

Научная статья

УДК 629.7.016.3

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177607>

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТА НА ОСНОВЕ РИСК-АНАЛИЗА И ВЕРИФИКАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ДАННЫХ

Виктория Марковна Коноплева¹✉, Евгений Борисович Скворцов²

^{1,2} Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),
Жуковский, Московская область, Россия

¹ viktoriya.konopleva@tsagi.ru✉

² skvortsov-tsagi@yandex.ru

Аннотация. Предложен метод определения критических характеристик, позволяющий выделить ключевые технологии в проекте самолета для их последующей разработки. Метод основан на риск-анализе и верификации целевых характеристик объекта проектирования. Это позволяет оценить вероятность выполнения требований технического задания, ее чувствительность к локальным характеристикам элементов объекта и соответствующим технологиям их производства. Применение метода показано на примере проекта регионального самолета. Численная реализация выполнена с помощью пакета MATLAB & Simulink.

Ключевые слова: риск-анализ, верификация, концептуальный проект, критические характеристики, ключевые технологии

Для цитирования: Коноплева В.М., Скворцов Е.Б. Метод определения критических характеристик самолета на основе риск-анализа и верификации проектных данных // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30. № 4. С. 58–67. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177607>

Original article

A METHOD FOR AIRCRAFT CRITICAL CHARACTERISTICS DETERMINING BASED ON RISK-ANALYSIS AND PROJECT DATA VERIFICATION

Viktoriya M. Konopleva¹✉, Evgenii B. Skvortsov²

^{1,2} Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),
Zhukovsky, Moscow Region, Russia

¹ viktoriya.konopleva@tsagi.ru✉

² skvortsov-tsagi@yandex.ru

Abstract

The article reflects the method for critical characteristics determining of the aircraft allowing accounting for the uncertainty presence of a variety of parameters during design procedure while performing analysis and quantitative assessment of technical risk.

The purpose of this method application consists efficiency enhancing in the field of aircraft development. The said method is necessary for the current state of development monitoring, and helps while decision making among variety of different implementation options. In view of the initial design stage specifics methods employed for the aircraft characteristics computing are approximate. Computation of one and the same characteristic by different methods with various assumptions is quite possible, which causes a certain range of possible values. The presented method allows reducing the searched for characteristic uncertainty up to the numerical indicator.

The proposed indicator is the probability of fulfilling one or another item from technical requirements (TR) for the aircraft, and its computing requires the following action sequence:

- an uncertainty model forming, particularly, for a probabilistic model, selecting parameters distribution law and setting intervals of possible values;
- simulation modeling, allowing obtaining a range of possible values for the requirement being analyzed;
- analysis of the simulation modeling results, where the probability of a given TR item fulfilling and basic statistical characteristics are being computed, conclusions are drawn on the stability of the expected value;
- sensitivity analysis, which allows expanding the analyzed requirement understanding, transferring to decomposition by parameters and the critical uncertainty tracking of one or another parameter.

The method was considered on the example of the regional aircraft development. Beta distribution, specified by two parameters of shape and a range of possible values, is employed to form the input data uncertainty model. Simulation modeling was performed with the MATLAB & Simulink package. The integral indicator is the probability of fulfilling the TR in terms of flight range.

The article demonstrates that when flying at a fixed cruising speed, with 5th generation engines, the metric value is 84%. The histogram of the distribution belongs to the type of positively skewed distribution with a shift of the mean value from the center of the range, closer to the left border of the probabilistic values, which characterizes it as unstable. Sensitivity analysis confirmed this assumption, detecting that the interval of probability values for the aircraft empty weight is such that the risk of not meeting the requirement for flight range in some cases could reach 100%. Based on the performed computations, an inference of necessity for extra studies in the field of aircraft strength and structural design was drawn.

Keywords: risk-analysis, verification, conceptual design, critical characteristics, key technologies

For citation: Konopleva V.M., Skvortsov E.B. A Method for Aircraft Critical Characteristics Determining Based on Risk-Analysis and Project Data Verification. *Aerospace MAI Journal*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 58–67. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=177607>

Введение

Управление проектами предусматривает принятие решений по итогам каждого этапа жизненного цикла. При этом важно избегать волевых, необоснованных решений, не беспокоясь об их последствиях. Неизбежные неопределенности проектных данных, особенно в начале работы, затрудняют принятие решений, создают риски ошибок. Поэтому концептуальная (начальная) стадия проектирования, например самолета, отличаясь наименьшими материальными затратами, сопряжена с наибольшими рисками (рис. 1).

Выполнение проекта может сопровождаться рисками самого разного происхождения [1]. В данной работе рассматриваются технические риски, кото-

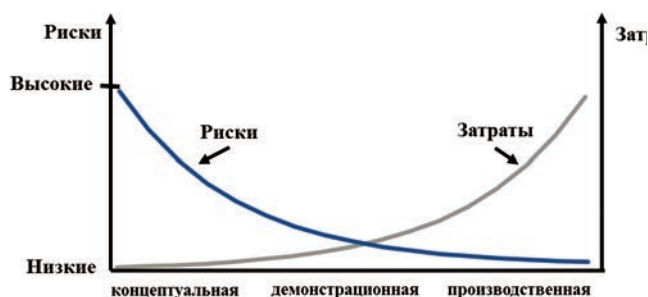


Рис. 1. Изменение рисков и затрат на проект в течение жизненного цикла

рые могут помешать созданию конечного продукта проекта или повлекут несоответствие продукта заявленным требованиям [2].

В концептуальном проектировании сложной технической системы начальной задачей является «анализ» основных идей эффективного выполнения заданных требований к будущему объекту (рис. 2). Результаты этапа 1 дают первые представления о его возможном облике. Далее для выбранного облика проводится «синтез» функционально различных подсистем [3]. В результате на этапе 2 получают внутренне согласованные параметры технической системы, характеристики которой могут быть проверены на соответствие целевым показателям. При этом важно узнать о технических рисках выполнения целевых показателей, чтобы особо выделить те элементы системы, которые страдают наибольшей неопределенностью своих функциональных возможностей, а затем для уточнения подвергнуть их экспериментальным исследованиям посредством модельных «аналогий» (этап 3).

Особенность оценки соответствия требованиям заключается в том, что характеристики объекта определяются, как правило, не точно. Они имеют диапазон возможных значений. Это связано, в частности, с их недостаточной изученностью и с приближенностью методов исследования на ранних

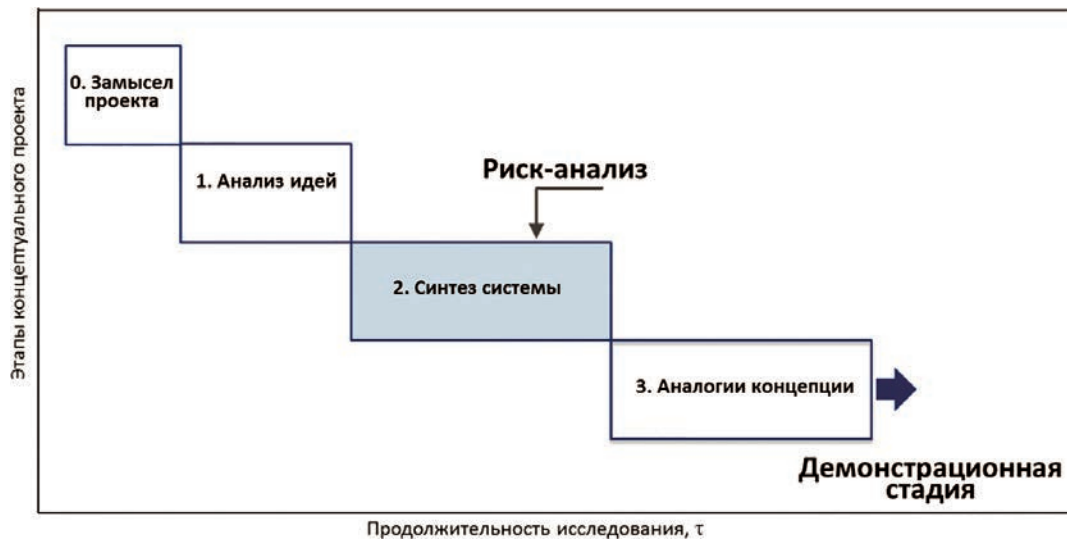


Рис. 2. Концептуальная стадия проекта. Основные задачи

этапах концептуального проектирования.

Особенность оценки соответствия требованиям заключается в том, что характеристики объекта определяются, как правило, не точно. Они имеют диапазон возможных значений. Это связано, в частности, с их недостаточной изученностью и с приближенностью методов исследования на ранних этапах концептуального проектирования.

Задача учета неопределенностей при расчете характеристик объекта возникала в ряде исследований [4–8]. Например, в [6] под руководством В.Е. Денисова проведено моделирование вероятностной оценки летно-технических характеристик самолета с использованием метода статистических испытаний. Полученный результат указывает на возможность комплексного учета неопределенностей в многодисциплинарном проекте будущего изделия.

Вероятностный подход к оценке технических рисков сегодня известен и за рубежом. Так, работа [7] посвящена методам обоснования решений по программе разработки технологий с учетом рисков. В этой связи автор работы Katherine N. Gatian отмечает, что в западной практике «технологии обычно не связываются с метриками системного уровня и вместо этого описываются свойствами подсистем на уровне компонент». В такой постановке оценка рисков решает частную задачу независимой разработки новых технологий, чтобы при достижении высокого уровня готовности предложить отдельную разработку для применения в каких-либо проектах новых технических систем. Таковую же задачу решает и упомянутый в обзоре [7] метод планирования и управления развитием технологий, предложенный М.С. Largent [8] и основанный на методе Монте-Карло с ранжированием вариантов на диаграмме

Парето.

Предлагаемый в данной работе метод является развитием идеи [6] о вероятностном представлении целевых характеристик самолета как сложной технической системы; здесь сделан следующий шаг в направлении верификации интегральных характеристик системы и оценки того влияния, которое оказывают локальные характеристики элементов системы на общий результат. Это позволяет на этапе 2 выделить подсистемы с наибольшим риском получения удовлетворительных характеристик, что определяется как критический фактор осуществления проекта изделия в целом и ведет к необходимости исследования и разработки соответствующих ключевых технологий, чтобы избавиться от опасных рисков.

Таким образом, задачи разработки технологий для отдельных подсистем поставлены в зависимости от особенностей проекта разрабатываемой системы. Такой подход принципиально отличает предлагаемый метод от принятого в [7], где изучение отдельной технологии, не связанной изначально с проектом сложного изделия, вынуждает затем искать объект для ее внедрения с неопределенным результатом.

Представленный здесь пример исследования показывает, как на этапе 2 формируется перечень ключевых технологий, которые требуют экспериментального подтверждения характеристик, критических для концепции будущего изделия.

Методология оценки технических рисков

В международных и отечественных стандартах [9–11] описывается общий подход к управлению рисками, который включает широкий перечень рекомендаций по риск-анализу. Их наиболее полное

описание представлено в справочном руководстве РМВОК [1].

Учитывая известный порядок управления рисками и исходя из задач концептуального проектирования, разработан метод оценки вероятности выполнения требований в результате проектирования сложного объекта. При разработке использовались методы анализа в условиях неопределенности [12–14]. Разработанный алгоритм решения задачи предусматривает определенную последовательность действий (рис. 3).

Выбор показателя из технического задания (ТЗ).

Из полного списка требований выбирается интегральный показатель качества, который контролируется при управлении проектом. На этом этапе у специалистов имеется многодисциплинарная расчетная модель первого приближения, позволяющая вычислять интегральную характеристику, отражающую совместное действие взаимосвязанных подсистем в едином объекте.

Формирование модели неопределенности входных данных. В начале проекта система описана, как правило, неточными и неполными данными. В зависимости от специфики и контекста задачи источниками неопределенности могут выступать различные факторы, связанные как с приближенным характером данных расчета, эксперимента или архива, так и с неопределенностью прогнозных параметров. Известны три модели описания неопределенности: вероятностная, нечеткая и интервальная [15–18]. В качестве наиболее подходящей для решения поставленной задачи выбрана первая из них, позволяющая учитывать как интервал неопределенности, так и распределение возможных характеристик объекта.

Имитационное моделирование. Обычно интегральный показатель качества проекта объединяет несколько риск-факторов, характерных для модели объекта. Тогда возникает необходимость выполнения арифметических операций с неопределенными числами. Так, для сложения двух и более случайных величин с заданными законами

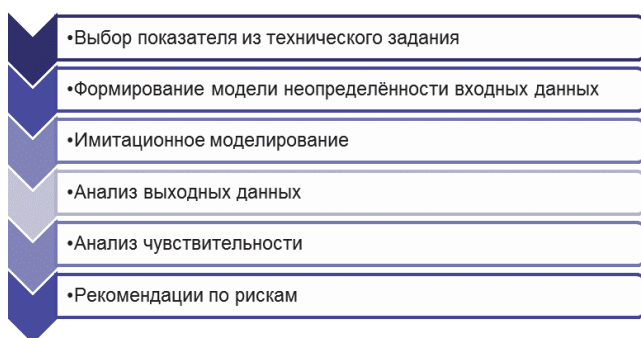


Рис. 3. Методология исследования

распределения требуется применять методы интегрального исчисления по кривым распределения. Для этого используется метод Монте-Карло. Этот метод использует выборки данных из неопределенностей любого вида и в то же время гарантирует соблюдение формы зависимостей, описывающих неопределенности. Соответствующий процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин; модель многократно обчисляется, а затем на основе полученных данных вычисляются вероятностные значения рассматриваемой характеристики.

Анализ выходных данных. После того, как смоделировано достаточное количество экспериментов, симулятор обеспечивает формирование интегрального распределения вероятности выполнения заданного требования. В терминах управления рисками результат представляется как диаграмма совокупного риска. Прежде всего речь идет о количественных характеристиках распределения, таких как математическое ожидание, дисперсия, стандартное отклонение, наименьшее и наибольшее значение диапазона возможных значений, которые можно оценить, построив частотную гистограмму и проанализировав ее форму [19].

Анализ чувствительности. Метод Монте-Карло дает возможность получить распределение вероятности интегральной характеристики и сравнить ее с заданными требованиями, но не позволяет выделить влияние отдельной подсистемы на интегральный показатель эффективности проекта. Поэтому необходим специальный анализ чувствительности этого показателя к влиянию отдельных риск-факторов. Этот этап работы состоит из нижеперечисленной последовательности действий:

- фиксируется значение характеристики одной из подсистем объекта;
- локальные характеристики других подсистем рассматриваются с известной для них моделью неопределенности;
- проводится имитационное моделирование с использованием метода Монте-Карло;
- выполняется анализ результатов, проводится верификация и ранжирование локальных характеристик по степени влияния на интегральный показатель.

Результатом анализа чувствительности становится перечень характеристик, составленный в соответствии с правилами ранжирования:

Правило 1. Если при задании фиксированного значения локальной характеристики получена 0%-вероятность выполнения требований к интегральному показателю качества проекта, то ей присваивается первая позиция в списке.

Правило 2. В списке может быть несколько локальных характеристик на первой позиции списка, если для всех выполняется правило 1.

Правило 3. В пределах интервала неопределенности рассматривается несколько фиксированных значений одной из локальных характеристик. Для каждого значения определяется своя вероятность выполнения потребного интегрального показателя. Далее для полученных значений вероятности проводится расчет среднего значения. В случае совпадения среднего показателя вероятности выполнения требований у нескольких риск-факторов более верхняя позиция при ранжировании присваивается тому фактору, у которого для остальных фиксированных значений характеристик получена наименьшая вероятность выполнения требований.

Рекомендации по рискам. На основании полученной метрики рисков осуществляется прогнозирование вероятности их проявления. Соответствующее реагирование на риски предполагает четыре варианта действий [20]:

- *избегание* подразумевает неисполнение всего или части проекта, вызывающего этот риск;
- *сдерживание* предусматривает выделение ресурсов для компенсации риска, если он наступит;
- *ослабление* подразумевает совершенствование частей проекта, вызывающих этот риск;
- *игнорирование* подразумевает отсутствие какой-либо деятельности по противодействию рискам.

Прибегая к сдерживанию или ослаблению рисков, необходимо сформировать направления специальных исследований, помогающих в решении этих задач, и включить их в план выполнения проекта.

Приложение метода к проектным исследованиям

В качестве примера описанный метод приложен к задаче концептуального проектирования регионального самолета [3].

Выбор показателя из технического задания. Получены требования к новому региональному самолету. Из них основными являются требования к транспортным характеристикам, в т. ч.:

1. Максимальная полезная нагрузка, заданная числом пассажиров или массой груза.
2. Дальность полета с максимальной полезной нагрузкой.
3. Заданная длина (класс) ВПП для базирования.

В качестве интегрального показателя эффективности выбрана дальность полета самолета с заданной полезной нагрузкой при эксплуатации на ВПП заданного класса. Последнее означает, что начальный вес самолета G_H в расчетах является неизменным. При определении дальности L крей-

серского полета со скоростью v рассмотрена ее зависимость от технических характеристик самолета, таких как удельный расход топлива C_e двигателей, аэродинамическое качество K и конечная масса самолета G_K , большую часть которой составляет масса сухого самолета:

$$L = \frac{vK}{C_e} \ln \frac{G_H}{G_K}.$$

Именно эти три характеристики отражают локальные свойства подсистем, их исследование должно дать представление о технической реализуемости требований к самолету и позволит выявить ключевые технологии проекта.

Формирование модели неопределенности входных данных. На основе имеющегося опыта и предварительных данных проекта формируются статистические множества возможных значений удельного расхода топлива для двигателей с близкими параметрами цикла, аэродинамического качества и массы самолетов-аналогов. Определяются диапазон возможных значений этих характеристик и частота их проявления, что позволяет использовать вероятностную модель неопределенности. На основе полученной информации выполняется моделирование характеристик подсистем с использованием бета-распределения. Для моделирования каждой характеристики (удельный расход топлива, аэродинамическое качество, конечная масса самолета) задаются параметры бета-распределения и интервал возможного изменения характеристики от минимума до максимума.

В качестве примера представлена процедура формирования закона распределения случайной величины аэродинамического качества, описывающая ее неопределенность. Для оценки вероятностных значений крейсерского аэродинамического качества в выборку включены показатели подобных самолетов с разным уровнем технического совершенства. Выборка включает также показатели аэродинамического качества исследуемого самолета, полученные на основе инженерных методов оценки. Статистическое представление возможных характеристик исключает субъективность экспертных оценок.

При таком подходе вероятность реализации того или иного уровня аэродинамического качества, а следовательно, и вероятность выполнения требований по дальности полета, определяются техническим совершенством самолета, объективно отражающим достигнутый уровень примененных технологий.

На основе выборки из 20-ти элементов построена гистограмма и рассчитаны базовые статистические показатели (рис. 4). Получено, что интервал возможных значений качества составляет $K = [13; 16]$.

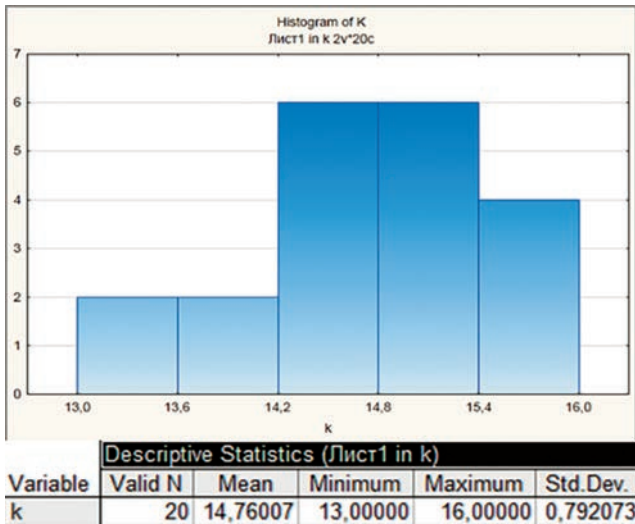


Рис. 4. Статистическое распределение возможных значений аэродинамического качества

Установив интервал возможных значений, необходимо подобрать параметры формы α , β . При этом следует учитывать [21] несколько условий:

- если $\alpha = 1$, $\beta < 1$ или $\alpha > 1$, $\beta \leq 1$, то график строго возрастающий;
- если $\alpha < 1$, $\beta \geq 1$ или $\alpha = 1$, $\beta > 1$, то график строго убывающий;
- если $\alpha = 1$, $1 < \beta < 2$ или $1 < \alpha < 2$, $\beta = 1$, то график строго вогнутый;
- если $\alpha > 2$, $\beta = 1$ или $\alpha = 1$, $\beta > 2$, то график строго выпуклый;
- если $\alpha > 1$, $\beta > 1$, то график унимодальный.

Условием удовлетворительного выбора параметров формы распределения является отличие математического ожидания статистических данных $m_{ст}$ от математического ожидания моделирующего распределения $m_{мод}$ не более чем на 5%. В табл. 1 представлены результаты выбора α и β .

Таблица 1

Параметры моделирующего бета-распределения случайной величины

Аэродинамическое качество		
$\alpha = 3, \beta = 2$		
$m_{ст}$	$m_{мод}$	%
14,76	14,79	0,21

В этом примере отличие в математическом ожидании между моделирующим распределением и статистически известным составило 0,21%, что меньше 5%. Следовательно, $\alpha = 3$, $\beta = 2$ выбираются как параметры формы для моделирования плотности распределения аэродинамического качества. На рис. 5 показан соответствующий теоретический закон распределения плотности вероятности аэродинамического качества, нормированный в диапа-

зоне от 0 до 1, где нулю соответствует минимальное аэродинамическое качество, а 1 – максимальное аэродинамическое качество на заданном интервале. Таким образом, посредством теоретического закона дискретные данные на рис.4 представлены близким эквивалентом.

Аналогичным образом выполнен сбор и анализ статистических данных для других характеристик подсистем, участвующих в расчете интегрального показателя качества проекта. В табл. 2 представлены их параметры, выбранные для имитационного моделирования.

Таблица 2

Параметры моделирования случайных величин локальных характеристик самолета

	Аэродинамическое качество	Удельный расход топлива	Масса сухого самолета
min	13	0,599	32,586
max	16	0,672	39,82
α	3	2	3
β	2	4	2

Имитационное моделирование. Для имитационного моделирования используется метод Монте-Карло, который дает количественную интерпретацию возможных сочетаний неопределенности принятых характеристик. Для ее компьютерной реализации необходимо алгоритмизировать сформированную модель неопределенности. Для этого в настоящей работе использован метод Неймана [22], который заключается в следующем. задается ограниченная плотность распределения $p(x)$. Пусть ϵ и η – равномерно распределенные в промежутке $[0, 1]$ случай-

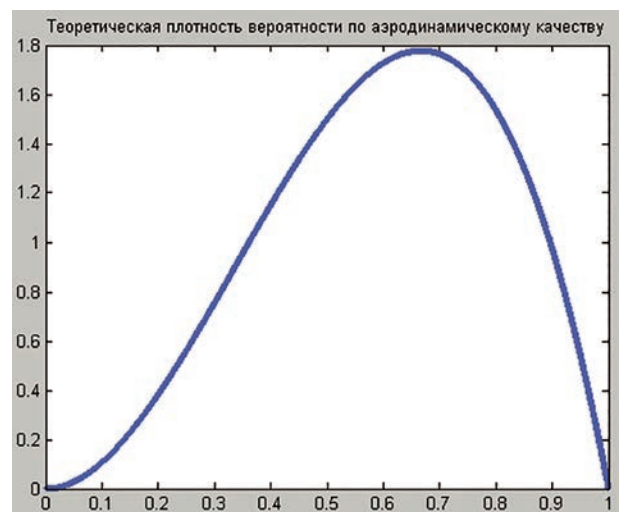


Рис. 5. Теоретическая форма распределения случайной величины аэродинамического качества

ные величины. Выбирают случайные числа ϵ и η и проверяют неравенство:

$$\rho[\epsilon(x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}] \geq \eta.$$

Если неравенство выполняется, то число

$$\bar{\epsilon} = \epsilon(x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}$$

принимают в качестве искомой случайной величины, распределенной с плотностью $p(x)$ на интервале $[x_{\min}, x_{\max}]$. Если же неравенство не выполняется, то пару (ϵ, η) отбрасывают и берут следующую.

В алгоритме используются два датчика псевдослучайных чисел с равномерным распределением на промежутке $[0, 1]$. Таким образом, по методу Неймана получают x_i с требуемой плотностью $p(x_i)$ на интервалах $[x_{\min}, x_{\max}]$, где $i = 1, 2, \dots, N$. После N -кратного обращения к процедуре расчета накопленная информация статистически обрабатывается.

Расчет вероятности выполнения требования к дальности полета включает ряд процедур, а именно:

Шаг 1. С использованием пакета MATLAB & Simulink случайным образом с заданными законами распределения генерируются характеристики подсистемы.

Шаг 2. Полученные значения используются при расчете дальности полета.

Шаги 1 и 2 повторяются N раз, после чего рассчитывается математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение дальности полета, определяется вероятность выполнения требования к дальности полета.

Анализ выходных данных. Выбранные характеристики, такие как аэродинамическое качество и масса самолета, удельный расход топлива двигателей, смоделированы (рис. 6) посредством описанных выше процедур.

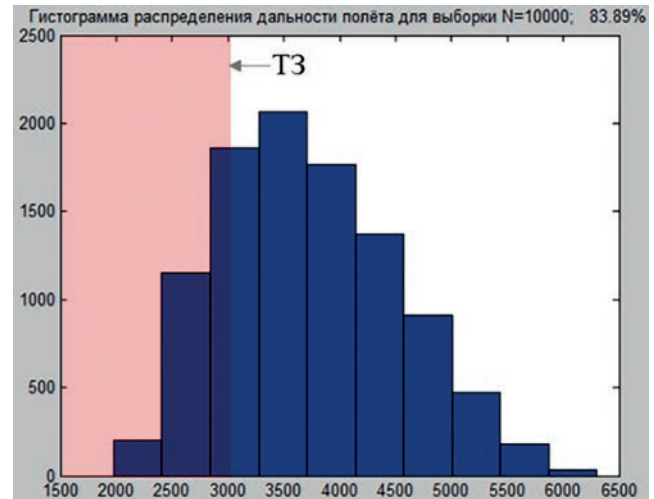


Рис. 7. Гистограмма распределения дальности полета самолета

Верификация возможных значений дальности полета показала, что вероятность выполнения требуемой дальности полета составляет 84% при соблюдении требований к полезной нагрузке и длине ВПП (рис. 7).

Итак, уже на этапе 2 проекта результаты исследования демонстрируют высокую вероятность успеха. Однако риски остаются, и будет ошибкой безоговорочно считать рассмотренные подсистемы самолета достаточно эффективными. Необходимо учитывать, что гистограмма распределения дальности полета (рис. 8) отличается положительно скошенным распределением со смещением среднего значения от центра размаха, что говорит о сосредоточении вероятностных значений дальности полета самолета ближе к левой границе. Такая тенденция требует дополнительного анализа.

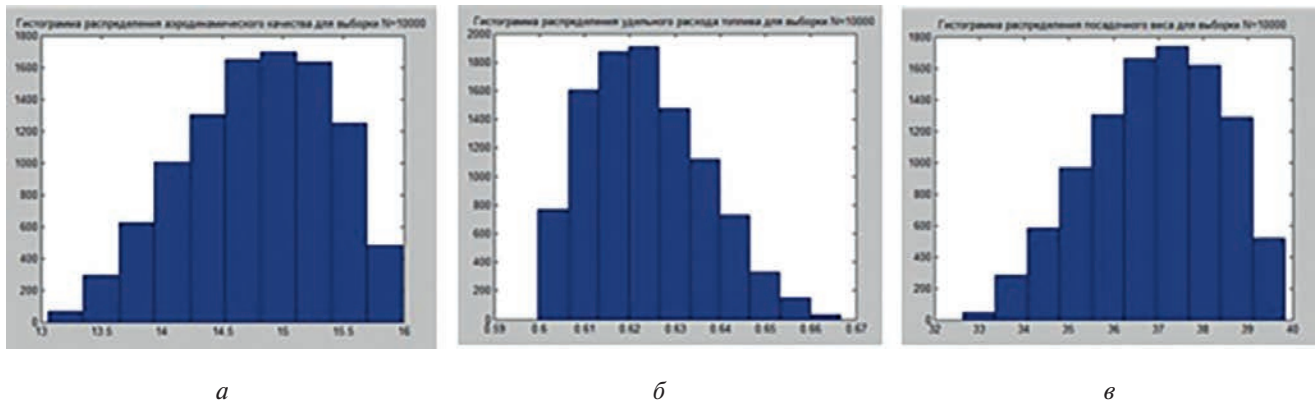


Рис. 6. Гистограммы распределения случайных значений характеристик самолета: *a* – аэродинамического качества; *б* – распределения удельного расхода топлива; *в* – распределения массы сухого самолета

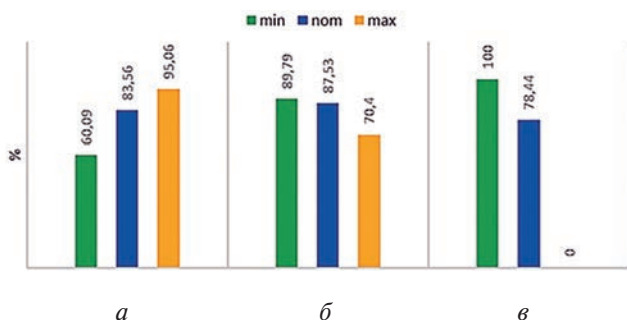


Рис. 8. Вероятность выполнения требуемой дальности полета при различных вариантах фиксирования локальных характеристик:
 а – фиксируется аэродинамическое качество;
 б – фиксируется удельный расход топлива;
 в – фиксируется масса сухого самолета

Анализ чувствительности. В данной работе анализируется вероятность выполнения требований в зависимости от трех характеристик, определяющих дальность полета, включая: аэродинамическое качество, удельный расход топлива и массу сухого самолета. Анализ выполнен путем поочередного фиксирования этих характеристик (рис. 8) с учетом данных табл. 2. Из рис. 8 видно, что параметрическое фиксирование аэродинамического качества или удельного расхода топлива на интервале возможных значений сопровождается снижением вероятности выполнения потребной дальности полета, но в ограниченных пределах. Тогда как фиксирование массы сухого самолета с максимально возможным значением приводит к 0%-вероятности выполнения требований, что является недопустимым. Согласно правилам ранжирования, описанным выше, эта характеристика занимает первое место в реестре риск-факторов. Далее составлен перечень рассмотренных характеристик по мере возрастания вероятности выполнения требования:

1. Масса сухого самолета.
2. Аэродинамическое качество самолета.
3. Удельный расход топлива (для двигателей 5-го поколения).

Отметим, что масса самолета, в т. ч. масса конструкции, является проблемой мирового авиационного сообщества. Существует известная тенденция к ее возрастанию в процессе разработки самолета, и это требует особых мер по управлению проектом.

Рекомендации по рискам. Итак, анализ чувствительности вероятности выполнения требуемой дальности полета к отдельным риск-факторам показал следующее:

– прогнозируемая неопределенность значений удельного расхода топлива в крейсерском полете ($M = 0,8$, $H = 11$ км) менее, чем другие характери-

стики влияет на вероятность выполнения транспортных требований, следовательно, этот риск можно игнорировать. При этом региональный самолет должен быть оснащен двигателями 5-го поколения, уровень технического совершенства которых не уступает проекту ПД-14;

– неопределенность возможных значений аэродинамического качества самолета в крейсерском полете создает несколько больше рисков, но остается в приемлемых пределах. Тем более, что существуют технологии улучшения аэродинамического качества. Следовательно, этот риск можно сдерживать;

– критическими являются увеличенные риски невыполнения требований из-за неопределенности возможной массы сухого самолета. Известный интервал неопределенности значений массы сухого самолета настолько велик, что риск невыполнения требований может достигать 100%. Подобный риск в данном проекте необходимо ослабить, проведя специальные исследования и разработки, особенно в части конструкции фюзеляжа и крыла. Технологии создания именно этих элементов самолета являются ключевыми в его проекте.

Выводы

Разработан метод определения критических характеристик самолета, который включает последовательное решение ряда задач, направленных на верификацию проектных данных. Результатом применения метода является оценка вероятности выполнения требований к самолету на основе объективных показателей. Для определения критических характеристик предложен анализ чувствительности вероятности выполнения требований к отдельным риск-факторам.

На примере концептуального проекта регионального самолета в качестве критической характеристики определена масса сухого самолета и сделан вывод о необходимости специальной разработки ключевых технологий конструкции фюзеляжа и крыла с целью ограничения их массы. Такая рекомендация соответствует требованиям [23] к управлению проектом в случае выявления критических характеристик разрабатываемого самолета.

Таким образом, применение предложенной методики позволяет:

- избавить проект от катастрофических неожиданностей;
- сфокусировать внимание на малоизученных факторах проекта;
- сделать риски явными и включить их в план дальнейших работ по проекту.

Список источников

1. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK®). – 6-е изд. – Project Management Institute, Inc., Pennsylvania, USA, 2018. – 756 с.
2. Department of Defense Risk, Issue, and Opportunity Management Guide for Defense Acquisition Programs. – Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering, Washington, D.C., 2017. – 96 p.
3. Васин С.С., Коноплева В.М., Скворцов Е.Б. и др. Согласование научных разработок в концептуальном проектировании транспортного самолета: метод и его приложение // Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей: Сб. науч. тр. V научно-практической конференции (04 декабря 2019; ИПУ РАН). – М.: Изд-во «Перо», 2020. С. 140–151.
4. Бальк В.М., Калущий Н.С. Статистический синтез устойчивых проектных решений при проектировании летательного аппарата в условиях многофакторной неопределённости // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 29–36.
5. Маленков А.А. Выбор проектных решений при проектировании системы беспилотных летательных аппаратов в условиях многоцелевой неопределенности // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 7–15.
6. Денисов В.Е., Исаев В.К., Рябов А.М., Шкадов Л.И. Статистическая оценка характеристик проектируемого самолета с помощью метода Монте-Карло // Ученые записки ЦАГИ. 1973. Т. IV. № 2. С. 137–142.
7. Gatian K.N. A quantitative, model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction. PhD Thesis. Atlanta, Georgia Institute of Technology. 2015. 423 p.
8. Largent M.C. A Probabilistic Risk Management Based Process for Planning and Management of Technology Development. PhD Thesis. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2003. ИПУ
9. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2020. – 90 с.
10. IEC 310110 Risk management - Risk assessment techniques. Geneva, Switzerland, 19 p.
11. Международный стандарт ИСО/МЭК 31000 Менеджмент риска. Руководство. – 2-е изд. – Женева, 2018. – 18 с.
12. Лонер Л.П., Уилкинсон Г.П. (ред.) Устойчивые статистические методы оценки данных. Сборник статей / Пер. с англ. Ю.И. Малахова; под. ред. Н.Г. Волкова – М.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
13. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука – 1981 – 206 с.
14. Ferson S. RAMAS Risk Calc 4.0 Software: Risk Assessment with Uncertain Numbers. – CRC Press, 2002. – 240 p.
15. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики. – М.: Высшая школа, 1971. – 329 с.
16. Hanss M., Willner K. On using fuzzy arithmetic to solve problems with uncertain model parameters. – Institute A of Mechanics, University of Stuttgart, 1996. – 246 p.
17. Шокин Ю.И. Интервальный анализ. – Новосибирск: Наука, 1981. – 112 с.
18. Скибицкий Н.В. Интервальные методы в задачах построения моделей объектов и процессов управления: Дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МЭИ, 2005. – 310 с.
19. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
20. Порядок принятия управленческих решений на основе оценки рисков NASA. ФГУП НТЦ Оборонного комплекса «КОМПАС» №1–315/16, 2016.
21. Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
22. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. – М.: Наука, 1971. – 471 с.
23. ГОСТ Р ЕН 9100-2011 Система менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 31 с.

References

1. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 4th ed. An American National Standard ANSI/PMI 99-001-2008, 506 p.
2. Department of Defense Risk, Issue, and Opportunity Management Guide for Defense Acquisition Programs. Deputy Assistant Secretary of Defense for Systems Engineering, Washington, D.C., 2017, 96 p.
3. Vasin S.S., Konopleva V.M., Skvortsov E.B. et al. *Materialy V Nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie nauchnymi issledovaniyami i razrabotkami: rol' nauki v dostizhenii nacional'nyh tcelej "*: Sb. науч. тр. 04 December 2019; IPU RAN), MOSCOW, Pero, 2020, pp. 140 – 151.
4. Balyk V.M., Kalutsky N.S. A statistical synthesis of stable design choices for flying vehicle design processes in conditions of multiple-factor uncertainty. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no 1, pp. 29–36.
5. Malenkov A.A. Design solutions selection while developing a system of unmanned flying vehicles in conditions of multi-target uncertainty. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no 2, pp. 7–15.

6. Denisov V.E., Isaev V.K., Ryabov A.M., Shkadov L.I. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1973, vol. IV, no. 2, pp. 137-142..
7. Gatian K.N. *A quantitative, model-driven approach to technology selection and development through epistemic uncertainty reduction*. PhD Thesis. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2015, 423 p.
8. Largent M.C. *A Probabilistic Risk Management Based Process for Planning and Management of Technology Development*. PhD Thesis. Atlanta, Georgia Institute of Technology, 2003.
9. *Menedzhment riska. Tekhnologii otsenki riska GOST R 58771-2019 (Risk management. Risk assessment technologies, State Standard R 58771-2019)*, Moscow, Standartinform, 2020, 90 p.
10. *IEC 310110 Risk management - Risk assessment techniques*. Geneva, Switzerland, 2019, 19 p.
11. *International Standard ISO 31000 Risk management – Guidelines*. 2nd ed. Geneva, Switzerland, 2018, 16 p.
12. Launer R.L., Wilkinson G.N. (eds) *Robustness in statistics*. Academic Press, 2014, 296 p.
13. Orlovskii S.A. *Problemy prinyatiya reshenii pri nechetkoi iskhodnoi informatsii (Problems of decision-making with fuzzy initial information)*, Moscow, Nauka, 1981, 206 p.
14. Ferson S. *RAMAS Risk Calc 4.0 Software: Risk Assessment with Uncertain Numbers*. CRC Press, 2002, 240 p.
15. Gurskii E.I. *Teoriya veroyatnostei s elementami matematicheskoi statistiki (Probability theory with elements of mathematical statistics)*, Moscow, Vysshaya shkola, 1971, 329 p.
16. Hanss M., Willner K. *On using fuzzy arithmetic to solve problems with uncertain model parameters*. Institute A of Mechanics, University of Stuttgart, 1996, 246 p.
17. Shokin Yu.I. *Interval'nyi analiz (Interval analysis)*, Novosibirsk, Nauka, 1981, 112 p.
18. Skibitskii N.V. *Interval'nye metody v zadachakh postroeniya modelei ob'ektov i protsessov upravleniya (Interval methods in problems of constructing models of objects and control processes)*. Doctor of Technical Sciences. Moscow, MEI, 2005, 310 p.
19. Solonin I.S. *Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroeniya (Mathematical statistics in mechanical engineering technology)*. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 216 p.
20. *Poryadok prinyatiya upravlencheskikh reshenii na osnove otsenki riskov NASA*. FGUP NTTs Oboronnogo kompleksa "KOMPAS" №1-315/16, 2016.
21. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorokhod A.V., Turbin A.F. *Spravochnik po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike (Handbook of probability theory and mathematical statistics)*. 2nd ed. Moscow, Nauka, 1985, 640 p.
22. Ermakov S.M. *Metod Monte-Karlo i smezhnye voprosy (Monte Carlo method and related issues)*. Moscow, Nauka, 1971, 471 p.
23. *Sistema menedzhmenta kachestva organizatsii aviatsionnoi, kosmicheskoi i oboronnykh otraslei promyshlennosti. GOST R EN 9100-2011 (Quality management systems of organizations of aviation, space and defence industries. Requirements, State Standard R EN 9100-2011)*, Moscow, Standartinform, 2019, 31 p.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 19.09.2023.

The article was submitted on 03.07.2023; approved after reviewing on 15.09.2023; accepted for publication on 19.09.2023.