собрание рекомендаций основано на опыте проектных разработок полного цикла и составлено в интересах широкого круга специалистов – инженеров, конструкторов, технологов и в т.ч. менеджеров проекта.

Проведено сравнение разработанной технологии с известными регламентами. Содержание расчётных и экспериментальных исследований, выполненных, например, на Этапе 3 проекта, вполне соответствует требованиям УГТЗ (таблица 1). Требования к завершению концептуальной стадии проекта идентичны основному содержанию эскизного проекта, которое представлено в действующем ГОСТ РВ 15.203-2001.

Действующий на современных авиастроительных предприятиях ОАК «Порядок управления авиационными программами» включает этапы 0, 1, 2, 3 (рисунок 18), по своим задачам аналогичным порядку концептуального проектирования на рисунке 1.

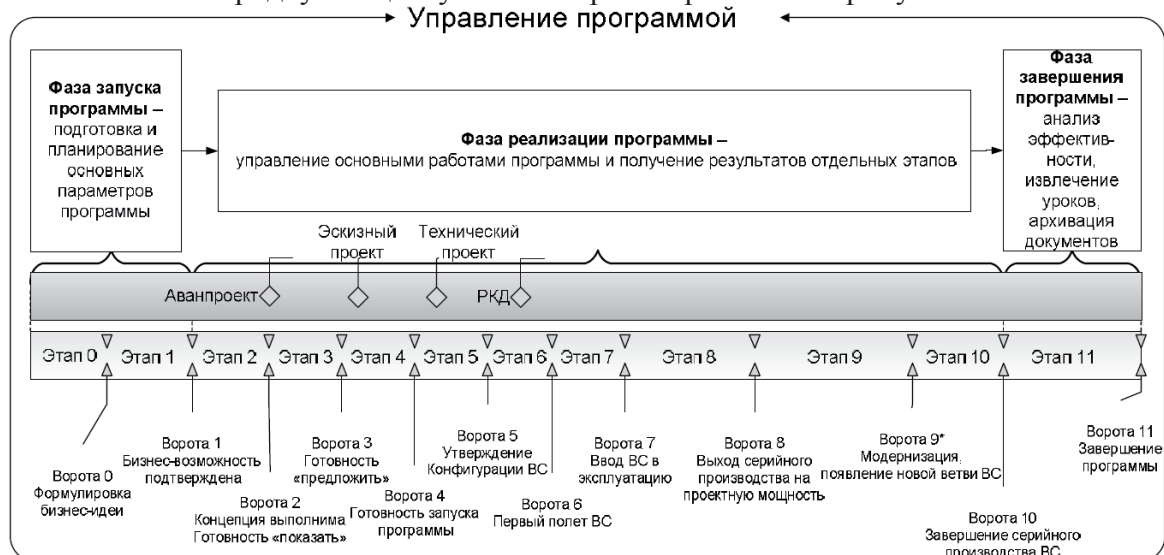


Рисунок 18 – Управление программой

Их описание отличается терминологией, удобной для менеджеров проекта (рисунок 3), и составляет Стадию А «Разработки концепции и технологий продукта» (см. таблицу 1). Её значение для полномасштабного проекта описано стандартом ОАК, который представляет аналогичный Этап 3, как «Определение изделия». Этап предназначен для оценки конкурентоспособности и определения конфигурации ВС. В ходе этого этапа уточняется облик ВС и разрабатывается основная часть эскизного проекта. По его результатам выявляются основные риски программы и планируются меры по их снижению. Существенным результатом является «Готовность предложить», которая предполагает заключить «мягкий» контракт с будущим заказчиком.

Для того, чтобы исполнить Стадию А в полномасштабном проекте, представленная технология концептуального проектирования предусматривает трансфер полученных результатов на этапы 4, 5, 6 конструкторской разработки.

Заключение

Статья развивает системный подход в проектировании самолёта [1, 19, 20] и знакомит с методами формализации разработки концепции будущего изделия. Сравнение со стандартными регламентами создания АТ показывает, что предложенная технология разработки концепции нового изделия по задачам аналогична Этапам 0, 1, 2, 3 стандарта ОАК. Особенности предложенной технологии состоят в систематическом применении логико-математических моделей и численного определения рисков для принятия обоснованных проектных решений. Результаты концептуальных проектов, разработанных согласно предложенной технологии, могут быть использованы на следующей стадии «Конструкторская разработка и демонстрация продукта».

Список источников

- [1] *Скворцов Е.Б., Шелехова А.С.* Начала теории концептуального проектирования с приложениями в области авиационной науки и технологий / Управление большими системами // Сборник трудов. М.: ИПУ РАН, 2018. Выпуск 75. С.170-206.
- [2] *Котлер Ф.* Основы маркетинга / пер. с англ., С: Прогресс, 1990, 736 с.
- [3] *Скворцов Е.Б., Шелехова С.В., Самойлов И.А., Лесничий И.В.* Измерение авиарынка и планирование поставок пассажирских самолётов // Общероссийский научно-технич. журнал «Полёт», 2022, №5. С.3-13.
- [4] *Гермейер Ю.Б.* Игры с непротивоположными интересами. М: Наука, 1976, 328 с.
- [5] *Володин С.В.* Стратегическое управление проектами на примере аэрокосмической отрасли. М: Ленанд, 2019, 148 с.
- [6] ГОСТ Р 57194.1-2016. Трансфер технологий. Общие положения.
- [7] *Ильин Е.П.* Психология творчества, креативности, одарённости. СПб: Питер, 2009. 434 с.
- [8] *Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К.* и др. Проектирование самолётов / под ред. Егера С.М. – М: Машиностроение, 1983. 616 с.
- [9] *Торенбик Э.* Проектирование дозвуковых самолётов / Пер. с англ. – М: Машиностроение, 1983, 648 с.
- [10] *Денисов В.Е., Каргопольцев В.А., Шкадов Л.М., Уджуху А.Ю.* Опыт разработки систем автоматизации предварительного проектирования самолётов и вертолётов / В сб. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники», М: Физматлит, 2005. С.389-400.
- [11] *Чанов М.Н., Скворцов Е.Б. и др.* Анализ технических концепций транспортного самолёта с различными типами и компоновкой силовой установки // Вестник Московского авиационного института, 2020, т.27, №4. С.30-47.
- [12] *Скворцов Е.Б., Шелехова А.С.* Метод анализа альтернатив в концептуальном проектировании авиационной техники. «Ученые записки ЦАГИ», 2017, том XLVIII, №5. С.54-62.
- [13] *Бондарев А.В., Васин С.С., Скворцов Е.Б. и др.* Разработка и диверсификация технологий дозвукового самолёта интегральной схемы с треугольным крылом. Часть 1 // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт», 2019, №9. С.3-11.
- [14] *Буньков Н.Г.* Современная информационная технология в создании летательного аппарата (введение в CALS (ИПИ)-технологии). М.: Изд-во МАИ, 2007. 252 с.
- [15] *Вермель В.Д.* Развитие автоматизации проектирования и изготовления аэродинамических моделей самолётов в 1990-2000 г.г. / В сб. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники», М: Физматлит, 2005. С.367-388.
- [16] *Балашова Ю.С., Вермель В.Д., Мамонтов О.Б., Овсянников И.Ю., Подлеснов А.М., Шиняев А.В.* Автоматизация управления производством аэродинамических моделей // Вестник МГТУ «Станкин», №2(49), 2019.
- [17] *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М: Наука, 1977, 440 с.
- [18] *Косяков А., Свит У.* и др. Системная инженерия. Принципы и практика / пер. с англ. – М: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
- [19] *Sadraey M.H.* Aircraft design: a systems engineering approach. A John Wiley & Sons, Ltd.. 2013. 778 p.
- [20] *Gatian Katherine N.* A quantitative model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction // Georgia Institute of Technology. 2015. 423 p.

Сведения об авторах



Скворцов Евгений Борисович, 1947 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе (МАИ) в 1971 г., к.т.н. (1993). Начальник научно-исследовательского отдела ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов около 80 работ, включая 8 патентов на изобретения. Область научных интересов – исследование перспектив развития авиационной техники, разработка технических концепций и новых технологий создания ЛА. skvortsov-tsagi@yandex.ru.

Бондарев Антон Владимирович, 1988 г. рождения. Окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ) в 2011 г., аспирантуру ЦАГИ в 2019 г. Ведущий инженер Научно-исследовательского управления реализацией проектов ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов более 30 работ, включая 5 патентов. Область научных интересов – исследование перспективных концепций и технические решения для новых технологий ЛА. AuthorID: 1070766. bondarevram@mail.ru.



Коноплева Виктория Марковна, 1994 г. рождения. Окончила Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») в 2018 г. Аспирант ЦАГИ. Специалист Центра комплексной интеграции технологий ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 14 работ. Область научных интересов – методы принятия проектных решений с учётом рисков и ограничений. viktoriya.konopleva@tsagi.ru

Сонин Олег Владимирович, 1971 г. рождения. Окончил Московский авиационный институт им. С. Орджоникидзе (МАИ) в 1995 г., аспирантуру ЦАГИ в 2002 г. Ведущий инженер НИО-10 ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов более 30 работ в области концептуального проектирования и создания автоматизированных систем компоновки транспортных самолётов. Author ID (Scopus): 15737603500 velomobil@yandex.ru



Чанов Максим Николаевич, 1983 г. рождения. Окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) в 2006 г., аспирантуру ЦАГИ в 2021 г. Ведущий инженер Научно-исследовательского управления реализацией проектов ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 26 работ, включая 3 патента на изобретения. Область научных интересов – проектные исследования и разработка новых концепций и технологий ЛА. arzmax@bk.ru

Шелехова Анна Сергеевна, 1985 г. рождения. Окончила Российскую экономическую академию им. Г.В. Плеханова в 2006 г., к.т.н. (2021 г.). Главный специалист Отдела управления проектами ФАУ «ЦАГИ». В списке научных трудов 15 работ в области риск-анализа и управления качеством научно-исследовательских проектов. anna.shelekhova@tsagi.ru ✉



Поступила в редакцию 13.11.2023, после рецензирования 28.11.2023. Принята к публикации 1.12.2023.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495

Formalized conceptual design technology in the aircraft industry

© 2023, E.B. Skvortsov, A.V. Bondarev, V.V. Konopleva, O.V. Sonin, M.N. Chanov, A.S. Shelekhova ✉.

Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N. E. Zhukovsky ("TsAGI"), Zhukovsky, Russia

Abstract

The article is devoted to the general issues of design formalization and practical methods of conceptual project development in civil aircraft industry. The project idea and the sequential implementation of the project concept development stages are considered. Special attention is paid to marketing and justification of the project strategy. The importance of

the idea analysis method for the project concept is shown. In the task of the technical system synthesis an approach to the coordination of its elements and a risk analysis of the designed civil aircraft critical characteristics is presented. The process of validation the aircraft project concept under development by means of experimental analogies is described. The presented methodology was developed for the first time as a complete full-cycle technology of civil aircraft conceptual design, the scientific results of which will eliminate the risks of erroneous choice of the technical concept and its inconsistency with the technical specifications.

Keywords: project, aircraft, concept, marketing, strategy, idea analysis, system synthesis, concept analogies.

For citation: Skvortsov EB, Bondarev AV, Konopleva VV, Sonin OV, Chanov MN, Shelekhova AS. Formalized conceptual design technology in the aircraft industry [In Russian]. *Ontology of designing*. 2023; 13(4): 479-495. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-4-479-495.

Acknowledgment: the authors express their gratitude to the lead engineer of TsAGI S.V. Shelekhova for her help in the design of the article.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and tables

- Figure 1 - Stages of conceptual project development
- Figure 2 - Stages and methods of project concept formation
- Figure 3 - A full-scale project of a new aircraft development
- Figure 4 - Conceptual project management models
- Figure 5 - Stages and methods of idea analysis
- Figure 6 - Technical appearance of an aircraft (example)
- Figure 7 - Possible variants of a transport aircraft [11]
- Figure 8 - Planning of the project experiment [12]
- Figure 9 - Risk management at the conceptual design stage
- Figure 10 - 3D model of a regional aircraft [13]
- Figure 11 - Methods of matching elements of the object system
- Figure 12 - Plan for matching airframe aerodynamics with engine parameters
- Figure 13 - Result of matching the engine bypass ratio and the wing profile
- Figure 14 - Methodology of technical risk assessment
- Figure 15 - Probability density distribution of the estimated flight range
- Figure 16 - Validation of the object's critical characteristics
- Figure 17 - Information support of the project
- Figure 18 - Program management
- Table 1 - The technological cycle of the project - from the idea to the introduction into maintenance

References

- [1] **Skvortsov E.B., Shelekhova A.S.** Beginning of the theory of conceptual design with applications in aeronautical science and technology [In Russian]. Management of large systems // Proceedings. Moscow: IPU RAS, 2018; 75: 170-206.
- [2] **Kotler F.** Fundamentals of marketing [In Russian]. Trans. from English, From: Progress, 1990, 736 p.
- [3] **Skvortsov EB, Shelekhova SV, Samoilov IA, Lesnichiy IV.** Measurement of the aviation market and planning of passenger aircraft rates [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical journal "Flight", 2022; 5: 3-13.
- [4] **Hermeyer YuB.** Games with non-contradictory interests [In Russian]. Moscow: Nauka, 1976, 328 p.
- [5] **Volodin SV.** Strategic project management on the example of the aerospace industry [In Russian]. Moscow: Leland, 2019, 148 p.
- [6] GOST R 57194.1-2016. Technology transfer. General provisions [In Russian].
- [7] **Ilyin E.P.** Psychology of creativity and giftedness [In Russian]. St. Petersburg: Peter, 2009. 434 p.
- [8] **Eger S.M., Mishin V.F., Liseitsev N.K., etc.** Aircraft design [In Russian]. Ed . Egera S.M. – M: Mashinostroenie, 1983. 616 p.
- [9] **Torenvik E.** Designing subsonic aircraft [In Russian]. Trans. from English. Moscow: Mechanical Engineering, 1983, 648 p.
- [10] **Denisov VE, Kargopoltsev VA, Shkadov LM, Ujuhu AYu.** Experience in developing automation systems for preliminary design of aircraft and helicopters [In Russian]. In the collection "Problems of creating promising aerospace technology", Moscow: Fizmatlit, 2005. P.389-400.

- [11] **Chanov MN, Skvortsov EB. et al.** Analysis of technical concepts of transport aircraft with different types and layout of the power plant [In Russian]. Bulletin of the Moscow Aviation Institute, 2020; 27(4): 30-47.
 - [12] **Skvortsov EB, Shelekhova AS.** Method of analysis of alternatives in the conceptual design of aviation technology [In Russian]. Scientific Notes of TsAGI, 2017; XLVIII(5): 54-62.
 - [13] **Bondarev AV, Vasin SS, Skvortsov EB. et al.** Development and diversification of technologies for subsonic flight of an integrated circuit with a triangular wing. Part 1 [In Russian]. All-Russian Scientific and Technical Journal "Flight", 2019; 9: 3-11.
 - [14] **Bunkov NG.** Modern information technology in the creation of an aircraft (introduction to CALS (IPI) technology) [In Russian]. Moscow: Publishing House of MAI, 2007. 252 p.
 - [15] **Vermel VD.** Development of automation of design and manufacture of aerodynamic models of self-flying in 1990-2000 [In Russian]. In the collection "Problems of creating promising aerospace technology", Moscow: Fizmatlit, 2005. p.367-388.
 - [16] **Balashova YuS, Vermel VD, Mamontov OB, Ovsyannikov IYu, Podlesnov AM, Shinyaev AV.** Automation of production management of aerodynamic models [In Russian]. Bulletin of MSTU "Stankin", №2(49), 2019.
 - [17] **Sedov L.I.** Similarity and dimension methods in mechanics [In Russian]. Moscow: Nauka, 1977, 440 p.
 - [18] **Kosyakov A, Sweet U, etc.** System engineering. Principles and practice [In Russian]. Trans. from English. Moscow: DMK Press, 2014. 624 p.
 - [19] **Sadraey MH.** Aircraft design: a systems engineering approach. A John Wiley & Sons, Ltd.. 2013. 778 p.
 - [20] **Gatian Katherine N.** A quantitative model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction // Georgia Institute of Technology. 2015. 423 p.
-

About the authors

Evgeny Borisovich Skvortsov (b. 1947) graduated from the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (MAI) in 1971, Ph.D. (1993). Head of the Research Department of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of about 80 works, including 8 patents for inventions. The scientific interests include the study of the prospects for the development of aviation technology, the development of technical concepts and new technologies for the creation of aircraft. *skvortsov-tsagi@yandex.ru*.

Anton Vladimirovich Bondarev (b. 1988) graduated from the Bauman Moscow State Technical University (MSTU) in 2011, and finished a TSAGI postgraduate course in 2019. Lead engineer of the Research Management of project implementation of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of more than 30 works, including 5 patents. The area of scientific interests is the study of promising concepts and technical solutions for new aircraft technologies. AuthorID: 1070766. *bondarevram@mail.ru*.

Victoria Markovna Konopleva (b. 1994) graduated from the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI") in 2018. Postgraduate student of TsAGI. Specialist of the Center for Complex Integration of Technologies of FAU "TSAGI". There are 14 works in the list of scientific papers. The field of scientific interests is methods of making design decisions taking into account risks and limitations. *viktoriya.konopleva@tsagi.ru*

Oleg Vladimirovich Sonin (b. 1971) graduated from the Ordzhonikidze Moscow Aviation Institute (MAI) in 1995, and finished a TSAGI postgraduate course in 2002. Lead engineer of the NIO-10 FAU "TsAGI". The list of scientific papers includes more than 30 works in the field of conceptual design and creation of automated systems for the layout of transport aircraft. Author ID (Scopus): 15737603500. *velomobil@yandex.ru*

Maxim Nikolaevich Chanov (b. 1983) graduated from the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev (NSTU) in 2006, finished a TSAGI postgraduate course in 2021. Lead engineer of the Research Management of project implementation of the FAU "TsAGI". The list of scientific papers consists of 26 works, including 3 patents for inventions. Research interests include design research and development of new concepts and technologies of aircraft. *arzmax@bk.ru*

Anna Sergeevna Shelekhova (b. 1985) graduated from the Plekhanov Russian Academy of Economics in 2006, Candidate of Technical Sciences (2021). Chief Specialist of the Project Management Department of FAU "TsAGI". In the list of scientific papers there are 15 articles in the field of risk analysis and quality management of research projects. *anna.shelekhova@tsagi.ru*